



ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI SZEMINÁRIUM

2023

KONFERENCIA
ELŐADÁSAI

Miskolc, 2023. december 18.



Miskolc, 2023.

ISBN 978-963-358-323-4

Kiadta:

Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Fizikai és Elektrotechnikai Intézet
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Szerkesztette:

Somogyiné Dr. Molnár Judit

egyetemi docens
Miskolci Egyetem

Dr. Pintér Judit Mária

tudományos főmunkatárs
Miskolci Egyetem

Szervező- és Tudományos Bizottság tagjai:

Dr. Bodnár István, Dr. Kozsely Gábor, Dr. Olajos Péter,
Dr. Pintér Judit Mária, Somogyiné Dr. Molnár Judit

ISBN 978-963-358-323-4

Miskolc, 2023.

A kiadványban megjelenő publikációk lektoráltak!

A kiadványban megjelenő tartalomért és a forrásmegjelölésért a kiadó felelősséget nem vállal!

A teljes felelősség a szerző(ke)t terheli!

ELŐSZÓ

A Miskolci Egyetem számos közleményt jelentet meg, amelyek évtizedek óta hozzájárulnak a tudományos élet fejlődéséhez. E fejlődéshez csatlakozva az Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2023 című konferencia előadásából készült publikációk elektronikus kiadványa a villamosmérnöki tématerületen folytatott kutatómunkák legújabb közleményeit tartalmazza.

A szeminárium szervezőbizottsága fontos feladatának tekinti a villamosmérnökség különböző szakágain folyó tudományos publikációs tevékenységnek színvonalas publikálási lehetőséget biztosítani. A színvonalat a szervezőbizottság azzal is biztosítani kívánja, hogy a kötetben megjelenő valamennyi cikk alapos lektorálási folyamaton és szerkesztőbizottsági értékelésen megy keresztül. A publikálásra elfogadott cikkek magas színvonalának az is záloga, hogy a cikkek lektorálásánál minden esetben törekedtünk az adott szakterületen elismert, és független kutatót, szakértőt felkérni. A lektorok észrevételeit a szerzők megkapták, ezzel is elősegítve a minőségi publikáció megjelenését. A lektorálás alapos és szakmailag igényes elvégzése nem kis feladatot ró a felkért lektorokra, amiért ezúton is köszönetünket fejezzük ki valamennyi közreműködő lektornak.

A kiadvány – a címének és küldetésének megfelelően – jól tükrözi azt a szerteágazó tudományos tevékenységet, amely a villamosmérnöki tudományok területén folyik. A folyóiratban közreadott cikkek egyaránt lefedik a klasszikus villamosmérnöki területeket, így a villamos- és erőműenergetikát, az elektronikai tervezést és gyártást, az automatizálást és infokommunikációt, valamint a jármű- és teljesítményelektronika legkülönbözőbb területeit, de számos cikket találunk a környezetvédelem és a gépészeti tudományok témaköreiből is.

Feltétlenül meg kell említenünk, hogy a kiadvány kiemelt célja lehetőséget teremteni a villamosmérnöki tudományok területén tevékenykedő, műszaki tudományos kutatást folytató egyetemi hallgatók, oktatók és a tudományterületet művelő szakemberek számára az aktuális munkáik, kutatási eredményeik bemutatására, ezzel elősegítve a szakmai fejlődésüket.

Jelen kiadványban az Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2023 című konferencia 2023. december 18-án elhangzott előadások írásos anyagai olvashatók, amely konferencia a Magyar Tudomány Ünnepe 2023. évi rendezvénysorozatának részeként került megszervezésre.

Kelt: Miskolc, 2023. december 18.

Szervező- és Tudományos Bizottság

TARTALOMJEGYZÉK

Bodnár István:

Beszámoló az Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék 2023-as eseményeiről..... 2

Balogh Bálint Csaba, Somogyiné Molnár Judit:

A sárospataki Páncélhegy-kőbánya villamosenergia-ellátásának kiváltása különböző napelemes rendszerekkel 9

Csécsi Dániel, Somogyiné Molnár Judit:

A CEE Kft. villamos energia költségének csökkentése tetőre vagy földre telepített napelemes erőmű segítségével 19

Kovács Attila, Somogyiné Molnár Judit:

Villamos fogyasztók analízise..... 30

Kárpáti Zoltán, Somogyiné Molnár Judit:

Hálózatra visszatápláló és szigetüzemű napelemes rendszerek megtérülési idejének összehasonlítása 39

Kovács Gergely, Somogyiné Molnár Judit:

Családi ház energetikai korszerűsítése napelemes és napkollektoros rendszerrel 52

Németh Norbert, Somogyiné Molnár Judit:

Családi ház háztartási méretű kiserőművének tervezése..... 61

Boros Rafael Ruben:

Geiger-Müller számláló tervezése és vizsgálata 73

Jobbágy Marcell:

A Paksi Atomerőmű turbógenerátorainak zárlati árama 92

Kozsely Gábor:

Feketetest-sugárzás magyarázatára alkotott modellek fejlődése 97

Kozsely Gábor:

Félvezetők fizikája alapján a modellkészítés egyenletei és paraméterei..... 103

Marcsa Dániel:

Elektromágneses szimuláció a villamosmérnöki képzésben..... 110

Matusz-Kalász Dávid:

A feltörekvő napelem cellák hatásfokának legfrissebb akkreditált eredményei 117

Palla Gyula:

Épületrezgések mérése lézer interferometrikus módszerekkel 124

BESZÁMOLÓ AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI TANSZÉK 2023-AS ESEMÉNYEIRŐL

REPORT ON 2023 EVENTS OF THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

BODNÁR István

Ph.D., dr. habil., intézeti tanszékvezető egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: *A tanulmány az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék 2023-ban megtartott legfontosabb eseményeiről számol be. A Tanszék a korábbi években megkezdett hagyományait idén is folytatta. Villamosmérnöki Szakmai Napot tartott. Laboratóriumokat korszerűsített és számos szakmai kirándulást szervezett. A legjelentősebb üzemlátogatás a Mátrai Erőmű meglátogatása volt. Szintén emlékezetes látogatás volt a MVK Zrt. telephelyének megtekintése is.*

Kulcsszavak: *oktatás, laboratórium-korszerűsítés, üzemlátogatás*

Abstract: *This paper presents on the most important events held in 2023 by the Department of Electrical Engineering and Electronics Institute. The Department continued its traditions started in previous years this year as well. Held an Electrical Engineering Professional Day. It modernized laboratories and organized many professional trips. The most significant plant visit was the Mátra Power Plant. Visiting the site of MVK Zrt. was also a memorable visit.*

Keywords: *education, laboratory modernization, power plant visit*

1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetén belül működő Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék az előző években megkezdett, immáron hagyományossá vált Villamosmérnöki Szakmai Napját 2023. tavaszán ismételten megrendezte. A lelkes kollégáknak köszönhetően a szakmai nap magas színvonalon került megtartásra június 1-jén, ahol 8 szakmai előadás hangzott el és több, mint 60 fő, többségében villamosmérnök hallgató vett részt. A szakmai előadásokat követően villamoskeresztelésre és nosztalgia villamosozásra került sor.

A tanszéki kollektíva még 2022-ben elhatározta, hogy a tanszék 40 éves laboratóriumait korszerűsíti. Ennek keretében 2022. őszére készült el a Villamos gépek és hajtások laboratórium felújítása [1]. Ez év nyarán további két labort újítottunk fel saját magunk. A Számítógépes mérés-technikai laboratórium és a Napelemes laboratórium. Mindennek köszönhetően a hallgatóink már három korszerűsített laboratóriumban szerezhetnek gyakorlati tudást. Jövőbeli terveink között szerepel a Villamos alaplaboratórium, valamint az Elektronikai laboratórium fejlesztése is.

A Tanszéken bevett szokás, hogy a hallgatónak rövidebb tanulmányutakon mutatjuk be az ipar működését. 2023-ban is több alkalommal szerveztünk egynapos tanulmányutakat, amelyek közül a legemlékezetesebb a Mátrai Erőműben tett látogatás volt.

2. VILLAMOSMÉRNÖKI SZAKMAI NAP

A szakmai nap céges előadásokkal kezdődött a Miskolci Egyetem III. előadótermében, amelyet követően sor került villamoskeresztelésre és nosztalgia villamosozásra is. A villamos köszöntése ünnepélyes keretek között 14:40-kor kezdődött a Tiszai Pályaudvar végállomáson,

majd pedig „végig rótták Miskolc városának girbe-gurba utcáit”. Ennek apropója, hogy éppen 25 évvel ezelőtt végzett az első villamosmérnöki évfolyam a Miskolci Egyetemen. A megvalósított programot az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A Villamosmérnöki Szakmai Nap programja.

| | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9:00-9:05 | Megnyitó <i>Dr. Bodnár István, egyetemi docens – ME-FEI-EET</i> |
| 9:05-9:35 | Nagyméretű ipari létesítmény Facility területének bemutatása <i>Kovács Attila, Facility vezető – ZF Hungária Kft.</i> |
| 9:35-10:05 | EMC vagy $E=M \cdot C^2$? Bosch AE/EMC-HU bemutakozó <i>Erdősy Dániel, EMC tesztmérnök – Robert Bosch Kft.</i> |
| 10:05-10:20 | Szünet |
| 10:20-10:50 | Csak szabályosan! Szabályozott generátorok elektromágneses szimulációja <i>Komáromi Tibor, fejlesztési csoportvezető – Starters E-Components Generators Automotive Hungary Kft.</i> |
| 10:50-11:20 | Skoda 26THU3 típusú villamos járművek üzemeltetése Miskolcon <i>Mándy Gábor András, villamosforgalmi és fenntartási üzemvezető – MVK Zrt.</i> |
| 11:20-11:30 | Szünet |
| 11:30-11:40 | MVM általános bemutatása <i>Csordás Péter, régióvezető – MVM Émász Áramhálózati Kft.</i> |
| 11:40-12:00 | Az elosztó hálózat aktuális műszaki kihívásai és azokra adható válaszok <i>Dr. Holcsik Péter, műszaki stratégiai szakterületvezető – MVM Émász Áramhálózati Kft.</i> |
| 12:00-12:20 | Feszültségpanaszok kezelésének egyfajta lehetősége <i>Balogh-Hegedűs Henriett, hálózati távlati tervezési munkatárs – MVM Émász Áramhálózati Kft.</i> |
| 12:20-12:30 | Miért jó egy szakmai szervezet helyi tagjává válni? <i>Bidlek Ferenc, MEE miskolci szervezet titkára – Magyar Elektrotechnikai Egyesület Miskolci Szervezete</i> |
| 12:30-12:35 | Zárszó <i>Somogyiné Dr. Molnár Judit, egyetemi docens – ME-FEI-EET</i> |
| 12:35-14:30 | Egyéni utazás a Tiszai Pályaudvarra |
| 14:30-14:40 | Gyülekező a Tiszai Pályaudvaron a 2-es villamos végállomásán |
| 14:40-14:50 | Villamoskeresztelés és csoportképzés |
| 14:50-16:30 | Nosztalgia villamosozás – „a Bengáli villamossal” Felső-Majláton 20 perces szünettel, ahol lehetőség van további fényképezésre |

A 100-as pályaszámú FVV 1100 típusú, közismertebb nevén Bengáli villamost 1962. október 3-án állították forgalomba Miskolcon. Ez volt az első csuklós villamos Miskolcon. A Ben-

gáli villamosok nevüket egyrészt a letaglózó méretük, másrészt pedig a bengáli tigrisekhez hasonló süvöltő hangjukról kapták. E villamoscsaládot eredetileg a főváros részére gyártották, azonban az intenzívebb emelkedőkön gyengének minősült. Az erőlködő motor hangja egy süvöltő tigriséhez hasonlít, így ragadt rájuk a Bengáli becenév, amely végül rajtuk maradt. A fővárosban néhány év használat után elkezdték leselejtezésüket, és így kerültek a vidéki nagyvárosokba, így Miskolcra is. Miskolcon e típust 2004-ben végleg kivonták a forgalomból és a helyüket a Bécsből érkező piros villamosok vették át. Érdekesség, hogy a 151-es pályaszámú 1200-as, kétoldali FVV villamos 2004. november 25-én búcsúzott el az utazóközönségtől. A 100-as és a 151-es FVV villamosok nosztalgia villamosként maradtak Miskolcon [2].

A 100-as pályaszámú villamost a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézete, valamint Villamosmérnöki Tanácsa a diák hagyományoknak megfelelően megkeresztelte és a Bengáli, alias Ampervadász Tigris nevet adományozta neki. Ezzel együtt az egyetemi közösség díszpolgárának és tiszteletbeli tagjának fogadta, így a Bengáli villamos a villamosmérnök-képzés újabb jelképévé vált a 2018-ban megkeresztelt Bécsi, alias Ampervadász Piroska villamossal együtt.

A nosztalgia villamosozáson résztvevők emlékül egy sorszámozott nosztalgia jegyet kaptak, amely egyben tombolaként is szolgált. A tombolasorsolásra Felső-Majláth végállomáson, illetve a villamoson került sor. A jókedvet a Selmeczi nóták biztosították. Az *1. ábra* a keresztelés utáni csoportképet tartalmazza.



1. ábra: Csoportkép háttérben a frissen keresztelt Bengáli, alias Ampervadász Tigris villamossal (FVV 1100).

3. SZÁMÍTÓGÉPES MÉRÉSTECHNIKAI LABORATÓRIUM

A tanszék Számítógépes mérés technikai laboratóriumát 2002-ben adták át a LIE4 nevet viselő laboratóriumban. Sajnos a hosszú évek oktatási tapasztalatai alapján a 30 m² alapterületű és nem túl kedvező kialakítású laboratórium kicsinek bizonyult. Mindezek miatt 21 év használat után úgy döntöttünk, hogy átköltöztetjük a kétszer akkora alapterületű LIE1 laboratórium he-

lyére. Ezzel a 9 hallgatói (18 fő részére) és 1 oktatói mérőhely tágasabban kerülhetett kialakításra. A LIE1 helyiség az áthelyezés előtt teljeskörű felújításon esett át, új padlózatot kapott, valamint új kapcsolószekrényt alakítottunk ki és teljesen új villamos hálózatot építettünk ki, amely megfelel a kor elvárásainak és érintésvédelmi szabványoknak.

A több hónapig tartó munka után a laboratóriumot a hallgatók szeptemberben vehették birtokba. Az átalakításban a tanszék teljes kollektívája kivette a részét, ugyanis az új villamoshálózat építését és az új kapcsolószekrényt is magunk alakítottuk ki. A műszerek egy részét sikerült lecserélni, továbbá a régi 5:4 arányú 19" méretű monitorokat is lecseréltük 16:9 képarányú, 24" méretű FHD monitorokra. Azonban az új számítógépekre és a további eszközökre még várni kell. Reméljük, hogy azok is hamarosan korszerű eszközökre lesznek cserélve. A 2. ábra szemlélteti az új laborendezést.



2. ábra: A részben megújult Számítógépes Méréstechnikai Laboratórium.

4. NAPELEMES LABORATÓRIUM

A Napelemes laboratóriumot 2017-ben kezdtük el kialakítani, azonban ezen idő alatt több alkalommal is át kellett költöztetnünk, mert az egyre növekvő műszerpark és eszközök egyre nagyobb helyigénnyel rendelkeztek. Ugyan a laboratórium ötlet nem új keletű, hiszen már 2008-ban elkezdődött egy napelemes laboratórium kialakítása, azonban az első sorban demonstrációs célokat szolgált, így a hallgatók gyakorlati oktatására kevésbé volt alkalmas.

Az elmúlt években már gyakorlati oktatásra alkalmas eszközök és saját mérőrendszerek kerültek beszerzésre, amelyeket folyamatosan bevontunk az oktatásba. Nem csak hallgatóink, hanem kollégáink is számos tudományos publikáció elkészítésében használták ezen laboratóriumot. A laboratórium az elmúlt években két külön helyiségben működött, ez azonban sem az

oktatás, sem pedig a kutatás során nem bizonyult hatékonynak, ezért is döntöttük az újabb költözés mellett. Ez év nyarán a két laboratórium berendezéseit és eszközeit egyesítve, a LIE4 laborba költöztettük, remélve, hogy ez már a végleges helye lesz. A labor új pultokat kapott, így egyidejűleg 6 pulton lehet asztali méréseket végezni. A laborban elhelyezésre került egy állványszerkezet is, amely a 7. mérőhelyet jelenti. A 7 mérőhelyen összesen 14 hallgató tud egyidejűleg méréseket végezni. E laborban már nagy méretű napelempanelek vizsgálatára is van lehetőség, ahol megvilágítást egy mesterséges fényszimulátor biztosítja, és nagy teljesítményű labortápegység segítségével elektrolumineszcencia vizsgálat, valamint hőkamerás felvételezésre is van lehetőség. A 3. ábrán láthatjuk a laboratóriumot.



3. ábra: Az újonnan kialakított Napelemes Laboratórium egy pillanatképe.

5. TANULMÁNYÚT A MÁTRAI ERŐMŰBEN

2023. tavaszán a Napelemeserőmű- és napkollektor-létesítő szakmérnök/szakember szakirányú és a Villamosmérnöki alapszakos villamosenergetika szakirányú hallgatókkal és oktatókkal a Mátrai Erőműbe látogattunk. A tanulmányutat először 2022. novemberében szerveztük meg, azonban akkor nem volt lehetőségünk a bányalátogatásra, viszont több időt tölthettünk a lignittüzelésű blokkok és kapcsolódó üzemegységeik megtekintésére.

A 2023. májusi üzemlátogatás három fő részleg látogatására terjedt ki. Először a klasszikus lignittüzelésű erőművi blokkokat, szénélőkészítő területet, villamos részleget és egy hűtőtornyot tekintettünk meg. A 4. ábra az egyik hűtőtorony belső terében készült. Ezt követően mentünk le a külszíni bányába, ahol közelről is megtekinthettük a kitermelőgépeket, valamint mi magunk is gyűjthettünk lignitet. Az üzemlátogatás ezen szakasza volt talán a legérdekesebb, mert a bányaterületre való eljutás is egy különleges, erre a célra kialakított járművel történt. A harmadik és egyben zárórész a rekultivált zagytározón telepített napelemes erőmű megtekintése

volt. Az üzemlátogatás során eltöltött 8 óra igen hasznosnak és nem kevésbé érdekesnek bizonyult. A jövőben is tervezünk hasonló üzemlátogatást.



4. ábra: A Mátrai Erőműben tett egyik látogatás csoportképe.

6. ÜZEMLÁTOGATÁS AZ MVK ZRT. TELEPHELYÉN

A Villamos gépek és hajtások c. tantárgy keretében minden évben a III. éves villamosmérnök és mechatronikai mérnök alapszakos hallgatókkal ellátogatunk az MVK Zrt. telephelyére, ahol testközelből is megtekinthetik az elektromos járműveket és a járműjavító, karbantartó csarnokot. 2023. november 15-i látogatásunkat a nosztalgia villamosok megtekintésével kezdtük. Itt lehetőség volt a nosztalgiavillamosok vezetőfülkéjébe ülni és fotókat készíteni. Ezt követően a villamos járműjavító csarnokban nézhettük meg a javítás alatt álló SKODA villamosokat, valamint az éppen új köntöst öltő híres adventi villamost. A csarnokban lehetőségünk nyílt egy abroncsesztergálást is végig nézni, valamint alulról is megtekinteni egy SKODA és az adventi TATRA villamost. A karbantartó műhelyben új és elhasználódott villamos abroncsok mellett hajtóműveket és villanymotorokat is megnézhettünk. Egyszerre láthattuk a régi, léghűtéses és az új, vízhűtéses aszinkron motorokat. Ezt követően az elektromos és a CNG töltőállomások, valamint autóbuszok megtekintése következett. A csoportképet (5. ábra) a gyári állapotú piros-fehér TATRA és két SKODA villamos előtt készítettük el.



5. ábra: Az MVK Zrt. telephelyén tett üzemlátogatás csoportképe.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A Tanszéki kollektíva, ahogyan az előző években, így 2023-ban is számos eseményt szervezett és laboratórium korszerűsítést hajtott végre. Minden tevékenységünk a műszaki szakmai oktatás fejlődését és a hallgatók tudásszintjének növelését célozza meg, hiszen a minőségi oktatás és a gyakorlati oktatás az alapja a személyes kompetenciák fejlődésének.

8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BODNÁR, I., BOROS, R. R., MATUSZ-KALÁSZ, D., OLAJOS, P., SZABÓ, N., SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., KOZSELY, G., ERDŐSY, D., MOLNÁR, S., JENYÓ, T., PINTÉR, J. M.: *Az Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék Villamos gépek és hajtások, alias LIE2 laboratóriumának felújítása*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi. Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék. pp. 42-55., 2022.
- [2] <https://mvkzrt.hu/villamoskozlekedes-tortenete>
(utolsó megtekintés dátuma: 2023. november 20)

A SÁROSPATAKI PÁNCÉLHEGY-KŐBÁNYA VILLAMOSENERGIA-ELLÁTÁSÁNAK KIVÁLTÁSA KÜLÖNBÖZŐ NAPELEMES RENDSZEREKKEL

REPLACEMENT OF THE ELECTRICITY SUPPLY OF THE PÁNCÉLHEGY QUARRY OF SÁROSPATAK BY DIFFERENT PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

BALOGH Bálint Csaba¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹villamosmérnök, bánya-és geotechnikai mérnök, baloghbc@gmail.com
Zempléncő Kft;
H-4941 Magyarország, Penyige, Kossuth utca 52., Tel: +36 42 506-514

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A cikkben a sárospataki Páncélhegy-kőbánya üzemének villamosenergia-ellátását, az üzemet tápláló hálózati villamos energia kiváltását tanulmányozzuk napelemes rendszerek segítségével és megvizsgáljuk az egyes szóba jöhető lehetőségeket. A vizsgálatokat elvégezzük közüzemi hálózatra tápláló, hibrid és szigetüzemű napelemes rendszer esetében is. Részletesen elemezzük az egyes napelemes rendszerek gazdaságossági kérdéseit, beleértve a beruházási, kivitelezési és működési költségeket, kiszámoljuk az egyes megtérülési időket is, majd javaslatot adunk a megfelelő rendszer kiválasztására.

Kulcsszavak: hálózatra tápláló, hibrid, szigetüzemű napelemes rendszer, gazdaságossági kérdések, megtérülési idő

Abstract: In this study the electricity supply of the Páncélhegy quarry in Sárospatak, the replacement of the grid electricity that feeds the plant with the help of photovoltaic systems is investigated and the individual possibilities are examined. The study is also carried out in case of grid-connected, hybrid and off-grid photovoltaic system. The economic issues of each photovoltaic systems are analysed in detail, including investment, implementation and operating costs, the individual payback periods are calculated and then a proposal for selecting the appropriate system is provided.

Keywords: grid-connected, hybrid, off-grid photovoltaic system, economic issues, payback period

1. BEVEZETÉS

A megváltozott gazdasági helyzet, illetve ennek következtében a drasztikusan megemelkedett villamosenergia-költségek miatt egyre nagyobb jelentősége van a megújuló, zöld energia beruházásoknak. Az ipari fogyasztók tekintetében ez különösen nagy jelentőséggel bír, hiszen a munkahelyek, illetve a szakképzett munkaerő megőrzése elsődleges szempont napjainkban. Ezt csak úgy lehet megvalósítani, ha a megnövekedett energiaigényt, valamint a költségeket, belátható időn belül stabilizáljuk, csökkentjük. Az ipari napelemes rendszerek egyre népszerűbbek a fenntartható energiaforrások és a környezetvédelem iránti elkötelezettség növekedése miatt. Használatuk jelentős előnyöket biztosít az üzemeltetők számára, beleértve az energia-költségek csökkentését, a karbantartási költségek minimalizálását és a környezetbarát működést is. Az ipari napelemes rendszerek tervezése és telepítése azonban nagy kihívásokkal járhat, amelyekre megoldásokat kell találni az optimális működés érdekében. Általában több ezer négyzetméternyi területet foglalnak el és számos napelempanelből állnak, amelyeket általában a tetőre vagy a földre telepítenek. A cikkben áttekintjük a sárospataki Páncélhegy-kőbánya

energiaigényének ellátását célzó egyes ipari napelemes rendszerek gazdaságossági kérdéseit és kiszámítva a megtérülési időket javaslatot adunk a megfelelő rendszer kiválasztására.

2. A BÁNYA ÉS AZ IPARI NAPELEMES RENDSZEREK BEMUTATÁSA

A Zempléncő Kft. által már több mint 22 éve üzemeltetett andezitbánya miocén korú, tömör szürke andezitet tár fel külszíni bányászat segítségével, melyet elsősorban útépítésre hasznosítanak. A bánya és az előtte lévő infrastruktúra, feldolgozó üzem Hercegkút környékén közvetlenül a 37-es főútról nyílik, Sárospatak felé haladva, az út jobb oldalán található. A bányában egy műszakos munkarendben dolgoznak az emberek. A téli időszakban reggel hét órától délután három óráig, a nyári időszakban reggel hat órától délután két óráig. De nem ritka a megnövekedett kiszállítási igény esetén a túlóra sem. Ilyenkor a műszak délután négy órakor ér véget, illetve a hétfégi túlóra a nyári időszakban rendszeresen előfordul. A kőbánya villamosenergia-igénye az elmúlt három évet figyelembe véve 350.000-400.000 kWh/év. A kőbánya várható működése még kb. 9 év. Ezeket a tényezőket figyelembe véve, egy ipari napelemes rendszer ideális lehet a felhasznált villamos energia egy részének, vagy akár egészének a kiváltására is.

Az ipari napelemes rendszer olyan fotovoltaiikus rendszer, amely villamos energiát termel a napfény segítségével nagyobb méretű ipari épületek, raktárak, üzemek, gyárak számára. A rendszerek nagyobb teljesítményű panelekből és inverterekből állnak, amelyek lehetővé teszik a nagyobb mennyiségű villamosenergia-termelést és a magasabb hatékonyságot. Ezek a rendszerek általában több ezer négyzetméternyi területűek és számos panelből állnak, nagyobb méretű invertereket is tartalmaznak, amelyek átalakítják a napelempanel által termelt egyenáramot (DC) váltakozó árammá (AC), így azt az épület vagy esetenként gépek, gépcsoportok villamosenergia-ellátására lehet használni. Használata számos előnnyel jár, például csökkenti a széndioxid kibocsátást, csökkenti az energiafelhasználást és ennek költségeit, valamint növeli a vállalkozás fenntarthatóságát. Az energiafogyasztás szempontjából nem számít, hogy háztartásról vagy ipari területről beszélünk, mindkettő esetében jelentős mennyiségű villamos energiát használunk fel. Általában a tetőre szerelt napelemes rendszert választjuk a lakóházakhoz, míg a cégek, vállalatok és ipari területek esetében a földön elhelyezett napelemek is egyre népszerűbbek. A földre történő telepítés oka lehet az, hogy az épület tetőszerkezete nem felel meg a követelményeknek, vagy nem elegendő a felület a megfelelő mennyiségű panel elhelyezéséhez [1].

A korábbi csoportosítás mellett a napelemes rendszereket a közcélú hálózattal való kapcsolatuk alapján is kategorizálhatjuk, amely összeköttetés esetén lehet közvetlen vagy közvetett. A közvetlen összeköttetés esetében a rendszer, ha többlet energiája van, akkor azt közcélú hálózatra betáplálja, illetve a felmerülő esetleges energia hiányt onnan pótolja. Ezt a típust hálózatra tápláló napelemes rendszernek nevezzük, amely áramszolgáltatói engedélyhez kötött. A visszatápláló rendszer garantálja az állandó áramellátást, függetlenül az energiaigényünk változásától. Egy ún. ad-vesz mérőóra méri a hálózathoz elfogyasztott és a visszatáplált áram mennyiségét.

Amennyiben nincs kapcsolat a napelemes rendszer és a közcélú hálózat között, azaz egymástól függetlenül üzemelnek, akkor ezt a típust nevezzük szigetüzemű napelemes rendszernek. Ezeket a napelemes rendszereket főleg olyan helyeken alkalmazzák, ahol nincs kiépített villamosenergia-hálózat és nem lenne gazdaságos a csatlakozás kiépítése, pl. tanyáknál, nyaralóknál, vagy hajók, lakóautók esetén. Napsütés hiányában viszont előfordulhat, hogy kiegészítő áramforrás szükséges a fogyasztók ellátásához. Tehát ha a napelemes rendszer több villamos energiát termel, mint a háztartás pillanatnyi fogyasztása, akkor vagy akkumulátortelepbe eltároljuk a többletenergiát, vagy ez az energia elvész [2]. A szigetüzemű rendszernek nagy hátránya, hogy az akkumulátorpark miatt sokkal drágább a beruházás, mint egy hálózatra tápláló

esetében, így a megtérülési ideje is jóval hosszabb. Sajnos a telepek amortizálódása miatt körülbelül 8-10 évente cserélni is kell őket, amely jelentős költséggel bír.

A közvetett kapcsolat esetében a napelemes rendszer csak kiegészíti a hálózatot, ilyenkor hibrid napelemes rendszerről beszélünk. A hibrid üzemű rendszer tulajdonképpen a hálózatra tápláló és a szigetüzemű napelemes rendszerek ötvözeté, így mindkét üzemmód ellátására alkalmas, azaz képes az áramot visszatáplálni és akkumulátortelepben is tárolni. Ez a megoldás olcsóbb, mint külön üzemeltetni egy hálózatra tápláló és egy szigetüzemű rendszert. Természetesen a hálózat használata miatt az áramszolgáltatói engedély itt is szükséges. A hibrid üzemű rendszer fő előnye, hogy segít maximalizálni az önfogyasztást. Amikor a napelemes rendszer nem termel, a felhasználó eldöntheti, hogy az akkumulátorokban tárolt energiát veszi igénybe, vagy a hálózatról vételez. Az akkumulátorok töltése egyaránt megoldható a villamos hálózatról vagy az éppen üzemelő napelemes rendszerről [1, 2, 3].

3. A KŐBÁNYA VILLAMOS ENERGIÁVAL TÖRTÉNŐ ELLÁTÁSA

A kőbánya területén, a bányatelek szélén rendelkezésre áll egy közel 8.000 m²-es terület (*1. ábra*), amely területen nem folyik bányászat, kitermelés. A területhez közel helyezkedik el a kisfeszültségű villamos transzformátor állomás. Könnyen körbekeríthető, valamint WiFi kapcsolat is rendelkezésre áll a kamerás megfigyeléshez. Sem gyalogos sem gépkocsiforgalom nincs az adott szektorban, tehát egy potenciális helye lehet a napelemes rendszer telepítésének.



1. ábra: A napelemes rendszer lehetséges telepítési helyszíne [4].

A rendelkezésre álló villamos energia adatok, illetve terület nagysága alapján egy 500 kWp napelemes rendszer kialakítása célszerű. Az éves villamosenergia-termelés egy 500 kWp napelemes rendszernél függ a Borsod-Abaúj-Zemplén vármegye éghajlati adottságaitól, az elhelyezés helyszínétől, a napelemek hatékonyságától. Általánosságban azonban, a vármegye éghajlata alkalmas a napelemes rendszerek számára, mivel nagyjából 1200-1400 kWh/kWp mennyiségű éves napsütési sugárzási adattal rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy egy 500 kWp napelemes rendszer általában éves szinten 600.000 kWh villamos energiát termelhet ebben a vármegyében (egy ideális déli tájolású és 35°-os dőlésszöggel rendelkező 1 kWp-es napelemes rendszer magas napsütéses óraszámmal kalkulálva átlagosan évente 1.200 kWh villamos energiát termel [5]). A villamos energia előállítását egy ekkora napelemes rendszernél függ a

rendszer termelőkapacitásától, a napsütéses órák számától és a rendszer hatásfokától is. De egy 500 kWp napelemes rendszer éves szinten valószínűleg 350.000-450.000 kWh villamos energiát biztosan meg tud termelni.

Egy hibrid, vagy szigetüzemű napelemes rendszerhez kapcsolódó akkumulátor, mint energiátároló eszköz nagyságának számításához is számos tényezőt kell figyelembe venni. Az akkumulátor kapacitása az alábbi képlettel írható le [6]

$$C_{akk} = E_{napi}^{fogy} \cdot t \cdot b, \quad (1.)$$

ahol

- C_{akk} az akkumulátor kapacitása [kWh],
- E_{napi}^{fogy} a napi energiafogyasztás [kWh],
- t a rendelkezésre állási idő [nap],
- b a biztonsági faktor [-].

A biztonsági faktor általában 1,2-1,5 közötti szám, amely figyelembe veszi a rendszer hatékonyságát és az esetleges terheléscsúcsokat. Tehát a kőbánya esetében a becsült napi energiafogyasztás átlagosan ~1500 kWh, de ezt esetünkben túl kell becsülni, hisz nem fordulhat elő, hogy nem áll rendelkezésre elég villamos energia. Az értékét 1600 kWh-ban határozzuk meg. A rendelkezésre állási idő 2 nap, míg a biztonsági faktor az infrastruktúra miatt 1,2. Így a szükséges akkumulátor kapacitása körülbelül $1600 \cdot 2 \cdot 1,2 = 3.840$ kWh. Egy ilyen kapacitású akkumulátor ára nagyon változó lehet és több tényező is befolyásolja, mint például az akkumulátor típusa, a teljesítménye, a gyártó, az ország, ahol vásárolják és a beszerelés költségei. Egy ilyen nagy kapacitású akkumulátor rendszer általában nagyon drága, és csak olyan nagyméretű telepek, vállalkozások vagy ipari létesítmények számára ajánlják, akiknek szükségük van hosszú távú energiátárolásra és biztosítására. Általánosan elmondható, hogy egy 3.840 kWh akkumulátor ára 150 EUR/kWh becsült ár mellett 576.000 EUR, azaz 400 Ft/EUR árfolyamon számolva ez 230.400.000 Ft, de ez csak általános becslés, az árak változhatnak a fenti tényezők függvényében. A telepítéséhez szükséges környezet kialakítása, valamint a kiegészítők és munkadíj költsége további költséggel járna.

4. AZ EGYES NAPELEMES RENDSZEREK GAZDASÁGOSSÁGI KÉRDÉSEINEK VIZSGÁLATA

Az egyes napelemes rendszerek gazdaságossági kérdéseinek vizsgálata során fontos figyelembe venni a következő tényezőket: beruházási és kivitelezési költségek, a várható energiamegtakarítás, a beruházás finanszírozása (saját tőke, banki kölcsön vagy bérleti szerződés), adókedvezmények, állami támogatások igénybevétele, a rendszer működési/karbantartási költsége, a rendszer élettartama (általában legalább 20 év). Az ipari napelemes rendszer telepítése előtt javasolt a gazdaságossági vizsgálat elvégzése, amely magában foglalja az összes fenti tényezőt. Az ilyen típusú rendszerek jellemzően hosszú távú beruházások, így fontos, hogy a megtérülési idő és a megtakarítások figyelembevételével értékeljük a befektetés gazdaságosságát.

4.1. BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEK

A kőbányában történő napelemes rendszer részét képezheti például a Risen Titan S 120Cell RSM-8-400M napelem modul. A meghatározott 500 kWp teljesítmény elérése érdekében az adattáblájából (400 Wp) leolvasható, hogy ebből a típusból 1.250 darabra lenne szükség. Ennek a rendszernek a terület igénye mindent figyelembe véve megközelítőleg 5.000 m², tehát

probléma nélkül elhelyezhető a potenciális helyszínen. Az invertert és a szükséges egyenáramú leválasztó kapcsoló mennyiségét a kiválasztott napelem modulok számához kell igazítani. Az inverter méretezésekor figyelembe kell venni a napelem modulok maximális megengedett rendszerfeszültségét. Ez meghatározza, hogy hány napelem modult lehet sorba kapcsolni anélkül, hogy károsodna a rendszer. Több ágból álló rendszereknél fontos, hogy az egyes ágak ugyanannyi napelem modult tartalmazzanak. A többágas rendszerekhez alkalmas inverterek azonban kivételt képeznek ezalól a szabály alól. A Risen Titan S 120Cell RSM-8-400M napelem modulhoz választhatjuk a HUAWEI SUN2000-100KTL-M1 inverterét. Megállapítható a gyári specifikációban megadott adatok alapján, hogy öt darab beszerzése indokolt.

Az 1.250 db napelemhez 1.250 db tartóra, vagy ekkora mennyiségű napelemet befogadó tartószerkezetre van szükség. A kábelek szükséges mennyisége a napelemek számától, a telepítési konfigurációtól függ. Általánosságban elmondható, hogy egy napelemhez egy pár kábelre van szükség. Ha minden napelemhez külön kábel szükséges, akkor a 1.250 db napelemhez legalább 1.250 pár (napelem kábel MC4 csatlakozóval) kábelre lenne szükség. Ha több napelem van összekötve egy "string"-ben, akkor az utolsó napelemnek külön kábel kell az inverter felé. Tíz napelemet célszerű egy stringbe kötni. A napelemekből álló stringeket egy ún. "stringbox"-ba kötjük bele. A stringbox-ban általában található biztosítékok, túlfeszültség levezetők, amelyek segítenek fenntartani a biztonságos és hatékony működést. Tehát ha öt sorba telepítjük a napelem paneleket, akkor ez soronként 250 db panelt jelent. Ami 25 stringet tartalmaz soronként. Ezt három stringboxba lehet bekötni, tehát 15 db-ra lesz összesen szükség a rendszerhez. Az öt invertert le kell tudni választani a hálózatról mindkét oldalon. Így szükség lesz 5 db DC oldali PV főkapcsolóra a DC oldal galvanikus leválasztására, illetve 5 db AC oldali megszakító kapcsolóra az AC oldal galvanikus leválasztására. Az AC oldalon áramvédő kapcsolót, illetve túlfeszültség levezetőt is be kell építeni. Tüzeseti főkapcsolót is létesíteni kell a rendszerben. A kapcsolónál a rendeltetésére utaló feliratot, piktogramot is el kell helyezni. Az inverterek általában egymással párhuzamosan kapcsolódnak össze, hogy eloszthassák a terhelést és növeljék a rendszer hatékonyságát. A több inverterrel működő erőművek előnye, hogy a rendszer megbízhatóbbá válik, és javítja annak hatékonyságát, mivel az inverterek egymás közötti terheléselosztása megakadályozza az energia elvesztését és a túlterheltséget. Továbbá, több inverter alkalmazása lehetővé teszi az erőmű karbantartását anélkül, hogy az egészet le kellene kapcsolni, mivel az egyes invertereket akár függetlenül is karban lehet tartani.

Az összekötéshez és a transzformátor állomásba való bekötéshez szükség lesz kisfeszültségű kábelekre is. A bekötés során a kábeleket védőtálcába, földbe kell helyezni. A földben homokágyat kell képezni a kábelek köpenyszigetelés védelme érdekében, jelzőszalaggal kell ellátni a nyomvonalat. Az EPH rendszer és a villámvédelem kialakítása során a talajviszonyok miatt arra kell törekedni, hogy a megfelelő szabványos földelési ellenállás értékeket nem földelő szondákkal, hanem kis mélységbe fektetett (max. 30-40 cm), nagy keresztmetszetű szalag földelőket alkalmazva lehessen elérni. Az EPH összekötéseket Ø8 mm acél tűzi horganyzott huzallal, illetve 25 mm² sodrott réz vezetékkel (védőcsőben) lehet kivitelezni, melyek fektetési mélysége 40 cm.

A segédanyagok mennyiségét a leoptimalisabb telepítési körülményekre való tekintettel próbáltuk meghatározni. Az eszközök különösen a kábelek ára a rendszeres árváltozásokra tekintettel csak nagyságrendileg becsülhető meg. A megfelelő tartó, illetve tartószerkezetre szerelt napelemek tehát öt, egyenként 126 m hosszú sort alkotnak. A villamosenergia-ellátást biztosító transzformátor körülbelül 30 m-re található a kiépítendő betáplálási csatlakozási ponttól. Összefoglalva az *1. táblázatban* láthatjuk az egyes napelemes rendszerek eszköz és segédanyag szükségletét, valamint ezek várható költségeit. A hibrid és szigetüzemű rendszerekhez természetesen akkumulátor telepet, tároló konténert, valamint töltésvezérlőt (Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/200-Tr 48V 200A) is be kell szerelni. Mivel a hibrid

üzemnél csak kiegészítő az akkumulátor, ebben az esetben a korábban kiszámolt kapacitás 1/3-ával kalkuláltunk (egy 1.280 kWh kapacitású akkumulátor telep becsült ára 150 EUR/kWh ár mellett 76.800.000 Ft). Az akkumulátor telepnek külön helyiséget biztosító tároló becsült költsége 7.640.000 Ft.

1. táblázat: Eszköz és segédanyag szükséglet, valamint ezek várható költségei az egyes napelemes rendszerek esetén.

| Megnevezés | Hálózatra tápláló | | Hibrid | | Szigetüzemű | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Mennyiség (db) | Bruttó ár (Ft) | Mennyiség (db) | Bruttó ár (Ft) | Mennyiség (db) | Bruttó ár (Ft) |
| Inverter és a beépítéshez szükséges segédanyagok | 5 | 10.207.200 | 5 | 10.207.200 | 5 | 10.207.200 |
| Napelem modulok | 1.250 | 70.029.200 | 1.250 | 70.029.200 | 1.250 | 70.029.200 |
| Szabadon álló horganyzott földi tartószerkezet | 1.250 | 40.897.500 | 1.250 | 40.897.500 | 1.250 | 40.897.500 |
| AC oldali villamossági anyagok, vezetékek, csatlakozók, elosztók kiépítéshez szükséges segédanyagok | - | 10.256.000 | - | 10.256.000 | - | 10.256.000 |
| EPH / DC oldali vezetékek, csatlakozók, védőtálca, kiépítésükhöz szükséges segédanyagok | - | 7.538.400 | - | 7.538.400 | - | 7.538.400 |
| Akkumulátor telep | X | X | 1 (1.280 kW) | 76.800.000 | 1 (3.840 kW) | 230.400.000 |
| Akkumulátor tároló konténer | X | X | 1 | 7.760.000 | 1 | 7.760.000 |
| Töltésvezérlő | X | X | 1 | 1.190.800 | 3 | 3.572.400 |
| Összesen | - | 138.928.400 | - | 224.679.200 | - | 380.660.800 |

4.2. KIVITELEZÉSI KÖLTSÉGEK

Első lépésben a terület megfelelő kialakítása a legfontosabb. Ezt a bányában dolgozó szakképzett személyzet a rendelkezésre álló munkagépek segítségével el tudja végezni. Ez nyolc óra alatt kivitelezhető, egy területi vezető, illetve két járművezető, egy rakodó és egy szállító jármű segítségével. Ennek a munkának a számított költsége 7.200.000 Ft. A kivitelezés után kerülne sor a terület elkerítésére, illetve kamerák kiépítése is fel fog merülni költségként. Ez a terület nagyságát figyelembe véve jelenleg 14.800.000 Ft többletköltséget jelent. Számolni kell továbbá a hálózatfejlesztési díjjal, illetve a tervezés és engedélyeztetés költségeivel is. A 2. táblázatban láthatjuk az egyes napelemes rendszerek kivitelezési költségeinek elemeit és a becsült összegeket.

2. táblázat: A kivitelezés elemei, valamint ezek várható költségei az egyes napelemes rendszerek esetén.

| Megnevezés | Bruttó ár (Ft) | | |
|------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------|
| | Hálózatra tápláló | Hibrid | Szigetüzemű |
| Tereprendezés | 7.200.000 | 7.200.000 | 7.200.000 |
| Tartószerkezet felépítése | 13.104.000 | 13.104.000 | 13.104.000 |
| AC/DC nyomvonal kiépítése | 7.800.000 | 7.800.000 | 7.800.000 |
| String-ek kialakítása, behúzása | 4.840.000 | 4.840.000 | 4.840.000 |
| EPH kiépítése | 3.380.000 | 3.380.000 | 3.380.000 |
| Napelem modulok telepítése és bekötése | 13.270.800 | 13.270.800 | 13.270.800 |
| Inverterek beszerelése AC/DC bekötése | 7.536.000 | 7.536.000 | 7.536.000 |
| Üzembehelyezés | 1.940.000 | 1.940.000 | 1.940.000 |
| Kerítés kiépítése kamera rendszerrel | 14.800.000 | 14.800.000 | 14.800.000 |
| Akkumulátor telep és töltésvezérlő telepítése, beüzemelése | X | 2.200.000 | 3.250.000 |
| Összesen | 73.870.800 | 76.070.800 | 77.120.800 |

4.3. MŰKÖDÉSI KÖLTSÉGEK

Az ipari napelemes rendszer működési költségei általában alacsonyak és stabilak a rendszer hosszú élettartama során. A működési költségei nagyrészt az alábbiakból állnak:

- karbantartási költségek a hatékony működés érdekében (pl. a panel és az inverter tisztítása, az árnyékolók eltávolítása, az esetleges javítások és általános rendszerellenőrzés). Fontos kiemelni, hogy bár a napelemes rendszer karbantartása költséges lehet, ezek a költségek befektetésnek számítanak, mert a megfelelő karbantartással hosszabb élettartamot biztosítunk a rendszernek, valamint csökkenthetjük a hiba és meghibásodás kockázatát. A napelemes rendszer értékének kb. 1,5-2 %-ával számolható évente.
- biztosítási költségek: általában a rendszer költségének kb. 2 %-a évente.
- monitorozási költségek: a napelemes rendszer monitorozása fontos feladat különböző érzékelőkkel, adatgyűjtő egység és szoftver használatával. Általánosságban elmondható, hogy a napelemes rendszer monitorozási költségei általában körülbelül a rendszer költségének 1-2%-a évente.

Tehát az ipari napelemes rendszer működési költségei esetünkben számszerűsítve a rendszer összköltségének 5%-ával számolva éves szinten a hálózatra visszatápláló rendszer esetében 10.639.960 Ft, hibrid üzeműnél 15.037.500 Ft, míg szigetüzemű rendszer esetén 22.889.080 Ft.

4.4. A NAPELEMES RENDSZEREK MEGTÉRÜLÉSI IDEJE

Az ipari napelemes rendszer beruházásának jelentősége az elmúlt években jelentősen növekedett mivel az üzleti, ipari szektor egyre inkább felismerte a megújuló energiák, az energia függetlenség előnyeit és a környezetvédelem fontosságát. Az ipari napelemes beruházás megtérülési ideje változó lehet, attól függően, hogy az adott telepítési helyen milyen mennyiségű napfény áll rendelkezésre, mekkora a rendszer mérete és határfoka, valamint mekkora áron értékesíti a szolgáltató a villamos energiát. Általában a rendszerek megtérülési ideje 5 és 10 év között van. Fontos azonban megjegyezni, hogy a napelemes rendszerek hosszú távú befektetések, és azok megtérülése nem csak a pénzügyi haszonban, hanem a környezetvédelem és a fenntartható jövő iránti elkötelezettségben is megmutatkozik. A megtérülési idő számításának legegyszerűbb módja a Payback Period (PBP) formulával tehető meg [2]

$$PBP = \frac{K}{E_m \cdot \dot{A}_E}, \quad (2.)$$

ahol

- PBP a megtérülési idő [év],
- K a napelemes rendszer összköltsége [Ft],
- E_m a megtakarított villamosenergia-mennyiség [kWh/év],
- \dot{A}_E a villamos energia ára [Ft/kWh].

Tehát az egyszerűsített megtérülési időt úgy tudjuk kiszámolni, ha a napelemes rendszer összköltségét elosztjuk a rendszer által egy év alatt megtermelt villamos energia árával. Jelenleg az áramszolgáltató a kötött szerződés szerint az elkövetkezendő 30 hónap során 150 Ft/kWh áron biztosítja a villamos energiát. A korábbi számítások szerint a bánya ~400.000 kWh villamosenergia-igényét biztosan ki tudja elégíteni a napelemes rendszer. Ennek a költsége, ha az áramszolgáltatótól vásároljuk meg 60.000.000 Ft/év lenne, tehát ekkora összeget tudnánk megtakarítani a napelemes rendszerrel. A bánya várható élettartam 9 év, így a számítások során a működési költségeket is ennyi idővel vettük figyelembe. A 3. táblázat tartalmazza a 9 évre számított összköltségeket az egyes napelem rendszerek esetén, valamint a fenti formula alapján kapott megtérülési időket. Láthatjuk, hogy hálózatra tápláló rendszer esetében várhatóan 5,14 év, míg hibrid üzemű rendszerénél 7,27 év alatt térülne meg a beruházás, ha azt a vállalat önerőből finanszírozza. Mivel hibrid üzemű rendszer esetében a hálózatra tápláló rendszer elemein túl szükséges egy akkumulátor telep, tároló helyiség, illetve töltésvezérlő egység is. Nyilvánvalóan ez a napelemes rendszer kicsit hosszabb idő alatt térülne meg. Ez hatványozottan igaz a szigetüzemű rendszer esetén, hiszen ott már teljes kapacitással vesszük figyelembe az akkumulátor telepet, így ez a típusú rendszer megvalósítása esetén 11,06 év alatt valószínűleg megtérülne, ha a beruházást a vállalat önerőből finanszírozza. Tekintve, hogy a kőbánya várható élettartama már csak 9 év, nem érdemes szigetüzemű rendszerben gondolkodni. Ugyan maradványértéken el lehet adni 9 év után a rendszert, de az akkumulátorok ~10 éves élettartama miatt részben vagy egészen cserélni kell majd az akkumulátor cellákat, ami újabb jelentős költséggel fog járni, így valószínűleg ez sem jelentene megoldást.

3. táblázat: Az egyes napelemes rendszerek költségei és becsült megtérülési idejei.

| A rendszer típusa | Becsült beruházási költség (Ft) | Becsült kivitelezési költség (Ft) | Becsült működési költség évente (Ft) | Becsült működési költség 9 évre számolva (Ft) | Összes becsült költség 9 évre számolva (Ft) | Megtérülési idő (év) |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| Hálózatra tápláló | 138.928.400 | 73.870.800 | 10.639.760 | 95.759.640 | 308.558.840 | 5,14 |
| Hibrid | 224.679.200 | 76.070.800 | 15.037.500 | 135.337.500 | 436.087.500 | 7,27 |
| Szigetüzemű | 380.660.800 | 77.120.800 | 22.889.080 | 206.001.720 | 663.783.320 | 11,06 |

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A sárospataki Páncélhegy-kőbánya üzemének villamosenergia-igényének napelemes rendszerrel történő ellátása a megváltozott, napjainkban egyre bizonytalanabb gazdasági helyzet, valamint egy esetleges áramszünet esetén a berendezések bekövetkező eltömődése, eldugulása miatt is indokolt. Utóbbit csak kézi erővel lehet megszüntetni, ami rendkívül időigényes, és akár egy pár másodperces áramkimaradás is okozhatja egy teljes nyolcórás műszak termelés kiesését. Termelés ugyan csak nappali időszakban történik a kőbányában, de ekkor az infrastruktúra a folyamatos működést megköveteli. A kőbánya villamosenergia-igénye az elmúlt három év adatai alapján ~400.000 kWh/év. A kitermelés még 9 évig folytatható. Ezeket a tényezőket figyelembe véve, három ipari napelemes rendszer telepítésének lehetőségeit vizsgáltuk meg. Láthattuk, hogy mindhárom napelemes rendszer működőképes lehet, de a szigetüzemű rendszer esetünkben akkora beruházási költséggel járna, hogy nem lenne gazdaságos, illetve a kitermeléshez rendelkezésre álló 9 év alatt a megtérülése bizonytalan. A hibrid üzemű rendszer esetében már csökkennek a beruházás költségei, viszont az üzembiztonság érdekében legalább egy 33%-os villamosenergia-tárolási kapacitást kellene biztosítani ahhoz, hogy a gépparkot elássa villamos energiával áramszünet esetén akkor is, ha a napelemes rendszer nem termel éppen villamos energiát. Magyarországon a hibrid üzemű rendszer csak vissz watt védelemmel kivitelezhető, a kétirányú energiaáramlás megvalósítása még nem engedélyezett, tehát ezzel a lehetőséggel pillanatnyilag nem lehet számolni. A hálózatra visszatápláló rendszer a leggazdaságosabb esetünkben. Viszonylag rövid időn belül megtérül, növeli az üzembiztonságot, nem kell külön akkumulátor parkot létesíteni, akkor is bevételt hozhat, ha nincs termelés. Hátránya, hogy ha egy adott időpillanatban áramszünet van és a napelemes rendszerben termelési vagy üzemelési hiba lép fel, akkor nem kerülhető el a termelés kiesése. A hibrid rendszer áthidalható időintervallumot biztosítana ezekre az esetekre is. Tehát a gazdasági szempontok alapján a hálózatra visszatápláló rendszer telepítését javasoljuk, abban az esetben, ha a hatályos jogszabályok ezt lehetővé teszik.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MÉSZÁROS, L., SCHOTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek*. Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- [2] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., SZALÁNCZI, D.: *Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, pp. 119-135. 2022.

- [3] VÉGHÉLY, T.: *Napelemes rendszerek villamos berendezései*. CSER Kiadó, Budapest, 2014.
- [4] <https://www.google.com/maps/@48.3162519,21.5416836,743m/data=!3m1!1e3> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 21.)
- [5] VÉGHÉLY, T.: *Napelemek és napelemrendszerek szerelése*. CSER Kiadó, Budapest, 2013.
- [6] <http://hu.solar-led-lights.com/info/how-to-calculate-battery-capacity-for-solar-sy-31267945.html> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 21.)

A CEE KFT. VILLAMOS ENERGIA KÖLTSÉGÉNEK CSÖKKENTÉSE TETŐRE VAGY FÖLDRE TELEPÍTETT NAPELEMES ERŐMŰ SEGÍTSÉGÉVEL

REDUCING THE ELECTRICITY COST OF THE CEE LTD. BY A ROOF-OR GROUND-MOUNTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

CSÉCSI Dániel¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹szerelde vezető, csecsi.daniel@gmail.com

Cascade Engineering Europe Kft;

H-2314 Magyarország, Halásztelek, Kisgyár utca 23., Tel: +36 24 521-300

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;

H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A Cascade Engineering Europe Kft. és sok más hasonló ipari vállalat működése jelentős villamos energiát igényel. Jelen gazdasági környezetben, valamint a villamos energia árának bizonytalansága miatt célszerű a cég energiaköltségének csökkentését célzó beruházások vizsgálata. A telephelyre napelemes erőművet lehetne telepíteni, mellyel csökkenteni tudnák az energiafelhasználásuk költségeit és versenyképesebbek lehetnek a konkurens cégekkel szemben. A cég abban a szerencsés helyzetben van, hogy mind a földre, mind az épületeik tetejére tudna napelemet telepíteni, mert jelentős kihasználatlan szabad zöldterülettel és nagy tetőfelülettel rendelkezik. Mivel általában a pénzügyek döntenek, így meg kell vizsgálni melyik kivitelezési mód lenne gazdaságosabb. Ezért a cikkben összehasonlítjuk a két telepítési módú napelemes erőművet a várható villamosenergia-termelés, a beruházási, kivitelezési, működési költségek és megtérülési idő alapján.

Kulcsszavak: napelemes erőmű, földre telepített, tetőre szerelt, megtérülési idő

Abstract: The operation of Cascade Engineering Europe Kft. and many other similar industrial companies requires considerable electricity. In the current economic environment and due to the uncertainty of the price of electricity, it is advisable to investigate investments aimed at reducing the energy costs of the company. A photovoltaic power plant could be installed on the site, with which they could reduce the costs of their energy consumption and be more competitive against competing companies. The company is in the fortunate position of being able to install solar panels both on the ground and on the roofs of their buildings, because it has significant unused green field and a large roof surface. Since finances are usually the deciding factor, it is necessary to investigate which implementation method would be more economical. Therefore, in the paper photovoltaic power plants with the two installation methods are compared based on the expected electricity production, investment, construction, operating costs and payback period.

Keywords: photovoltaic power plant, ground-mounted, roof-mounted, payback period

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt három év pandémiával és háborúval terhelt mindennapjainak hatására kiderült, hogy az Európai Unióban élő emberek mennyire kiszolgáltatottak mind villamos energia, mind fosszilis tüzelőanyag szempontjából. A 2022-es évben kialakult háborús helyzet rávilágított, hogy Magyarország és több európai ország sem rendelkezik saját maguk számára elegendő villamos energiával, gázzal vagy olajjal, így egyre fontosabb szerepet kapnak a megújuló energiák, melyek korlátlanul állhatnak rendelkezésre. Ezek közül jelenleg a legkevésbé kihasznált a nap- és szélenergia. Magyarországon a napsütéses órák száma kedvező, átlagosan évi ~2100 óra, így a napenergiát tekintve nagy rejtett potenciál van mind a lakossági, mind az ipari napelemes erőművekben. Sajnos minden cég azt tapasztalja, hogy csak komoly megszorítások árán

tud versenyképes maradni a saját szektorában, a 8-10-szer magasabb energiaköltségek mindenkit változásra készítetnek. Ezért az autóiipari szektort erősítő Cascade Engineering Europe (CEE) Kft.-nél is felvetődött, hogy a telephelyre napelemes erőművet telepítsünk, mellyel csökkenteni tudnánk az energiafelhasználásunk költségeit és versenyképesebbek lehetnénk a konkurens cégekkel szemben.

2. A CASCADE ENGINEERING EUROPE KFT. BEMUTATÁSA

A Cascade Engineering-et Amerikában Fred Keller alapította még 1973-ban. Idén, 2023-ban ünnepli az 50 éves fennállásának évfordulóját. Jelenleg Amerikában több mint tíz, Európában pedig egyedülként Magyarországon található egy leányvállalat. A Cascade Engineering Europe Termelő és Szolgáltató Kft. összességében nézve, több mint 2.000 munkavállalóval, több mint 150 fröccsöntőgéppel és 350 millió USD bevétellel bír, számos területen kiemelt beszállító lett.

A magyarországi vállalat Halásztelek központjában fekszik közel 26.000 m²-en, melynek nagy része zöld terület (*1. ábra*). Jelenleg három külön csarnokot különböztetünk meg, a fröccsöntés, a szerelés és a szerszámkészítés szerint. A cég fő profilja az autóiipari termékek fröccsöntése és szerelése, de minimálisan egyéb szegmensekben is részt vesz, ilyen például a szivattyú elemek fröccsöntése. A cég az elmúlt években sikeresen lépést tartott az autóiipari változásokkal és időben tudott csatlakozni az elektromos autók fejlesztéséhez, alkatrészellátáshoz, így sok hozzá hasonló céggel ellentétben mind a pandémiát, mind a megemelkedett energiaárakat minimális nehézségekkel át tudta vészelni. Azért, hogy ezt a fejlődést továbbra is fenn tudja tartani fontos megvizsgálni, hogy a kihasználatlan zöld területet, illetve tetőfelületeket milyen energiacsökkentő lehetőségekkel tudná hasznossá tenni, így kerül képbe a napelemes erőmű.



1. ábra: Cascade Engineering Europe Kft. [1].

Mint a háztartási fogyasztóknál, egy ipari vállalatnál is fontos a havi rezsiköltség, ami nagyban befolyásolja egy-egy termék árát és gyártásának gazdaságosságát. Az üzem legnagyobb villamosenergia-felhasználói a fröccsöntő gépek. Ezekből a gépekből több mint 35 db található különböző mérettartományokban. Ezen gépek nagy része (25-30 db) folyamatos üzemben, azaz a hét minden napján 24 órán keresztül üzemel.

Jelenleg olyan időket élünk, hogy az eddig kiszámítható villamosenergia-költség (amivel akár előre egy évre is lehetett kalkulálni) akár napról napra változik. Az ipari vállalatok általában előnyben részesítik a hosszú távú szerződéseket (ezek jellemzően 1 vagy 2 évre szólnak), ám a jelenlegi helyzetben, amikor nem tudni mikor csökkenhet vagy növekedhet a villamos energia ára, a különböző szolgáltatók nem mindig engedélyezik az ilyen hosszú távú szerződéseket. Jellemzően ezek a szerződési idők lecsökkentek 1-3 hónapra, így hosszú távon kiszámíthatatlanná vált, hogy milyen költségekkel kell kalkulálni egy-egy termék előállítását tekintve. E kiszámíthatatlanság felszámolása és a versenyképesség fenntartása ösztönözte a céget, hogy különböző beruházásokban kezdjen el gondolkodni, ami az energiafelhasználásuk csökkentését célozza meg. A rendelkezésre álló tetőfelületek és szabad zöldfelület lehetővé teszik mind a tetőre, mind a földre telepített napelempark létrehozását.

3. A NAPELEMES RENDSZEREK TÍPUSAI

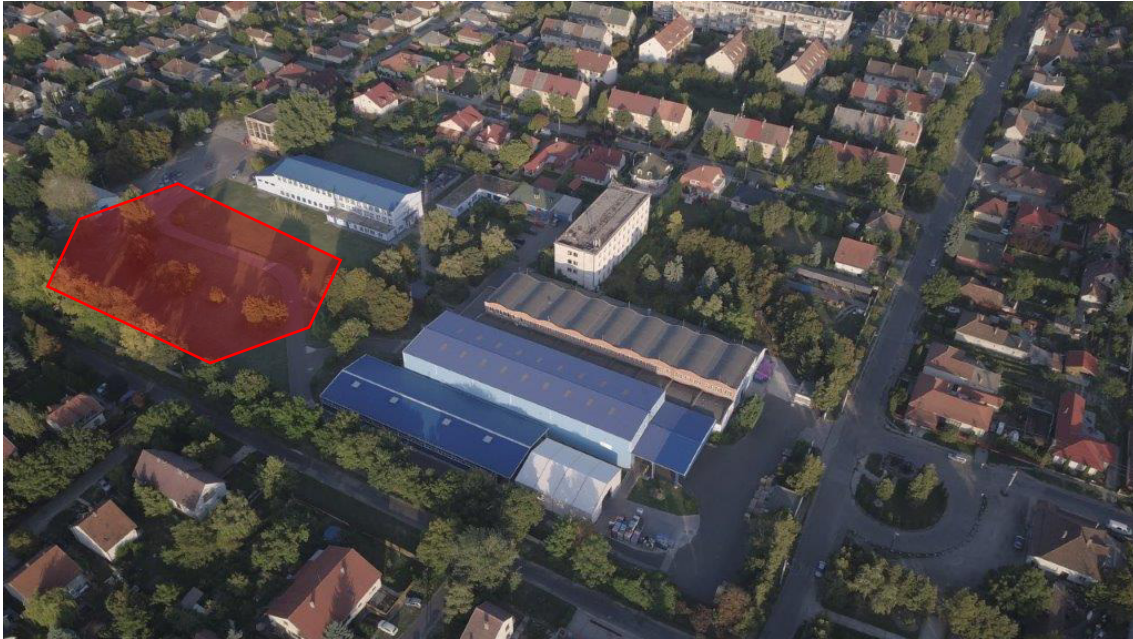
A napelemes rendszereket alapvetően három különböző típusba tudjuk sorolni. Elsődlegesen azok hálózatra történő visszatáplálásuk jellege alapján különböztetjük meg őket [2]. Az első, az alapvetően mindenki számára ismert hálózatra visszatápláló napelemes rendszer, melynek lényege, hogy a megtermelt többletenergiát a hálózatra közvetlenül betáplálva a környező felhasználók tudják elhasználni. Jelenleg ez a leginkább elterjedt rendszertípus a háztartási méretű kiserőművek tekintetében. A szigetüzemű napelemes rendszer abban különbözik az előzőtől, hogy nincs közvetlen kapcsolat a hálózat és a napelemes rendszer között. A megtermelt energiát csak helyben és azonnal tudjuk felhasználni, vagy akkumulátorok segítségével el tudjuk tárolni későbbre. Meg kell jegyezni, hogy a 413/2022. (X. 26.) rendelet értelmében 2022.11.01-től Magyarországon csak ilyen rendszer telepítése lehetséges a hálózati leterheltség és a fejlesztési hiányok miatt. Ezen két típus kombinációjából jön létre a hibrid napelemes rendszer, melynél lehetőségünk van a többletenergiát visszatáplálni a hálózatra, de saját magunk részére is tudunk tárolni akkumulátorok segítségével. Jelenleg hazánkban ilyen rendszer engedélyeztetésére nincs lehetőség.

A napelemes rendszerek működéséhez nagy felületekre (a felületeken elhelyezett napelemekre) van szükségünk. Telepítés szempontjából két fő típust különböztetünk meg. A háztartási méretű kiserőműveket jellemzően a családi házak, épületek tetőszerkezetére, míg a nagyobb méretű (Magyarországon 50 kW felett) napelemes erőműveket inkább kihasználatlan ipari területek, vagy földművelésre, egyéb építkezésre a talaj adottságai miatt nem alkalmas területen létesítik. Természetesen nem zárható ki, hogy egy háztartási méretű kiserőművet a földre telepítsünk, vagy egy nagyméretű erőművet akár egy ipari létesítmény (raktár épület) tetején helyezünk el. Mindkét elhelyezési módnak megvannak a saját adottságai, előnyei és hátrányai is.

3.1. FÖLDRE TELEPÍTETT NAPELEMES RENDSZER

Leginkább a nagyobb méretű napelemparkok esetében jellemző, hogy más hasznosításra alkalmatlan területeken a földre telepítik a napelemeket. A földre telepített napelemes rendszereket úgy kell kialakítani, hogy semmilyen árnyékhatás ne érje. A legtöbb esetben a földre telepített napelemeknél több szabadsági fokkal rendelkezünk egy tetőre telepített rendszerhez képest. A napelemek irányát, dőlésszögét, mi határozhatjuk meg, a számunkra legkedvezőbb helyzet szerint, ellenben bonyolultabb tartószerkezetet és talajmunkát igényel a tetőre telepített változattal szemben. Hazánkban a lakosság körében kevésbé elterjed ez a változat, ám ha a tető héjazata, fekvése, vagy egyéb okok miatt nem kivitelezhető a tetőre telepített változat, nem ritka, hogy kisebb rendszereket (4-8 kW) is a földre telepítenek.

A CEE Kft.-nél rengeteg zöld, kihasználatlan terület áll rendelkezésre, így fontolóra vettük azt a lehetőséget is, hogy kihasználva ezen területet ide telepítünk napelemparkot. A 2. ábrán pirossal jelölve látható az erőmű potenciális helye. Ideálisan két terület jöhet szóba. Az úgynevezett C épület délkeleti oldalán elterülő 1.500 m² terület, vagy az épület másik oldalán húzódó (úttól távolabbi) közel 3.800 m²-nyi terület. A későbbiek során a nagyobb, 3800 m²-es területet fogjuk alapul venni, mert ez több szabadsági fokkal rendelkezik, több lehetőség van a megfelelő tájolás kialakítására, továbbá ideálisabb a fekvése (távolabb helyezkednek el innen az épületek). Ezen a területen viszont elkerülhetetlen környezeti rombolás nélkül kivitelezni a telepítést. A terület közepén elhelyezkedő fákat mindenképp ki kell vágni, illetve ezek hatására tereprendezést kell végezni, amely a beruházási költséget nyilvánvalóan növelni fogja.



2. ábra: Földre telepített napelemes erőmű potenciális helye a CEE Kft.-nél [1].

Mindenképp előny, hogy a tetőre telepített rendszerekkel ellentétben, a mindenkori viszonyoknak megfelelő dőlésszöget és tájolási irányt tudunk kivitelezni, amivel maximalizálni tudjuk a hozamot. A rendszer telepítése és kivitelezése egyszerűbb feladat, mint egy magasban (tetőn) végzett munka. A tartószerkezet élettartamát nem befolyásolja pl. egy előregedett tetőszerkezet. Tűzvédelem szempontjából is sokkal kedvezőbb feltételeket tudunk teremteni, így akár nagyobb rendszereket is tervezhetünk.

A földre telepített rendszerek karbantartását és egy esetleges hiba feltárását is egyszerűbbé, elérhetőbbé teszi az elhelyezésük. Sokkal egyszerűbben és gyorsabban ellenőrizhetőek a panelek (mindkét oldaluk) az esetleges sérülések, repedések, amik negatívan tudják befolyásolni a termelést és nem utolsó sorban kockázati tényezőt is jelentenek. Bár több tanulmány is kimutatta, a napelemeket javarészt (Magyarországon) nem kell tisztítani, de a hazánkban is előforduló afrikai homokot tartalmazó esők, nagyobb állati ürülékek jelenthetnek kockázatot a napelemeknél (hot-spot), így a tisztántartás szempontjából is előny a könnyebb elérhetőség.

Azonban vannak hátrányai is egy földre szerelt napelemes rendszernek. Először is zöld területeket veszünk el a környezetünktől, nem biztos, hogy tudjuk csökkenteni az ökológiai lábnyomunkat. A tetőre telepített rendszerekkel ellentétben drágább tartószerkezetre van szükség, megfelelő alapozással és tervezéssel, hogy a napelempanel ne árnyékolják egymást. Az idő múlásával gondoskodni kell a napelempark környezetének rendben tartásáról is, ami extra munkaerőt igényel, így tovább növeli a beruházási és fenntartási költségeket. Ha túl magasra nő az

erőművet környező növényzet az teljesítménycsökkenést, árnyékhatast idézhet elő. Fontos az is, hogy megfelelő védelmet alakítsunk ki a napelemes rendszerünk körül, meggátolva az illetéktelen hozzáférést és esetleges személyi sérüléssel járó balesetet. Ezek mind többletköltséget jelentenek a kivitelezéskor és a rendszer fenntartásánál is.

3.2. TETŐRE TELEPÍTETT NAPELEMES RENDSZER

A tetőre telepített napelemekkel legtöbb esetben a lakossági felhasználásban találkozhatunk. A tetőfelületek rendelkezésre állnak és jellemzően kihasználatlanok, így adott a lehetőség ezek hasznosítására is. Ezen napelemes rendszerek esetében körültekintőbb tervezésre van szükségünk, mivel legtöbb esetben (kivételek a lapos tetők) a tető dőlésszöge, tájolása adott és nem változtatható. Sőt, legtöbb esetben nem is kivitelezhető egyetlen tájolású tetőfelülettel a megfelelő teljesítményű napelemes rendszer felépítése. További nehézségeket jelenthet a tetőfelület állapota, héjazata és az árnyékhatast befolyásoló tényezők például kémények, környező fák, vagy a szomszédos tetőfelület.

A CEE Kft.-nél rengeteg kihasználatlan szabad tetőfelület áll rendelkezésre, hogy napelemet helyezünk el rajta. Az épületek tetőfelületeinek tájolása délkeleti és északnyugati, kivéve egy minimális lapostető részt, melynél a napelemek dőlésszöge és iránya az egyéni tartószerkezet és az árnyékhatastok függvénye. Az épületek tetőszerkezetei lemezborítással vannak ellátva, ezt figyelembe kell venni a kivitelezésnél és ajánlatkérésnél is. Az árnyékhatastokat és hasznos területeket figyelembevéve körülbelül 2.400 m² áll rendelkezésre, hogy megvalósítsuk a napelemes erőművet (3. ábra). 2022-ben a termelésünk az év nagy részében maximális kapacitással tudott működni (90%-os gépkivitelezés), így nagyon jó alapot szolgáltatott a napelemes rendszer tervezésénél. Nagyságrendileg 2.500.000 kWh volt az éves energiafelhasználásunk, ami átlagosan 208.000 kWh/hónapot jelent. Természetesen tisztában vagyunk azzal, hogy ekkora nagyságú energiafogyasztás teljes kiváltása a telepíthető méretű napelemes rendszerrel nem lehetséges, így csak a költségcsökkentés a cél.



3. ábra: A CEE Kft. üzemének hasznos tetőfelülete [1].

A tetőre telepített napelemek első és talán legfontosabb előnye, hogy viszonylag olcsó tartószerkezetet (tartósíneket) kell csak felszerelni, amire ezután egyszerűen telepíthető a napelem. A tetőfelület nagysága, valamint a dőlésszöge az ingatlan adottsága, de jellemzően nem jelent gondot a tetőfelület napelem panelekkel történő teljes lefedettsége sem. A tetőre telepített

napelemekkel nem szükséges plusz területeket elvonnunk a zöld területből, mert egy eddig kihasználatlan területet tudunk hasznosítani.

A tetőre telepített napelemes rendszernek több hátránya is van. Telepítés előtt fel kell mérni a tető állapotát. A most piacon lévő napelem panelek átlagos élettartama 20-25 év, így érdemes úgy kalkulálni, hogy ezen idő alatt ne kelljen esetlegesen a tetőt felújítani, mert ekkor a napelemes rendszert le kell szerelni és ismételten visszaépíteni, ami nem kevés pluszköltséget jelenthet. Egyes tetőborítások esetén egyáltalán nem javasolt a tetőre telepítés. Palával borított tető esetén elsősorban a megfelelő tető és héjszerkezetről érdemes gondoskodni és csak ezután telepíteni a rendszert. A tetőre telepített rendszereknél fontos felmérni, az esetleges nyílásokat, antennákat, kéményeket és ezek árnyékhatását, mert jelentősen befolyásolhatják a telepítés menetét és a várható hozamot. Ha a tető dőlésszöge nem ideális, de törekedni akarunk a maximális teljesítményre, akkor külön tartószerkezet, vagy dőlésszög módosító szerkezetet kell építeni a tetőre, ami jellemzően drága és statikailag nem is biztos, hogy elbírja a jelenlegi tetőszerkezet. Lapostető esetén ez nem jelent problémát, viszont ebben az esetben mindig figyelembe kell venni, hogy a panelek és így az egész tető is nagyobb szélterhelésnek vannak kitéve, továbbá az egyszerű napelemes sínekre telepített rendszerekkel szemben az ilyen plusz szerkezetek többletsúlyt is jelentenek a tetőszerkezet számára. Ezt a többlet terhet nem minden esetben bírja el a tető, így esetlegesen sokkal kevesebb napelemet tudunk felszerelni, vagy teljesen le kell mondanunk az ideális tájolásról és dőlésszögről.

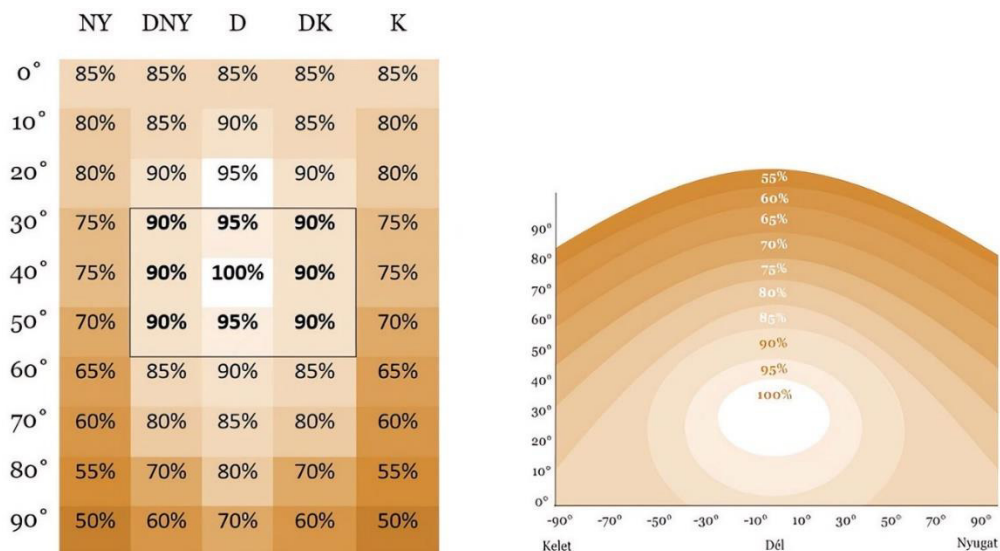
A tetőre szerelt napelemek esetében nem feledkezhetünk meg a tűzveszélyről sem. Általánosságban elmondható, hogy a napelemes rendszerek biztonságosak és nem jelentenek veszélyt ingatlanjainkra. De, mint minden rendszerben, itt is keletkezhetnek hibák, amik végzetesek lehetnek a rendszerünkre és annak környezetére. Ezért kiemelt figyelemmel, minden biztonsági intézkedést, követelményt betartva kell a rendszert telepíteni.

4. A TERVEZETT NAPELEMES ERŐMŰVEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Ahogy láthattuk a cégnél tetőre, vagy földre telepített napelemes erőmű kivitelezésére is van lehetőség. Mivel általában egy vállalkozás életében a pénzügyek döntenek, így meg kell vizsgálni melyik kivitelezési mód lenne gazdaságosabb. Az összehasonlítást a várható villamosenergia-termelés, a beruházási, kivitelezési, működési költségek és megtérülési idő alapján végezzük el.

4.1. VÁRHATÓ HOZAM SZERINTI ÖSSZEHASONLÍTÁS

A költségek mellett talán a legfontosabb összehasonlítási alap a várható hozam. Mivel Magyarország az északi féltekén helyezkedik el, ezért az ideális tájolás déli és 30-50° közé tehető. A földre telepített napelem esetében ez minden további gond nélkül elérhető, hisz mi határozzuk meg, a napelemek tájolását és dőlésszögét. A tetőre telepített rendszer esetében ez sokkal kötöttebb feladat. A tető tájolása és dőlésszöge adott, ezen módosítani csak olyan értékű beruházással lehet, ami valószínűleg értelmetlenné teszi a kivitelezést. A tájolás és a tető dőlésszögének hatását a teljesítményre a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra: A tájolás és a tető dőlésszögének hatása a teljesítményre [3].

A tetőre telepített rendszer esetében egy dőlésszöggel és két iránnyal tudunk számolni. A tetőfelületek elhelyezkedése DNY és DK tájolásúak, a dőlésszögek pedig mindkét esetben 20°-osak. A két tetőfelületen megosztva 50-50%-ban tudjuk elhelyezni a kívánt napelemeket. 1 kW rendszer ideális tájolás és dőlésszög esetén 1.050-1.150 kWh villamosenergia-termelésre képes. Az adatokból is látható, hogy az üzem teljes villamosenergia-szükségletét nem fogjuk tudni kiváltani pusztán napelemes rendszerrel, azonban csökkenteni tudjuk az éves energiaköltségét. Az éves átlagos szükséglet 10%-át szeretnénk első lépésként ebből fedezni. A rendelkezésre álló hasznos tetőfelület 50%-át 1.200 m²-t használnánk ki, ami 200 kWp teljesítmény telepítését teszi lehetővé és ugyanakkora földre telepített rendszer is biztonságosan elfér a telephelyen.

A 200 kW névleges teljesítményű tetőre telepített napelemes erőmű energiatermelése 1.100 kWh-s középértékkel számolva a 4. ábrán látható tájolás és dőlésszög kompenzáció miatti 0,9-es szorzó figyelembevételével a következőképpen alakul

$$200 \text{ kWp} \cdot 1.100 \text{ kWh} \cdot 0,9 = 198.000 \text{ kWh.} \quad (1.)$$

A földre telepített rendszer esetében ideális tájolással és ideális dőlésszöggel tudunk számolni, így 1150 kWh/kWp villamosenergia-termelést figyelembe véve a rendszer várható villamosenergia-termelése

$$200 \text{ kWp} \cdot 1.150 \text{ kWh} \cdot 1 = 230.000 \text{ kWh.} \quad (2.)$$

Látszik tehát, hogy a két rendszer között az első évben már közel 14%-os termelési különbség adódik a földre telepített napelemes erőmű javára. Így a fenti adatok ismeretében a villamosenergia-termelés alapján a földre telepített napelemes rendszer az ideálisabb.

4.2. BERUHÁZÁSI KÖLTSÉG SZERINTI ÖSSZEHOSONLÍTÁS

Mivel a hasznos tetőfelületünk adott és nem módosítható, így a pontosabb összehasonlítás érdekében a korábban leírtaknak megfelelően egy ugyanakkora teljesítményű, de eltérő telepítésű rendszer beruházási költségeit hasonlítjuk össze. A két rendszer adatait és becsült költségeiket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Földre és tetőre telepített napelemes rendszer adatai és becsült költségei.

| Megnevezés | Tetőre telepített napelemes rendszer költségei (EUR) | Földre telepített napelemes rendszer költségei (EUR) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 493 db panel RISEN SOLAR RSM 144-7-450M 450Wp | 76.321 | 76.321 |
| 2 db inverter Fimer ABB PVS-100-TL | 12.625 | 12.625 |
| Tartószerkezet | 12.482 | 43.082 |
| Talajcsavarok (150 db) | - | 9.828 |
| Talajcsavarok telepítése | - | 7.500 |
| 0,4 kV oldali villamos anyagok (solar kábel, villamos kapcsolók, segédanyagok stb.) | 20.035 | 25.485 |
| KIF kábel nyomvonal kiépítése ásással, helyreállítással | 1.240 (40 fm) | 5.545 (300 fm) |
| Műszaki tervezés | 6.570 | 6.570 |
| Üzembe helyezés | ingyenes | 1.181 |
| Deponálási és logisztikai területek kialakítása, szerelési területek munkavédelmi előírások szerinti kialakítása | 1.266 | 2.400 |
| Felelős műszaki vezető díja | 2.606 € | 3.000 |
| Talajmechanikai vizsgálat | - | 2.450 |
| Tereprendezési költség (fakivágás) | - | 3.478 |
| Összesen | 133.145 | 199.465 |

Mindkét rendszer esetében 493 db 450 Wp teljesítményű panellel (90%-os hatásfokot feltételezve), valamint 2 db inverterrel kalkuláltunk. Látható, hogy jelentős különbségek vannak a két rendszer beruházási költsége között. A földre telepített rendszer esetében a tartószerkezet ára közel ötszöröse, mint a tetőre telepítetté. Több tartószerkezeti elem szükséges, amelyeket készen meg lehet megvásárolni, de jelentősen növeli a beruházási költségeket. Jellemzően egy tartószerkezet 20 db panelt tud fogadni, így nekünk 25 ilyen szerkezetre van szükségünk. A tartószerkezetet a talajhoz talajcsavarokkal tudjuk rögzíteni (ez gyorsabb és olcsóbb, mint a betonozás). Ezek teherbírása 2,6 tonna/talajcsavar. Egy tartószerkezet rögzítéséhez 6 db talajcsavarra van szükség, így kellően stabil és ellenálló lesz a szerkezet. A 25 db tartószerkezethez 150 db talajcsavarra van szükség. A talajcsavarok telepítéséhez speciális gép és emberigény szükséges, így ez is többletköltséget jelent és nem érdemes megfelekedezni az előzetes talajmechanikai vizsgálatokról sem. Nem megfelelő talaj esetében további költségeket jelenthet annak megerősítése is. A megfelelő esztétika kialakításához és az ideális dőlésszög eléréséhez, továbbá az árnyékhatások kiküszöbölése érdekében minimális talajrendezésre, favágásra is szükség van. Ezek mind egyszeri többletköltséget jelentenek a telepítés során.

Mindkét rendszer esetében szükséges a KIF kábel nyomvonalának kialakítása, ami tovább növeli a rendszerünk kiépítésének költségeit. A tetőre telepített rendszer esetében 40, míg a földre telepített rendszer esetében 300 m nyomvonal kiásásával és a kábel költségeivel kell számolnunk. Látható tehát, hogy a tetőre telepített rendszer ebből a szempontból sokkal kedvezőbb, kevesebb földmunkával jár.

A feladat nagysága miatt számolnunk kell azzal, hogy akár két-három hétre is elhúzódik a munkafolyamat és az időjárási viszontagságok tovább növelhetik ezt az időt. Ezért gondoskodnunk kell arról, hogy a szereléshez szükséges anyagok (elsősorban napelem panelek) megfelelő

tárolási területen legyenek elhelyezve. Ezt a helyet úgy kell kialakítani, hogy illetéktelen személyek ne férjenek hozzá, ne tudjanak esetlegesen kárt okozni benne, de a termelési folyamatot se zavarják meg. Fontos a szállítás is, minden időben és megfelelő minőségben érkezzen meg és ezek deponálása is megfelelő eszközökkel és módon történjen meg. A szerelési területet a szerelést végző szakemberek számára át kell adni és tájékoztatni kell őket az előírt munkavédelmi előírásokról is. Mindkét telepítési mód esetében költségként meg jelenik tehát a deponálási és logisztikai területek kialakítása, a szerelési területek érvényes munkavédelmi előírások szerinti kialakítása.

A paneleken és invertereken kívül rengeteg „apróság” is terheli az így is magas költségünket. Ilyenek a 0,4 kV oldali villamos anyagok. Ebbe beletartoznak a magas UV álló solar kábelek, villamos védelmi eszközök, AC és DC oldali gyűjtő és elosztószekrények, kábelcsatornák és egyéb villanszerelési segédanyagok. A folyamatok megfelelő koordinálásáért, kialakításáért és a tervezés minősége érdekében érdemes (szükséges) egy felelős műszaki vezetőt is megbízni, aki kézben tartja az egész projektet az ajánlatadáستól az üzembevételig.

4.3. MŰKÖDÉSI KÖLTSÉG SZERINTI ÖSSZEHOSONLÍTÁS

A könnyebb összehasonlíthatóság érdekében a 2. táblázat foglalja össze milyen költségelemek léphetnek fel a két rendszer fenntartása esetében.

2. táblázat: Földre és tetőre telepített napelemes rendszer működési költségeinek elemei.

| Költségelem megnevezése | Tetőre telepített napelemes rendszer | Földre telepített napelemes rendszer |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Tartószerkezet | Egyszerűbb, olcsóbb tartószerkezet | Extra tartószerkezet a megfelelő dőlésszög miatt |
| Rögzítés | Egyszerűbb, olcsóbb rögzítés | Talajcsavarok |
| Környezet gondozása | Nem szükséges | Környezeti rendfenntartás (fünyírás) |
| Tisztítás | Napelem tisztítása | Napelem tisztítása |
| Karbantartás | Drágább karbantartás, ellenőrzés | Olcsóbb karbantartás, ellenőrzés |
| Védelem | Nem hozzáférhető, így nincs szükség egyéb védelemre | Védeni kell az illetéktelen behatolás ellen: kerítés és kamera rendszer |

Látható tehát, hogy mindkét napelemes rendszer fenntartásának vannak költségei, de a földre telepített napelemes rendszernek magasabb, mert több tételt kell számításba venni. A földre telepített napelemek esetében számolni kell a rendszeres fünyírásról, a megfelelő védelemről és annak karbantartásáról. A területet állatok, emberek stb. ellen kerítéssel, illetve kamera rendszerrel védeni kell, aminek szintén vannak fenntartási és üzemeltetési költségei.

Ezekkel szemben a tetőre telepített napelemek esetében csak egy nagyobb költséggel kell számolni a karbantartás nehézsége miatt. A magasban végzett munka mindig veszélyes és így drágább. Az esetleges sérüléseket, meghibásodásokat nehezebben tudjuk észrevenni, vagy csak költséges eszközök segítségével (hőkamerás drón). A földre telepített napelemeknél ez akár egyszeri szemrevételezéssel is megtehető, akár heti rendszerességgel.

4.4. MEGTÉRÜLÉSI IDŐ SZERINTI ÖSSZEHASONLÍTÁS

A megtérülési idő számításához több adatra is szükségünk van a rendszerek kivitelezési költségén kívül. Mivel a két rendszer vállalati telepítésként (tehát nem magánember) történne meg, így tisztában kell lennünk azzal, hogy a villamos energiaárak folyamatos változásban vannak, nem annyira kiszámítható, mint a lakossági energiafelhasználás árszabása. Vállalatunk jellemzően 3 havi részletekben vásárolja meg és köti le előre a villamosenergia-szükségletét, ám jelen energiaválságos helyzetben inkább hosszútávon (1 év) próbáljuk meg megvásárolni és így kiszámíthatóvá tenni a költségeinket. Jelenleg a szerződés szerint 114 Ft/kWh áron vásároljuk a szolgáltatótól a villamos energiát.

A két rendszert az egyszerűsített megtérülési idő számítása alapján fogjuk összevetni [4, 5]. A 200 kWp-es tetőre telepített napelemes rendszer egyszerűsített megtérülési ideje az alábbiak szerint alakul.

- Éves várható termelés: 198.000 kWh
- Villamos energia ára: 114 Ft/kWh
- Beruházási költség: 133.145 EUR, 53.258.000 Ft (400 Ft-os árfolyamon számolva)
- 1 kWp-re vonatkoztatott ár: $\frac{53.258.000}{200} = 266.290 \text{ Ft}$
- 1 kWp-re vonatkoztatott éves termelés: $\frac{198.000}{200} = 990 \text{ kWh/év}$
- Megtérülési idő: $\frac{266.290}{990 \cdot 114} = 2,36 \text{ év}$

A földre kivitelezett 200 kWp-es napelemes rendszer megtérülési idejének számítása egyszerűsített megtérülési idő esetén az alábbi módon néz ki.

- Éves várható termelés: 230.000 kWh
- Villamos energia ára: 114 Ft/kWh
- Beruházási költség: 199.465 EUR, 79.786.000 Ft (400 Ft-os árfolyamon számolva)
- 1 kWp-re vonatkoztatott ár: $\frac{79.786.000}{200} = 398.930 \text{ Ft}$
- 1 kWp-re vonatkoztatott éves termelés: $\frac{230.000}{200} = 1150 \text{ kWh/év}$
- Megtérülési idő: $\frac{398.930}{1.150 \cdot 114} = 3,04 \text{ év}$

A számítás szerint tehát a tetőre szerelt rendszerünk 2,36 év után már hasznot termel, míg a földre telepített rendszerünk a magasabb bekerülési költség miatt, csak 3,04 év után térül meg. Nem szabad elfelejteni, hogy ez a számítás számos változót nem vesz figyelembe, így nem teljesen pontos képet kapunk. Fontos megjegyezni, hogy a villamos energia árának változásával ez az időtartam nőhet és csökkenthet is, továbbá nem számoltunk az esetleges megbásodásokkal, karbantartással stb.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Napjaink egyik legsokoldalúbban felhasználható energiaforrása a napenergia. Nem csak a háztartási méretű kis erőművek, hanem a nagyobb cégek, vállalkozások számára is jelentős költségcsökkentést lehet elérni egy-egy jól megválasztott és kivitelezett erőművel. A Cascade Engineering Europe Kft. számára tervezett 200 kWp méretű napelemes erőmű a tetőre és a földre telepített változatban is relatív gyorsan megtérül.

Láthattuk, hogy a tetőre telepített rendszerünk 2,36 év, míg a földre telepített 3,04 év alatt térül meg és azután már tiszta profitot termel. A villamos energia árak drasztikus változása (növekedése) esetén ez a megtérülési idő csökkenhet, illetve a megtérülés után az erőmű nagyobb hasznot is hozhat a cég számára. Természetesen a megtérülési idő növekedhet is, ha a

villamos energia ára esetleg csökken. Az olcsóbb fenntartási költségek és a gyorsabb megtérülési idő miatt pénzügyi szempont szerint első lépésben ésszerűbb a tetőre telepített napelemes rendszert választani. Ezzel megmaradna a cég nagy zöld területe és szinte maximálisan ki tudja használni az üzem tetőfelületét. Azonban a tetőre telepített napelemes erőmű nem zárja ki, hogy a későbbiekben akár a földre telepített verzió is megvalósulhasson. Az üzemek energiafelhasználásának növekedése a jövőben indokoltá teheti a tetőre telepített napelemes rendszer bővítését, ami jelen esetben a földre telepített napelemekkel lehetséges a legegyszerűbben.

Összességében ezek a rendszerek kis teljesítményűek a cég teljes energiafelhasználásának kiváltására, de érdemben tudják csökkenteni az energiavásárlásából eredő költségeket és zölddebbé tudják tenni az energiafelhasználást, ezáltal a termékeket is, amivel olcsóbbá és környezetkímélőbbé tehető a műanyagipar. Továbbá és nem utolsósorban a cég versenyképességének növeléséhez hozzájárul az is, hogy nagy figyelmet fordít az energiaszükségletének környezetkímélőbb ellátására.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A Cascade Engineering Europe Kft. tulajdona
- [2] MÉSZÁROS, L., SCHOTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek*. Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- [3] https://gershojenergia.com/wp-content/uploads/2021/07/a_tajolas_es_a_teto_dolesszogenek_hatasasa_a_teljesitmenyre.jpg (letöltés dátuma: 2023. március 24.)
- [4] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., SZALÁNCZI, D.: *Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, pp. 119-135. 2022.
- [5] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J.: *Szigetüzemű háztartási méretű kiserőmű (HMKE) megtérülési idejének elemzése*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 18. évfolyam, különszám, pp. 445-465. 2023.

VILLAMOS FOGYASZTÓK ANALÍZISE

ANALYSIS OF ELECTRICAL CONSUMERS

KOVÁCS Attila¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹PhD hallgató, attila.kovacs@zf.com

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel: +36 30 768-4499

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: Manapság az ipari létesítményekben a villamos energia minősége az egyik legfontosabb gazdasági tényező, hiszen a termelés biztonsága, az automatizált rendszerek üzembiztos működése a megfelelő minőségű, lehetőleg káros hatásoktól és szolgáltatási szünetektől mentes villamos energia függvénye. A szükséges intézkedések kidolgozásához az első lépés az aktuális minőségi mutatók meghatározása, valamint a villamos hálózat elemzése, mind szolgáltatói, mind felhasználói oldalról. Ipari létesítményekben a villamos energia összetevői és hullámformái is széles határok között változhatnak, hiszen számtalan nem lineáris tulajdonságú elektronikai eszközt alkalmaznak. A hálózat induktív jellege is megváltozott, hiszen az induktív terhelések (motorok, fűtőszálak, tekercsek) már nem képesek kompenzálni a kapacitív terheléseket és sok esetben inkább kapacitív jellegű lesz a hálózat, emiatt a hagyományos fázisjavító berendezések már nem hatásosak. A kapacitív meddőenergia felhasználást az induktívval ellentétben, 100%-ban ki kell fizetni az áramszolgáltatónak, aminek további költségei vannak. Ezért kiemelten fontos feladat a lehető legrészletesebb villamos hálózat analízis elkészítése. A cikkben villamos energia minőség szempontból egy termelő üzemben végzett gyakorlati hálózat analízisek kerülnek bemutatásra.

Kulcsszavak: villamos tranziensek, harmonikus torzítás, villamos hálózati zavarok, feszültség letörések, torlófőtő fázisjavítás, Teljes Harmonikus Torzítás (THD)

Abstract: Nowadays, the quality of electricity is one of the most important economic factors in industrial installations, as the safety of production and the reliable operation of automated systems depend on electricity of the right quality, preferably free of harmful effects and service interruptions. The first step in developing the necessary measures is to identify the current quality indicators, as well as the analysis of the electricity network, from both the supplier and the user side. In industrial installations, the components and waveforms of electricity can vary over a wide range, as many electronic devices with non-linear characteristics are used. The inductive nature of the network has also changed, as inductive loads (motors, heating filaments, coils) are no longer able to compensate for capacitive loads and in many cases the network becomes more capacitive, making traditional phase correction devices ineffective. The use of capacitive reactive energy, in contrast to inductive, must be 100% paid for the electricity supplier, which has additional costs. Therefore, it is essential to perform the most detailed possible electrical network analysis. In this paper, practical network analyses performed in a production plant from the point of view of electricity quality are presented.

Keywords: electrical transient, harmonic distortion, electrical network disturbances, voltage dropouts, choke phase correction, Total Harmonics Distortion (THD)

1. BEVEZETÉS

Ipari létesítményekben - a modern és a hagyományos gyárakban egyaránt - a belső villamos hálózatokon a folyamatos ellátás biztosításán kívül a villamosenergia minősége is kulcsfontosságú. Az áramszolgáltató felé pénzügyi elszámolási kötelezettség alá esik a felhasznált meddőenergia mennyisége, mind kapacitív, mint induktív meddőenergia terén. Az induktív meddő teljesítmény esetén az áram meddő összetevője 90°-ot késik a feszültséghez képest, kapacitív esetén pedig 90°-ot siet. A hálózatról felvehető maximális ilyen jellegű energia mennyiségek

korlátozva vannak, ennek megszegése esetén a szolgáltató leválaszthatja a fogyasztót hálózatról. Ezért a termelőüzemeknek, különösen a magas induktív meddőenergia felhasználásúaknak (indukciós hevítő berendezések, elektromos motorok, transzformátorok, tekercseléseket tartalmazó berendezések) indokolt a kompenzáló berendezések telepítése. Az erősáramú technika megjelenésétől kezdve az ohmos-induktív terhelések mindenhol jelen vannak. Itt hangsúlyozni kell, hogy a hagyományos meddőenergia kompenzálása csak az alapharmonikuson (50 Hz) történik. Azokban a gyárakban, ahol modern szerelősorok vannak, hajtás szabályozásokkal, LED-es csarnok világításokkal, logikai vezérlőkkel, számítógépekkel, a használatban lévő kevés számú tisztán induktív meddőenergia igényű villamos gépek már nem képesek kompenzálni a kapacitív meddő fogyasztást, így túlkompensálás jöhet létre. A villamosenergia-hálózatok változásai és a teljesítményelektronikai alapú eszközök fogyasztói terhelésként való megnövekedett használata miatt a közüzemi villamos hálózatokban a kapacitív (fordított) meddőteljesítmény-áramlás problémájával is szembesültek. A mérési adatok egyértelműen megmutatják a villamos hálózatokban előforduló kapacitív meddő teljesítmény áramlását [1]. Ezen túlmenően a történelmi adatok azt mutatják, hogy az évek során az átviteli rendszerből az elosztórendszerbe importált meddőenergia csökkenése tapasztalható. Kapacitív meddő energia fogyasztók a számítástechnikai berendezések, a LED világítások, a magasfeszültségű vezetékek, a szinkron motorok, a kondenzátor telepek. A megnövekedett kapacitív meddőnek van egy másik veszélye is, megnöveli a transzformátorok szekunder, így a belső hálózat feszültségét is. Ezek a túlfeszültségek veszélyesek, ezért kerülendők.

A harmonikusok megjelenésével az induktív meddő kompenzálását végző kondenzátor telepeknek új veszélyforrásaik jelentek meg, a kondenzátorok árammal való túlterhelése, valamint a kapacitások és a (villamos) környezetükben lévő induktivitások párhuzamos rezonanciája [2]. A harmonikusok terjedésével kapcsolatban sokszor tényként kezelik azt, hogy egy transzformátor szekunder oldaláról a primerre nem tud áterjedni, hiszen a transzformátor egy természetes alul áteresztő szűrő. Viszont sokan nem tudják, hogy sajnos a száraz transzformátoroknál, a harmadik (150 Hz) harmonikus esetében lehetséges a harmonikus szekunder oldalról a primer oldalra történő átvitele a transzformátor köpenyén keresztül (annak felületén). A fentiekben leírtakat szem előtt tartva vált szükségessé a meddő kompenzálást végző fázisjavítók harmonikusok szempontjából történő ellenőrzése.

2. HÁLÓZAT ANALÍZIS

A mérés során fontos szempont volt, hogy a lehetséges nagy harmonikus torzításokat okozó fogyasztókon kívül a villamos hálózatot is megvizsgáljuk a berendezések, eszközök lekapcsolt és bekapcsolt állapotában is, így pontos képet kapunk az egyes berendezéseknek a villamos energia minőségére gyakorolt konkrét hatásáról. A mérést a HT PQA824 típusú hálózat analízátorral végeztük [3]. Az analízátor főbb jellemzői: regisztrálás MIN/MAX/AVG, feszültség anomáliák észlelése, felharmonikus analízis, patch elemzés, villogás analízis, nagysebességű feszültség tranziensek rögzítése 5,5 μ s-tól, bekapcsolási áramok rögzítése. A műszer paraméterezése a magyarországi forgalmazó által készített használati útmutató [4] alapján, míg a rögzített adatok kiolvasása a HT Italia Topview 2.2.2.3 verziójú szoftverével történt [5]. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a mérési eredmények táblázatokban és grafikus formában is megjelenítésre kerülnek.

Az 1. ábra a telepített hálózat analízátort mutatja az egyik erősáramú villamos elosztószekrényben. A mérés során a legfontosabb az élet és vagyónvédelem, ennek érdekében a villamos biztonsági előírások maximális betartása volt. Ahogyan a képen is látszik, az áramváltók és feszültség mérő csatlakozók felhelyezése nagy figyelmet igényelt, ugyanis ezt a mérést feszültség alatt kellett elvégezni, mert a berendezések villamos ellátását nem lehetett a termelés kiesés miatt megszakítani.



1. ábra: Telepített analízátor az egyik mérési ponton.

3. LED CSARNOK VILÁGÍTÁSOK

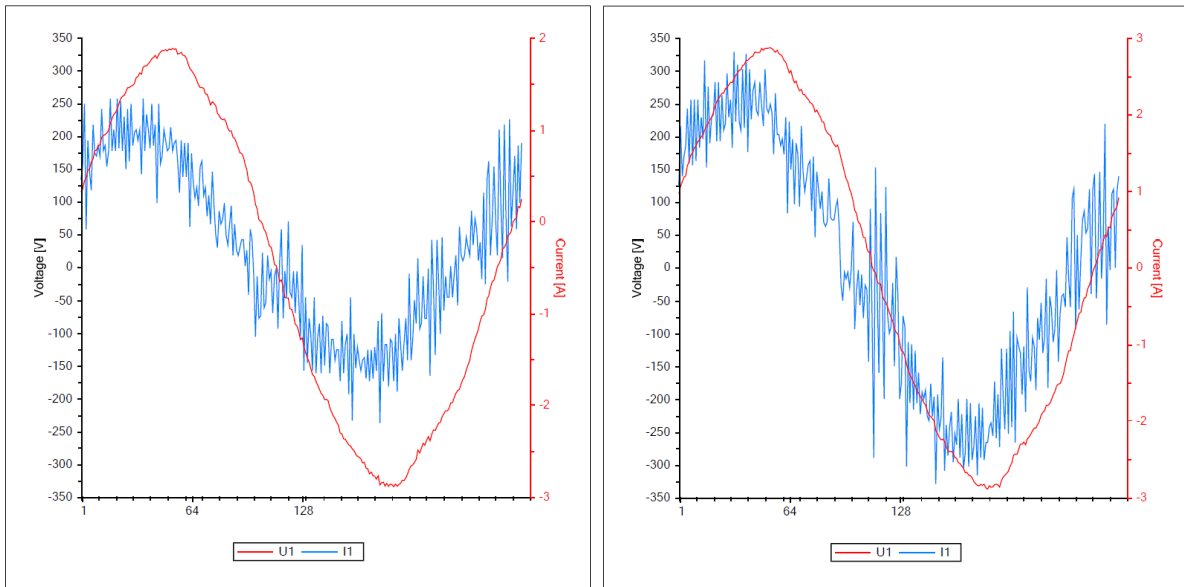
Napjainkban már szinte nincs is olyan ipari létesítmény, ahol nem használnak LED világítást. Sajnos a beruházások során, mivel nagy világítótest teljesítményekről és darabszámokról beszélünk, legtöbb esetben a költség dominál. Sokszor megfélelkeznek a lámpatestek zavar-szűréséről, ugyanis célszerű lenne a LED lámpatesteket beépített harmonikus és meddő energia szűrőkkel megvásárolni [6] [7]. De egyszerűen azért, mert ezek drágábbak, sokszor a szűrő nélkül szerelt változatokat preferálják. A 2. ábrán egy olyan csarnokot láthatunk, ahol 400 darab 140 Wattos villamos teljesítményű lámpatest lett felszerelve, összesen 56 kW maximális hatásos villamosteljesítmény felvétellel. Az ezt követően bemutatjuk a hálózat analízis vizsgálat eredményét egyedi lámpatestek és teljes csarnokvilágítás bekapcsolása eseteiben is.



2. ábra: Egy csarnok LED világítással.

3.1. A LED LÁMPATEST VIZSGÁLATA

A lámpatest Waldmann HIAL 20000/840/W6F 00802593 típusú. A hálózati feszültsége 220-240 VAC 50/60Hz, maximális teljesítmény felvétele 140 W, áramerőssége 1200 mA, üzemi hőmérséklete -30 és +50 °C között van. A túl kicsi áramfelvétel miatti mérési hibák elkerülése miatt a mérés során egy és két darab párhuzamosan kötött lámpatestet vizsgáltunk. A 3. ábrán láthatóak a mérések eredményei, a feszültség és áram hullámformák. Mivel a LED lámpatest nem lineáris terhelésként viselkedik, az áram szinuszos hulláma a felismerhetetlenségig eltorzult egy és két világító egység mérése esetén is.



3. ábra: Torzított áram és feszültség hullámformák 1 és 2 darab LED lámpatest esetén.

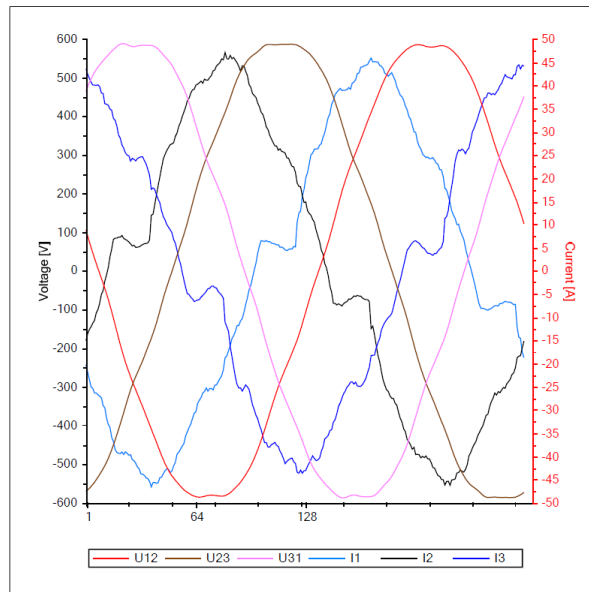
Az 1. táblázatban nyomon követhetjük, hogy mindkét esetben a teljes harmonikus torzítás THD (Total Harmonics Distortion) mértéke elérte, illetve meghaladta a 15%-ot. Ebből sajnos azt a következtetést lehet levonni, hogy ezek a LED lámpatestek nem rendelkeznek beépített szűrőkkel. Csak gondoljunk bele, milyen anomáliákat okozhatna ez az áram hullámforma egy áram nullátmenetre vezérelt kapcsolóüzemi elektronikában. A továbbiakban látni fogjuk, hogy az itt megállapított torzítások milyen visszahatással lesznek a betáplálásukat ellátó villamos hálózatra (ahonnan a tápfeszültséget vételezik).

1. táblázat: Mért adatok 1 és 2 darab LED lámpatest esetén.

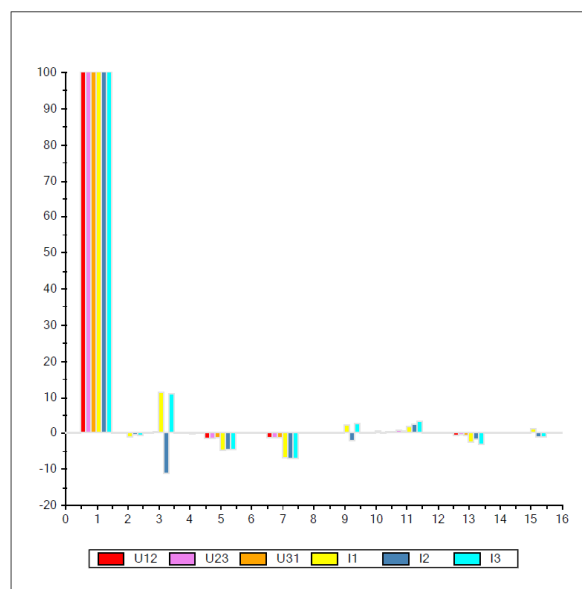
| Fázis 1 | | Fázis 1 | |
|------------------|-----------|------------------|-----------|
| U _{rms} | S[kVA] | U _{rms} | S[kVA] |
| 229,2 | 0,22 | 230,5 | 0,36 |
| UN-PE | P[kW] | UN-PE | P[kW] |
| 0,00 | 0,18 | 0,00 | 0,33 |
| I _{rms} | Pf 1 c | I _{rms} | Pf 1 c |
| 1,0 | 0,80 | 1,6 | 0,90 |
| Thd(I) | Q[kVAR] c | Thd(I) | Q[kVAR] c |
| 15,20 | -0,13 | 14,34 | -0,16 |
| Thd(U) | dPf | Thd(U) | dPf |
| 2,88 | 0,90 | 2,93 | 0,96 |

3.2. CSARNOK LED VILÁGÍTÁS KIKAPCSOLVA

Megvizsgálásra került, hogy amennyiben a csarnok világítást lekapcsoljuk, akkor milyen anomáliákat, hullámforma torzulásokat találunk a hálózaton. A hálózat terhelése egészen minimális volt, csak a segédüzemi berendezések működtek, mert a csarnokban jelenleg nem folyik termelő munka. A 4. ábra feszültség és áram grafikonján látható, hogy az áram hullámforma már az alaphálózaton is kismértékben torzult. Az 5. ábrán a frekvencia amplitúdó spektrumot láthatjuk. Több felharmonikus estében észrevehető alapharmonikusra vonatkoztatott negatív amplitúdót a 180° fázis eltolódás okozza az alapharmonikushoz képest.



4. ábra: Torzított áram és feszültség hullámformák.



5. ábra: Frekvencia amplitúdó spektrum.

A 2. táblázat mutatja a torzulásoknak az egzakt mértékét, azaz már konkrét értékekkel látható az alaphálózaton a villamos energia torzulása, melynek mértéke (THD) eléri a fázisonkénti

15%-ot, amely a szabványban megengedett 3,5%-nak több, mint négyszerese.

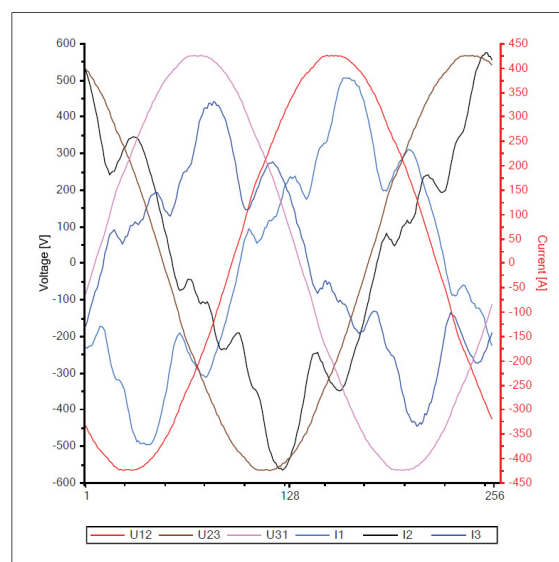
2. táblázat: Mért adatok kikapcsolt LED világítás esetén.

| Fázis 1 | | Fázis 2 | | Fázis 3 | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Urms | S[kVA] | Urms | S[kVA] | Urms | S[kVA] |
| 244,1 | 7,12 | 244,4 | 7,11 | 245,2 | 6,77 |
| U12 | P[kW] | U23 | P[kW] | U13 | P[kW] |
| 422,59 | 6,78 | 424,51 | 6,77 | 424,00 | 6,49 |
| Irms | Pf 1 | Irms | Pf 3 | Irms | Pf 3 |
| 29,0 | 0,95 | 29,1 | 0,95 | 27,5 | 0,96 |
| Thd(I) | Q[kVAR] | Thd(I) | Q[kVAR] | Thd(I) | Q[kVAR] |
| 14,73 | -2,18 | 14,68 | -2,17 | 15,05 | -1,94 |
| Thd(U) | dPf | Thd(U) | dPf | Thd(U) | dPf |
| 2,19 | -0,25 | 2,23 | -0,71 | 2,18 | 0,97 |

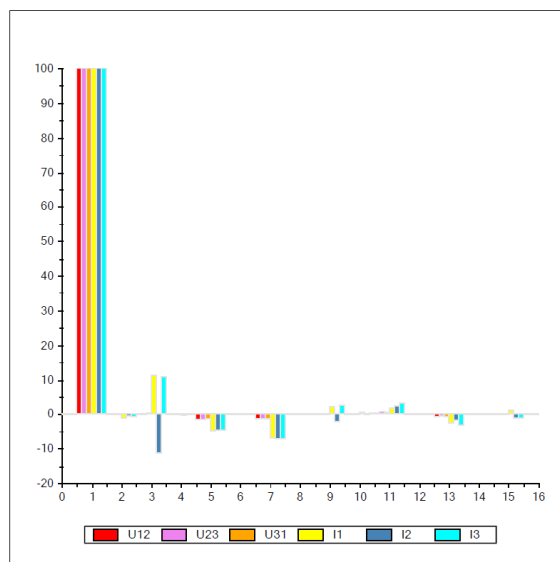
| Teljes | | | | | Frek. |
|------------|-------------|-----------|-------|--------|-------|
| Stot [kVA] | Qtot [kVAR] | Ptot [kW] | Pftot | dPftot | 50,00 |
| 21,01 | -6,29 | 20,04 | 0,95 | 0,00 | |

3.3. LED CSARNOK VILÁGÍTÁS BEKAPCSOLVA

Ahogy korábban említettük, a bekapcsolt LED világításnak a villamos alaphálózatra gyakorolt hatását is megvizsgáltuk. A csarnokban lévő összes világítótestet felkapcsoltuk és így mértük meg a torzításokat, a harmonikusok jelenlétét és nagyságukat. A 6. ábrán látható áram és feszültség hullámformák látszólag hasonlítanak a 4. ábrán lévőkre, de ha figyelmesen megnézzük az áram értékeket, akkor láthatjuk, hogy az eltérés közel tízszeres. A 7. ábrán a jel spektruma is megváltozott az előzőkhez képest, szinte teljesen eltűntek a „negatív” amplitúdók és az 5. és 7. felharmonikus amplitúdója drasztikusan megnövekedett.



6. ábra: Torzított áram és feszültség hullámformák.



7. ábra: Frekvencia amplitúdó spektrum.

Ebben az esetben is táblázatba foglaltuk a mért adatokat. Ha megfigyeljük a 3. táblázatot, észrevehetjük, hogy miután felkapcsoltuk a csarnok LED világítást a belső villamos hálózatunkon a teljes harmonikus torzítás THD értéke 15%-ról közel 50%-ra növekedett.

3. táblázat: Mért adatok felkapcsolt LED világítás esetén.

| Fázis 1 | | Fázis 2 | | Fázis 3 | |
|------------------|-------------|------------------|---------|------------------|---------|
| U _{rms} | S[kVA] | U _{rms} | S[kVA] | U _{rms} | S[kVA] |
| 232,5 | 26,91 | 232,5 | 28,43 | 232,1 | 22,69 |
| U ₁₂ | P[kW] | U ₂₃ | P[kW] | U ₁₃ | P[kW] |
| 402,94 | 21,92 | 402,40 | 24,75 | 402,24 | 17,91 |
| I _{rms} | Pf 1 | I _{rms} | Pf 3 | I _{rms} | Pf 3 |
| 115,8 | 0,81 | 122,4 | 0,87 | 97,8 | 0,79 |
| Thd(I) | Q[kVAR] | Thd(I) | Q[kVAR] | Thd(I) | Q[kVAR] |
| 47,61 | -15,61 | 47,05 | -13,99 | 57,98 | -13,93 |
| Thd(U) | dPf | Thd(U) | dPf | Thd(U) | dPf |
| 1,19 | 0,90 | 1,15 | 0,96 | 1,08 | 0,91 |
| Teljes | | | | | |
| Stot [kVA] | Qtot [kVAR] | Ptot [kW] | Pftot | dPftot | Frek. |
| 77,88 | -43,53 | 64,58 | 0,83 | 0,93 | 49,99 |

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A mérési eredmények elemzése után a következő következtetéseket vonhatjuk le. A nagy-teljesítményű LED lámpatestek harmonikus szűrésével foglalkozni kell, különösen az ipari létesítményekben, mert komoly műszaki problémák következhetnek be a világítótestek által termelt harmonikusok jelenléte miatt [8]. Keresnünk kell a megoldást az általuk kibocsátott, nagy áram szinuszhullám torzítást okozó felharmonikusok utólagos szűrésére. A legjobb megoldás, a beépített szűrővel rendelkező lámpatestek beszerzése lehetne, de sok esetben nem gyártják az adott helyre műszakilag vagy méretben legalkalmasabbakat, vagy azok hatékonysága kétséges. A későbbiek során szűrőkkel gyárilag összeépített LED lámpatesteket is tervezünk tesztelni, hogy azok megfelelnek-e a szabvány előírásainak. A végleges és kielégítő megoldás azonban

egy ipari létesítmény szintjén olyan fázisjavítók beépítése, melyek megfelelő műszaki színvonalú aktív harmonikus szűrő berendezésekkel vannak kiegészítve. Szintén fontos lenne a folyamatos harmonikus monitorozás és riasztási küszöbértékek meghatározása is. Jövőbeli kutatási irányvonalunk lesz még, annak a vizsgálata, hogy milyen konkrét hatással vannak a magas harmonikus torzítások az inverterek, frekvenciaváltók, PLC-k működésére.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] JAVED A.H., NGUYEN P.H., MORREN J., SLOOTWEG HAN J.G., BATTACHARYYA S.: *Issues of capacitive reactive power flow in electricity networks*. IEEE, 2022. ISBN:978-1-6654-5505-3
<https://doi.org/10.1109/UPEC55022.2022.9917704>
- [2] FASSBINDER, S.: *Harmonikusok, Kondenzátorok torzított hálózatokon*. Magyar Részpici Központ, 2004. (letöltés dátuma: 2023. november 24.)
https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/Kondenzatorok_halozaton.pdf
- [3] RAPAS KFT.: *Hálózat analízátorok PQA400-PQA823-824*. Budapest, 2023. (letöltés dátuma: 2023. november 24.)
<https://rapas.hu/analizator/analizator-pdfs/pqa823-824.pdf>
- [4] RAPAS KFT.: *Használati útmutató PQA400-PQA823-824*, Budapest, 2007.
- [5] HT ITALIA: *Management software Topview*. 2012. (letöltés dátuma: 2023. november 24.)
<https://www.ht-instruments.com/en/accessories/topview/>
- [6] VLED.HU: *Mit jelent a THD a LED tápegységeken?* 2019.04.01. (megtekintés dátuma: 2023. november 24.)
<https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-thd-a-led-tapegysegeken>
- [7] UDDIN, S., SHAREEF, H., MOHAMED, A.: *Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps*. Measurement, 46(10), pp. 3783-3795. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.022>
- [8] AKTIF: *Problems Caused By Harmonics In Electrical Plants*. 2021.02.02. (megtekintés dátuma: 2023. november 24.)
<https://aktif.net/en/problems-caused-by-harmonics-in-electrical-plants/#>

HÁLÓZATRA VISSZATÁPLÁLÓ ÉS SZIGETÜZEMŰ NAPELEMES RENDSZEREK MEGTÉRÜLÉSI IDEJÉNEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

COMPARISON OF THE PAYBACK PERIOD OF A GRID-CONNECTED AND AN OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM

KÁRPÁTI Zoltán¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹tervezési szakterület vezető, zoltan.karpati2@eon-hungaria.com
ELMŰ Hálózati Kft., Áramhálózati Regionális Központ Budapest;
H-1132 Magyarország, Budapest, Váci út 72-74., Tel: +36 1 225 4321

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A cikkben bemutatjuk a napenergia hasznosításának legelterjedtebb módszerét, melynek két különböző felépítésű rendszerét hasonlítjuk össze gazdasági szempontból. Részletesen ismertetjük egy hálózatra visszatápláló és egy szigetüzemű napelemes rendszer teljes telepítési és működési költségét, majd 30 éves élettartamot feltételezve összehasonlítjuk őket a megtérülés szempontjából. Elemzésünk során egy egyszerűsített és egy összetett megtérülési idő számítására szolgáló módszert is alkalmazunk. A pontos számítás érdekében az inverter, míg szigetüzemű napelemes rendszer esetén az akkumulátor telepítési költségét is figyelembe vesszük. A megtérülési idők meghatározásánál a hálózatról vételezett és a szolgáltatónak értékesített villamos energia jelenlegi átlagos áráival, valamint annak várható áremelkedésével és az inflációval is kalkulálunk.

Kulcsszavak: hálózatra visszatápláló és szigetüzemű napelemes rendszer, egyszerűsített és összetett megtérülési idő, összehasonlítás

Abstract: In the paper the most common method of utilizing solar energy is presented, and two systems with different structures from an economic point of view are compared. The total installation and operating costs of a grid-connected and an off-grid photovoltaic (PV) system are described in detail, and then in terms of payback period assuming a 30-year lifetime is compared. During our analysis both simplified and complex payback period calculation method are used. In order to make an accurate calculation, the replacement cost of the inverter, while in case of the off-grid PV system a battery pack are also taken into account. When determining the payback periods, we calculate with the current average prices of electricity taken from the grid and sold to the service provider as well as with its expected price increase and inflation.

Keywords: grid-connected and off-grid photovoltaic system, simplified and complex payback period, comparison

1. BEVEZETÉS

A mai technológia fejlettségnek köszönhetően lehetőségünk van a megújuló energia magas hatásfokú hasznosítására. A természetben előforduló energiatípusok bármely ismert formája jól hasznosítható a megfelelő módszerek és technikai háttér alkalmazásával. Az elmúlt néhány évtized egyik legnagyobb fejlődést mutató energetikai ágazata a napelemes rendszerek. Ezek olyan fotovoltaiikus rendszerek, melyek a napfény elektromágneses sugárzásából a cellákban keletkező elektromos feszültség hatására egyenáramot állítanak elő. Az egyenáram még önállóan nem alkalmas a háztartásokban és az iparban elterjedt elektromos készülékek működtetésére, ezért azt az elektromos hálózatokban is alkalmazott 50 Hz-es frekvenciájú 230 V-os váltakozó árammá kell alakítani. Ezt a feladatot az inverter végzi el, amely minden napelemes rendszer részét képezi. Az inverter által előállított váltakozó áram már képes a háztartási eszközök, pl. mosógép, hűtőgép, klíma üzemeltetésére. Egy jól megtervezett és kivitelezett napelemes rendszer gazdaságos, környezetbarát, hosszútávon megtérülő beruházás. A napelemes

erőművek a fent említett inverteren kívül napelem paneleket tartalmaznak, amelyek az elektromágneses sugárakat elnyelő cellákból állnak. Az őket tartó szerkezet, túlfeszültség-levezető, tűzvédelmi kapcsoló és egyéb kiegészítő kellékek (pl. elosztószekrény, kábelek, csatlakozók) szintén a napelemes rendszer részeit képezik [1, 2, 3].

2. NAPELEMES RENDSZEREK TÍPUSAI

A napelemes rendszereknek a hálózattal való kapcsolatuk szerint háromféle típusa van: hálózatra visszatápláló, szigetüzemű és hibrid rendszer. A hálózatra visszatápláló rendszerek a legelterjedtebbek alacsonyabb költségük miatt. Ezeknél a naperőműveknél a feszültség közvetlenül az inverterbe kerül, amely ellátja a fogyasztókat váltakozó feszültséggel. Amennyiben a fogyasztók nem üzemelnek, akkor az inverter a hálózati frekvencián és feszültségen a váltakozó áramot visszatáplálja a közcélú hálózatba. A pillanatnyi fogyasztás értékéből lehet következtetni, hogy éppen az elektromos eszközök fogyasztása vagy a megtermelt elektromos energia mennyisége a nagyobb. Visszatápláló erőművek technikailag kétféleképpen kivitelezhetőek. Az egyik a sztring rendszer, vagy más néven normál rendszer, ahol a napelemek sorba vannak kötve és az utolsó egység közvetlenül az inverterre csatlakozik. Alkalmazása csak abban az esetben javasolt, ha a sorba kötött elemek közül nincs olyan, amelynek a teljesítménye drasztikusan csökkent a többi elemhez képest, például elhasználódás vagy árnyékolás miatt, ugyanis a sztringben található összes elem teljesítményét ez a legkisebb teljesítményű elem határozza majd meg. A másik visszatápláló típus az optimalizált vagy más néven okos rendszer, mely az egyes cellák közötti teljesítmény eltéréseket képes megfelelően kezelni és így javítani a termelés hatékonyságát. Ennek köszönhetően különböző gyártók különböző teljesítményű és magas toleranciával rendelkező napcelláit lehet egymás mellé helyezni és az sem okoz nagymértékű teljesítmény romlást, ha valamelyik cella éppen árnyékolva van. Így a teljes tetőfelületet ki lehet használni a napelemek elhelyezésére. További előnye az optimalizált rendszernek, hogy képes a teljesítményeket külön meghatározni az egyes cellákra és ha valamelyik cella teljesítménye határérték alá esik, akkor értesítést küld a felhasználónak [1, 2, 3].

A szigetüzemű rendszerek a hálózattól függetlenül, engedély nélkül kialakítható erőművek. Ebben az esetben a megtermelt energiát vagy azonnal felhasználjuk, vagy azt akkumulátorban tároljuk, melyek segítségével a fogyasztókat közvetlenül egyenfeszültséggel láthatjuk el. Ha váltakozó feszültségre van szükség, akkor ebben az esetben is megoldható az átalakítás inverter segítségével. A szigetüzemű rendszerek kiépítése akkor javasolt, ha nincs közcélú villamos hálózat a környéken, vagy a kiépítése csak magas költséggel lenne megoldható. A szigetüzemű rendszer hátránya, hogy eleve a kiépítése is drágább az akkumulátor telepek magas költsége miatt, illetve időnként (~10 év) cserélni is kell azokat [1, 2, 3].

A hibrid napelemes rendszer képes ötvözni a szigetüzemű és a hálózatra visszatápláló rendszerek előnyeit. A rendszer invertere megállapítja, hogy az akkumulátorba, a hálózatba vagy közvetlen felhasználásra továbbítja a megtermelt villamos energiát. Áramszünet esetén képes az akkumulátorról ellátni a háztartási berendezések energiaszükségletét. Amennyiben túltermelés van és az akkumulátorok feltöltődtek a többletenergia visszatáplálódik a hálózatra, melyet a szolgáltató köteles megvásárolni. Ha az akkumulátorok nincsenek teljesen feltöltve és pillanatnyilag nagyobb az energiatermelés, mint a fogyasztás az energia különbözete az akkumulátorba kerül, és rendelkezésre áll későbbi felhasználásra [1, 2, 3].

A kormányrendeletek napelemes rendszerekre vonatkozó szabályozása miatt, a telepíthető rendszernek jelenleg szigetüzeműnek kell lennie. Azonban a hálózati csatlakozást csak ideiglenes függesztették fel, mert a hálózati fejlesztések és bővítések hamarosan lehetővé teszik majd a hálózatra visszatápláló napelemes rendszerek telepítését is. Hibrid üzemű rendszer pedig Magyarországon még nem engedélyezett. Ezért a cikkben a hálózatra visszatápláló és szigetüzemű rendszertípusok összehasonlítását végezzük majd el.

Egy napelemes rendszer hatásfoka természetesen nem 100%, azt a panelek tájolása, a földrajzi fekvés és az évszak is befolyásolja [4]. A hatásfokot a gyártók természetesen szabványok alapján, megadott paraméterek szerint mérik, így lesz minden napelem rendszer hatásfoka összehasonlítható. A gyártók 1.000 Watt/m^2 a panel felületére merőleges besugárzással 25°C hőmérsékleten mérnek, és ez a mérési eredmény kerül feltüntetésre az eszközön. Hiába ez az ideális állapot a napelem modulok működése szempontjából, a valóságban ez ritkán valósul meg, és a napsütéses órák legnagyobb része kevésbé kedvező körülmények mellett telik. A napelem dőlési szöge igen fontos kritérium a napelemes rendszerek hatásfokának alakulása szempontjából. A dőlésszög és a tájolás együttes kiválasztásával az 1. ábrának megfelelő hatásfokokat lehet elérni %-ban kifejezve.

| Dőlés | Tájolás | | | | | | |
|-------|---------|------|------|------|------|------|-------|
| | Nyugat | | | Dél | | | Kelet |
| | 270° | 240° | 210° | 180° | 150° | 120° | 90° |
| 0° | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 |
| 10° | 84 | 87 | 90 | 91 | 90 | 87 | 84 |
| 20° | 82 | 89 | 94 | 96 | 94 | 89 | 82 |
| 30° | 81 | 90 | 97 | 100 | 97 | 90 | 81 |
| 40° | 78 | 89 | 97 | 100 | 97 | 89 | 78 |
| 50° | 74 | 87 | 95 | 98 | 95 | 87 | 74 |
| 60° | 69 | 82 | 92 | 95 | 92 | 82 | 69 |
| 70° | 64 | 77 | 86 | 89 | 86 | 77 | 64 |
| 80° | 57 | 69 | 78 | 81 | 78 | 69 | 57 |
| 90° | 50 | 61 | 68 | 71 | 68 | 61 | 50 |

1. ábra: A hatásfok változása a tájolás és dőlésszög függvényében [4].

3. NAPELEMES RENDSZEREK VIZSGÁLTA GAZDASÁGI SZEMPONTBÓL

Gazdasági szempontból fontos, hogy egy adott rendszer megtérül-e, hoz-e hasznot majd a tulajdonosnak, azaz érdemes-e a beruházást megvalósítani. A korábban leírtak miatt egy hálózatra visszatápláló és egy szigetüzemű napelemes rendszer teljes telepítési és működési költségét, valamint a megtérülési idejüket fogjuk összehasonlítani 30 éves élettartamot feltételezve.

3.1. A RENDSZEREK BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A hálózatra visszatápláló rendszerek esetében az eszközök felhasználják a termelt villamos energiát és amennyiben többletenergiára van szükség, akkor ad-vesz mérőórán keresztül veszi fel a háztartási hálózat a szükséges energia mennyiségét. Túltermelés esetén a megtermelt többletenergia betáplálásra kerül a közcélú hálózatba, amit szaldósítva elszámol az áramszolgáltató, azonban 2024-től ez a fajta elszámolás megszűnik és a már telepített rendszerek energiaforgalmának kezelése bruttó elszámolás szerint történik, ezért ezt a változást gazdasági szempontból mindenképpen figyelembe kell később venni. A hálózatra visszatápláló rendszerek berendezései közül a legfontosabb eltérés a szigetüzemű rendszer eszközeihez képest az inverter típusa és az akkumulátor hiánya. Visszatápláló rendszer esetén ugyanis figyelembe kell venni, hogy szolgáltatói engedéllyel bíró invertert lehet csak beépíteni, hogy az a hálózati feszültséggel kompatibilis módon együtt tudjon működni. Gazdasági aspektusból fontos megemlíteni az engedélyezés szükségességét is, amely a telepítés költségeit növeli.

Először is meg kell határozni, hogy mekkora teljesítményű rendszer kerülne telepítésre és majd összehasonlításra. A rendszer mindkét esetben 14 db 405 W-os monokristályos napelemet tartalmaz, valamint a panelekhez 5 kW-os inverter kerül telepítésre. Az 1. táblázat tartalmazza

mindkét típusú, 5,67 kW teljesítményű rendszer telepítéséhez szükséges elemeket, valamint azok költségeinek árajánlatát.

1. táblázat: A két napelemes rendszer részei és azok költségei.

| Megnevezés | Hálózatra visszatápláló | Szigetüzemű |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| | Bruttó ár (Ft) | Bruttó ár (Ft) |
| 14 db 405 W-os monokristályos napelem | 1.905.200 | 1.905.200 |
| 5 kW-os inverter | 914.000 | 385.000 |
| Tartószerkezet | 309.000 | 309.800 |
| Túlfeszültség-, túláram védelem | 340.000 | 340.000 |
| Kábelek, csatlakozók | 196.000 | 196.000 |
| Szerelés, kivitelezés | 1.219.000 | 1.219.000 |
| Tűzeseti leválasztó | 199.000 | 199.000 |
| Engedélyeztetés | 69.800 | - |
| Akkumulátorcsomag | - | 1.000.000 |
| Összesen | 5.152.000 | 5.554.000 |

A két rendszer berendezései javarészt megegyeznek. A legfontosabb különbség az inverter típusa, ugyanis a hálózatra visszatápláló rendszer esetében előírt a hálózattal kompatibilis működési feltételek teljesítése, azaz csak szolgáltatói engedéllyel rendelkező inverter építhető be, így az inverter ekkor nagyobb költséget képvisel. A másik különbség, hogy szigetüzemű rendszernél a megtermelt energia azonnal fel nem használt részét el kell tárolni akkumulátorban, így az előállított energia nem vész kárba (hálózatra visszatápláló esetében ez az energia a közcélú hálózatba termelődik be). Ebből következik, hogy a rendszer költségeinek a listáján megjelenik az akkumulátor költsége is. Az akkumulátorok széles választéka áll rendelkezésre a piacon, számos gyártótól. Manapság az ólomsavas akkumulátorokat kiszorították a Li-ion akkumulátorok, melyek jobb hatásfokúak és nagyobb teljesítményűek, így kevésbé környezetszennyezőek, azonban drágábbak [5]. Az akkumulátorok költsége a minőségüktől és a kapacitásuktól függ. Általánosan elmondható, hogy egy átlagos, négytagú család közepes szintű energiaigényét kielégítő akkumulátorcsomag 500 000 és 1. 500 000 Ft közötti összegre tehető. Ennek alapján a szigetüzemű rendszerrel 1.000.000 Ft-ot feltételeztük ennek költségére.

Az akkumulátorok önmagukban csak a töltések tárolására alkalmasak, azonban energiakezelés szempontjából szükség van olyan egységre is, amely vezérli a töltések áramlását a rendszerben, valamint az akkumulátor és egyéb alkatrészek kíméletes üzemének fenntartását is megvalósítja. A kíméletes üzem alatt értendő az alkatrészek, például a kábelek, kapcsolók stb. túláramvédelme, valamint az akkumulátorok túltöltése és mélykisülése elleni védelem. Ez azt jelenti, hogy a költségvetés kibővül a töltésvezérlő költségével is. A töltésvezérlők PWM jelvezérelt és MPPT típusa áll rendelkezésre a napelemes rendszerekhez. A MPPT töltésvezérlők a PWM jelvezérelt töltésvezérlőkhöz képest jobb hatásfokkal alakítják át és továbbítják az energiát az akkumulátorok felé csekély költségtöbblet hozzáadásával, így a projekt megvalósítása során a számításokhoz egy MPPT töltésvezérlő költségét vettük figyelembe. A közepes energiaigényű átlagos négytagú családok napelemes rendszerének akkumulátorkapacitásával kompatibilis 12 V/24/50 A MPPT töltésvezérlők átlagos piaci ára 50.000 Ft. Mivel a mai inverterek már a töltésvezérlőt is tartalmazzák, ezért a költségtáblázatban az inverter költsége már magába foglalja a töltésvezérlő árát.

A leírtakon kívül a visszatáplálás miatti engedélyeztetés bruttó költsége további 69.800 Ft, így a teljes hálózatra visszatápláló rendszer összköltsége telepítéskor 5.152.000 Ft. Szigetüzemű rendszer esetében nem szükséges az engedélyeztetés, így annak költségével nem kell számolni, így a beruházás teljes költsége a telepítés során 5.554.000 Ft lesz.

3.2. A RENDSZEREK MŰKÖDÉSI KÖLTSÉGEINEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

A rendszer elemei idővel veszítenek teljesítményükből, egyesek elhasználódnak és cserére szorulnak, amely a működés szempontjából költségeket von maga után. Érdemes megelőzni az alkatrészek avulását és időben átvizsgálni a berendezés minden elemét, mellyel a csere költségek egy része megtakarítható.

A berendezések költségeinek nagy részét kitevő inverter garanciáját ajánlatos meghosszabbítani, így a javítási költséget hosszabb távon megspórolhatjuk, valamint a termék cseréjének idejét jelentősen kitolhatjuk. Ehhez a telepítő cégek 5-10 éves garanciális meghosszabbítást vállalnak 30.000 és 100.000 Ft közötti költségen, gyártótól és meghosszabbítási időtől függően. Az inverterek 15-20 éven belül meghibásodnak, ezért cseréjük egyszer mindenképpen szükséges. A hálózatra visszatápláló rendszer esetében, így a rendszer végleges költsége a 30 éves élettartam alatt 6 066 000 Ft lesz (továbbra is 914.000 Ft-nak feltételezve az új inverter költségét).

Szigetüzemű rendszer esetén szerencsés esetben az akkumulátorok hosszú távon működőképesek lesznek, azonban a megtérülési idő számításaihoz egyszeri cseréjüket mindenképpen szükséges majd figyelembe venni. Mivel az akkumulátorok fejlesztése intenzíven zajlik és a teljesítményjavulás emelkedő tendenciát mutat, ezért számos új termék kerül ki folyamatosan a piacra, ami azt jelenti, hogy a jelenleg tárgyalt rendszerhez megfelelő akkumulátor a csere idején már jó eséllyel elavultnak számít majd. Ezért az akkumulátor becsült költsége ennek a minőségi elavulásnak és az inflációnak a közös figyelembevételével kisebb lesz, az inverter cseréjével együtt 750.000 Ft-ra tehető, így a rendszer teljes költsége 30 év alatt 6.304.000 Ft lesz.

Ahhoz, hogy megfelelő hatásfokkal és teljesítménnyel működjön mindkét naperómű, az éves karbantartást mindenképpen ajánlatos elvégezni. A karbantartási költség függ a telepített rendszer anyagi minőségétől, méretétől, valamint az inverter megbízhatóságától és a karbantartó cég garanciális feltételeitől. A karbantartás egyes műveleteit magunk is elvégezhetjük, illetve megfelelő telepítési szög kialakításával a panelek öntisztulását is megvalósíthatjuk. Ez nagyon fontos a teljesítmény és a hatásfok szempontjából, ugyanis a cellák megfelelő energiaelnyeléséhez felületüknek, simának és tisztának kell lenniük. Az öntisztítással és a panelek időszakos takarításával megspórolhatunk némi működési költséget, ugyanis csak a takarításhoz szükséges eszközök, anyagok költségét kell számításba venni. Egyéb költségként még felmerülhet a biztosítási díj is.

A napelemes rendszerek egyszerűsített megtérülési idejénél nem, azonban az összetett megtérülési időnél mindenképpen figyelembe kell venni a karbantartási és biztosítási költségeket is, melyet összegét éves szinten a rendszerek anyagköltségének a 0,5%-ának becsüljük.

4. A RENDSZEREK MEGTÉRÜLÉSI IDEJÉNEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

A megtérülési idő számítására létezik egyszerűsített és összetett módszer is. Az összetett megtérülési idő sok olyan fontos paramétert is számításba vesz majd, amelyek az egyszerűsített megtérülés során elhanyagolhatóak voltak, pl. a napelemek éves szintű teljesítményromlása (amortizáció), visszatápláló hálózatok esetén a visszatáplált energiából származó, éves szintű nyereség, az infláció, a villamos energia árának növekedése, valamint a hitel és állami támogatásból származó források.

4.1. EGYSZERŰSÍTETT MEGTÉRÜLÉSI IDŐK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

Az egyszerűsített megtérülési idő (Payback Period, továbbiakban PBP) kiszámításához tehát kevesebb adatra van szükség, mint az összetett megtérülési idő számításához. Szükségünk van

a beruházási költség és a várható éves nettó hozam összegére, amely a megtakarított energia kWh/év-ben és a villamos energia árának Ft/kWh-ban vett értékeinek szorzata. A PBP számítása megegyezik a hálózatra visszatápláló és a szigetüzemű rendszerek esetén is. A rendszerek költségtervében 14 db 405 W-os panel szerepel, így a teljes teljesítmény a következőképpen számolható:

$$P_{\text{ö}} = 14 * P_p = 14 * 405 = 5.670 \text{ kWh}, \quad (1.)$$

ahol:

- $P_{\text{ö}}$: a rendszer teljes teljesítménye [kWh],
- P_p : egy panel teljesítménye [kWh].

Az egyszerűsített megtérülési idő a következő képlettel számolható

$$PBP = \frac{\text{Beruházási költség (Ft)}}{\text{Megtakarított energia} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{év}} \right) * \text{Energia ár (Ft/kWh)}}. \quad (2.)$$

A fenti képletben a villamos energia árát a jelen évnek megfelelően kerekítve 37 Ft-nak vettük, valamint a megtakarított energia megegyezik az éves összteljesítménnyel. A beruházási költségeket felhasználva a PBP értéke a visszatápláló napelemes rendszerénél

$$PBP = \frac{5.152.000}{5.670 * 37} \approx 24,6 \text{ év}, \quad (3.)$$

míg szigetüzemű rendszerek esetében

$$PBP = \frac{5.554.000}{5.670 * 37} \approx 26,5 \text{ év}. \quad (4.)$$

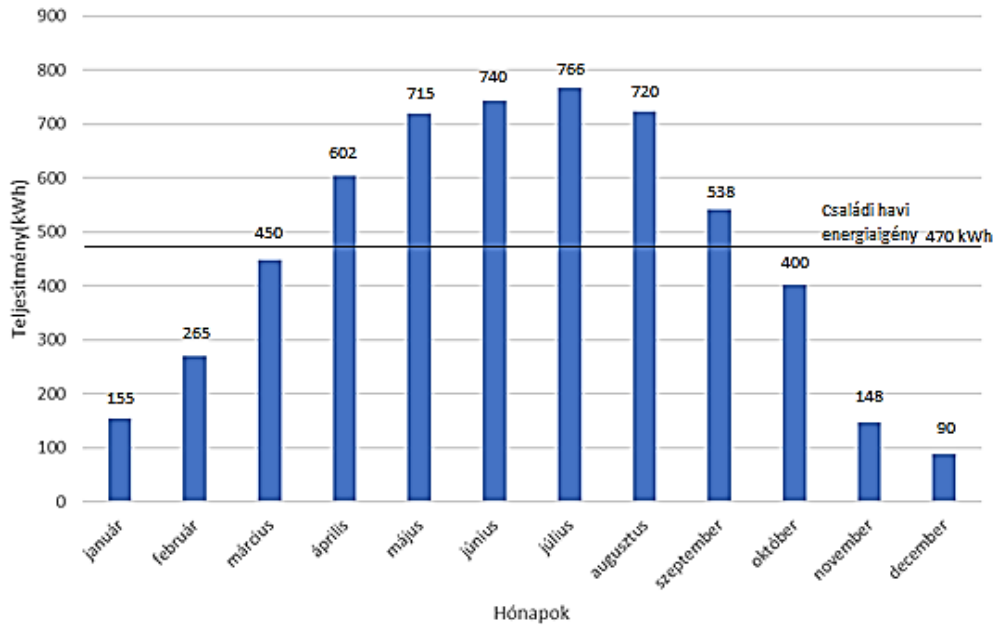
Láthatjuk tehát, hogy a hálózatra visszatápláló napelemes rendszer 1,9 évvel hamarabb térülne meg.

4.2. ÖSSZETETT MEGTÉRÜLÉSI IDŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az összetett megtérülési idő esetében sok egyéb tényezőt is figyelembe lehet venni. Számításba vehető a napelemek amortizációja, a visszatáplált energiából származó éves nyereség, az infláció, a villamos energia árának növekedése, de a finanszírozási lehetőség (hitel vagy állami támogatás igénybevétele) is fontos paraméter lehet. Fontos, hogy a jelenlegi jogszabályok szerint 2024.01.01-től havi szaldó elszámolás lesz bevezetve, de a tervezett napelemes rendszerek kivitelezése várhatóan az év vége körül megvalósulnak, ezért a számítások során havi szaldó elszámolást feltételezünk. Ennek megfelelően visszatápláló rendszer esetén a profit kiszámításához a nyári hónapokban termelt többlet energiából származó nyereséget és a villamos energián havi szinten megtakarított összegeket vesszük majd számításba. A megtakarított energiából és az energia nyereségekből származó pénzüsszegeket a jelenlegi villamos energia ára és egy árváltozási tényező alapján számítjuk majd ki. Szigetüzemű rendszerek számításainál a profit realizálása során csak a megtakarított pénzüsszegeket vehetjük majd számításba.

A számítások elvégzéséhez először is szükség lesz a havi villamosenergia-fogyasztás értékére. Egy átlagos négytagú család abban az esetben, ha a fűtést nem elektromos árammal valóítja meg évente 4.430 kWh áramot használ fel, ami havonta 369 kWh [6]. Amennyiben a fűtést és a hűtést egy 3,5 kW-os klíma biztosítja, melynek fogyasztása 1 kWh, egy feltételezett jól hőszigetelt házban további 100 kWh havi fogyasztást feltételezve a vizsgált háztartás havi villamosenergia-igénye kerekítve legyen 470 kWh [7].

A korábban bemutatott 5,67 kW-os napelemes rendszer teljesítményének havi lebontású termelési diagramja (2. ábra) alapján láthatjuk, hogy a napelemes rendszer a családi havi átlagos energiaigényét hat hónapban (április-szeptember) mindig teljesíti. Ezért a szükséges és a megtermelt villamosenergia-mennyiségének a különbözetét csak hat hónapban (október-március) kell a szolgáltatótól megvásárolniuk. Mindemellett ezekben a hónapokban nem számolunk nyereséggel, ellentétben az áprilistól szeptemberig tartó időszakkal.



2. ábra: Az 5,67 kW-os napelemes rendszer éves teljesítmény-eloszlásának oszlopdigramja (a Solar Kft. árajánlatának éves teljesítmény előrejelzése alapján).

Az eloszlásdiagram alapján az áprilistól szeptemberig tartó időszakban megtakarított villamosenergia-mennyiségeket a 2. táblázatban láthatjuk. A számoláskor azt feltételeztük, hogy a megtermelt villamos energia javát az olyan háztartási elektromos berendezések használják fel, melyek nagy energiafogyasztás mellett folyamatosan működnek (pl. hűtő, fagyasztó, villanybojler, klíma). Ezáltal a nyári hónapokban az áprilistól szeptemberig tartó időszakban a családi igénynek megfelelő villamos energiát, míg az októbertől márciusig tartó időszakban az éves előrejelzés szerint megtermelt villamos energiát szinte teljes egészében az a fogyasztók használják fel.

2. táblázat: Az egyes hónapokban megtermelt és megtakarított energia, valamint az ezekből számított nyereség.

| Hónap | Megtermelt energia (kWh) | Megtakarított energia (kWh) | Energia nyereség (kWh) |
|------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Január | 155 | 155 | 0 |
| Február | 265 | 265 | 0 |
| Március | 450 | 450 | 0 |
| Április | 602 | 470 | 132 |
| Május | 715 | 470 | 245 |
| Június | 740 | 470 | 270 |
| Július | 766 | 470 | 296 |
| Augusztus | 720 | 470 | 250 |
| Szeptember | 538 | 470 | 68 |
| Október | 400 | 400 | 0 |
| November | 148 | 148 | 0 |
| December | 90 | 90 | 0 |
| Összesen: | 5.589 | 4.328 | 1.261 |

Ezek alapján az adott (i-edik) év megtakarított villamos energiája ($E_{megtakarított}^{i.év}$) kiszámítható a hat téli hónap összes energiatermelésének, valamint a négytagú család havi átlagos energiaigényének hat hónapra összesített mennyiségének az összegeként

$$E_{megtakarított}^{i.év} = 6 * E_{havi\ igény} + \sum_{j=október}^{március} E_{j,megtermelt} \quad (5.)$$

ahol:

- $E_{havi\ igény}$: az átlagos négytagú család havi villamos energiaigénye, 470 kWh,
- $E_{j,megtermelt}$: a j-edik hónap villamosenergia-termelése [kWh].

A képlet egyszerűbben a következőképpen írható le, mivel $E_{téli}^{1.év}$ az októbertől márciusig tartó összes villamosenergia-termelés

$$E_{megtakarított}^{i.év} = 6 * E_{havi\ igény} + E_{téli}^{i.év} \quad (6.)$$

Azonban a számításnál figyelembe kell vennünk, hogy a nyári hónapokban a teljesítményromlástól függetlenül a megtakarított energia minden évben rendelkezésre áll (a rendszer 30 éves élettartama alatt), így az amortizációval történő korrigálást csak a hat alul teljesítő hónapra kell elvégezni. Az egyes évek megtakarított energiamennyiségének kiszámításához elegendő az 1. év októbereitől márciusáig tartó összes energiatermelésének ($E_{téli}^{1.év}$) éves amortizációval korrigált értékével számolni (a 2. táblázat adatai alapján ez 1.508 kWh lesz), azaz

$$E_{megtakarított}^{i.év} = 6 * E_{havi\ igény} + E_{téli}^{1.év} * \left(1 - \frac{A}{100}\right)^{i-1}, \quad (7.)$$

ahol:

- i: az évek száma (1,2, ... 30),
- A: az amortizációs tényező (0,5%).

Az amortizációs tényező 0,5 %-os értékét és a 470 kWh átlagos havi villamosenergia-igényt a fenti képletbe behelyettesítve megkapjuk az i -edik év megtakarított energiamennyiségét

$$E_{megtakarított}^{i.év} = 2.820 + 1.508 * \left(1 - \frac{0,5}{100}\right)^{i-1} \quad (8.)$$

A képlet alapján az első év ($i=1$) megtakarított energiamennyisége 4.328 kWh. Ebből könnyen kiszámítható a megtakarított pénzösszeg egy adott évre [8, 9]

$$P_{megtakarított}^{i.év} = E_{megtakarított}^{i.év} * \hat{A}r_v * \left(1 + \frac{V\%}{100}\right)^{i-1}, \quad (9.)$$

ahol:

- i : az adott év száma (1,2, ... 30),
- $P_{megtakarított}^{i.év}$: a megtakarított pénzösszeg az i -edik évben [Ft]
- $\hat{A}r_v$: a szolgáltatótól vásárolt villamos energia ára a telepítés évében [Ft/kWh],
- $V\%$: a villamos energia árának éves változása [%].

A megtakarított összegek számításánál a 2023-as évnek megfelelő villamos energia ár értékét, 37 Ft/kWh-t és 5%-os árváltozási tényezőt veszünk majd figyelembe. Az egyes évek megtakarított pénzösszegei, valamint az összetett megtérülési idő további elemeinek számítását évekre lebontva az átláthatóság kedvéért később táblázatokban fogjuk majd bemutatni.

A többletenergia, amely nem kerül fogyasztói felhasználásra visszatápláló üzemű rendszer esetén betáplálódik a hálózatba. Mivel a vizsgált időszakban a többletenergiát termelő hónapok (április-szeptember) összes energiatermelése nagyobb, mint a négytagú átlagos család havi energiaigénye még az évek során bekövetkező amortizációt figyelembe véve is, ezért biztos, hogy az energiátöbblet miatti éves nyereséget figyelembe kell venni a profit meghatározásánál. Azonban ez a többletenergia a rendszer határfokának romlása miatt évről-évre kevesebb lesz, azaz ezt a villamosenergia-mennyiséget korrigálni kell az amortizációs tényezővel. A többletenergia-mennyiség (későbbiekben röviden $E_{nyereség}^{i.év}$ energianyereség) számításához a túlteljesítő hónapok összes energiatermeléséből ki kell vonni a család havi villamos energia igényét, azaz

$$E_{nyereség}^{i.év} = \sum_{j=\text{április}}^{\text{szeptember}} E_{j,megtermelt} - E_{havi\ igény} = \sum_{j=\text{április}}^{\text{szeptember}} E_{j,nyereség} \quad (10.)$$

Az éves energianyereséget minden egyes évre nézve szintén korrigálni kell a teljesítményromlással [8, 9]:

$$E_{nyereség}^{i.év} = E_{nyereség}^{i.év} * \left(1 - \frac{A}{100}\right)^{i-1}, \quad (11.)$$

Az első év energianyereségét nyilván nem kell korrigálni, értéke egyszerűen kiszámítható a 2. ábra adatai és a 04-09. hónapok közötti villamosenergia-igény alapján, 1.261 kWh. Tehát a keletkező nyereség pénzösszege az i -edik évre ($P_{nyereség}^{i.év}$) a villamos energia árának változását is figyelembe véve az alábbi szerint alakul

$$P_{nyereség}^{i.év} = E_{nyereség}^{i.év} * \hat{A}r_e * \left(1 + \frac{V\%}{100}\right)^{i-1}, \quad (12.)$$

ahol:

- \bar{A}_e : a szolgáltatónak értékesített, visszatáplált villamos energia ára a telepítés évében, 5,1 Ft/kWh.

A teljesítmény éves eloszlási oszlopdiagramja alapján megállapított első évbeli energianyereség 1.261 kWh volt. Ezt az értéket, az 5,1 Ft-os értékesítési árat, valamint i helyére 1-et behelyettesítve a fenti egyenletbe, az első év utáni nyereség pénzüsszege (az első évben a villamos energia árának éves változását nem kell figyelembe venni) 6.431 Ft lesz. Az egyes évek nyereségei az összetett megtérülési idő táblázataiban szerepelnek majd.

A hálózatra visszatápláló rendszer esetén a profit kiszámításához össze kell adni a megtakarított és nyereségi pénzüsszegeket, majd kivonni a biztosítási és működési költségeket, valamint a hiteltörlesztő részletének költségét. Azt feltételezzük, hogy a rendszereket saját tőkéből valószínűleg meg a család, így a számításoknál a hitel költségét 0 Ft-nak vettük. A profit kiszámítása az i -edik évre ($Pr^{i.év}$) [8, 9]

$$Pr^{i.év} = P_{megtakarított}^{i.év} + P_{nyereség}^{i.év} - P_{biztosítás+működési}^{i.év} * \left(1 + \frac{I}{100}\right)^{i-1}, \quad (13.)$$

ahol:

- I : az infláció [%].

Számításaink során 10%-os becsült inflációs értéket vettünk figyelembe. Az inflációval korrigált profit pedig az i -edik évben az alábbiak szerint számítható

$$Pr_k^{i.év} = \frac{Pr^{i.év}}{\left(1 + \frac{I}{100}\right)^{i.év}}. \quad (14.)$$

Az összetett megtérülési idő számítása során alkalmazott adatokat összegezve a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Az összetett megtérülési idő számítása során alkalmazott adatok.

| Számítási alapadatok | Energia mennyisége (kWh) | Összeg (Ft) | Paraméter értéke (%) |
|-----------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------------|
| A család éves átlagos energiaigénye | 5.640 | | |
| A család havi átlagos energiaigénye | 470 | | |
| Nyári megtakarítás | 2.820 | 104.340 | |
| Téli megtakarítás, 1.év | 1.508 | 55.756 | |
| Összes megtakarítás, 1.év | 4.328 | 160.136 | |
| 1 kWh megvásárolt villamos energia ára | | 37 | |
| 1 kWh értékesített villamos energia ára | | 5,1 | |
| Amortizációs tényező | | | 0,5 |
| Biztosítási és működési költség | | | 0,5 |
| Infláció | | | 10 |
| Villamos energia árának változása | | | 5 |

A két vizsgált rendszer összetett megtérülési idejének vizsgálata során számított értékek a 4-5. táblázatokban láthatóak. Megállapítható, hogy a hálózatra visszatápláló rendszer beruházási költsége a telepítést követő 23. év végén, míg a szigetüzemű rendszer a 26. év végén térül meg. A kapott eredmények nagyon hasonlítanak az egyszerűsített megtérülési idők során kapott értékekre. A két rendszertípus megtérülési idejének különbsége egyrészt a beruházások költségeinek különbsége, másrészt a visszatápláló rendszer éves energianyeresége miatt keletkezik, amely költségelem a szigetüzemű rendszerek esetén nem jelenik meg. Azt is kiszámíthatjuk, hogy a hálózatra visszatápláló rendszer a beruházási költsége és az infláció nélkül korrigált profitja alapján 2.325.707 Ft hasznot hoz a családnak 30 év alatt. Ez a szigetüzemű rendszer esetében csak 1.202.389 Ft.

4. táblázat: Az összetett megtérülési idő számítása hálózatra visszatápláló napelemes rendszer esetében 30 éves élettartama alatt.

| Összes költség: 5.152.000 Ft | | | Kivitelezési költség: 1.219.000 Ft | | | Anyagköltség: 3.933.000 Ft | |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Év | Megtakarított energia (kWh) | Visszatáplált energia (kWh) | Megtakarított pénzösszeg (Ft) | Nyereség (Ft) | Biztosítási és működési költség (Ft) | Profit (Ft) | Inflációval korrigált profit (Ft) |
| 1 | 4.328 | 1.261 | 160.136 | 6.431 | 19.665 | 146.902 | 133.547 |
| 2 | 4.320 | 1.255 | 167.850 | 6.719 | 21.632 | 152.937 | 126.394 |
| 3 | 4.313 | 1.248 | 175.936 | 7.020 | 23.795 | 159.161 | 119.580 |
| 4 | 4.305 | 1.242 | 184.413 | 7.334 | 26.174 | 165.573 | 113.089 |
| 5 | 4.298 | 1.236 | 193.300 | 7.662 | 28.792 | 172.170 | 106.904 |
| 6 | 4.291 | 1.230 | 202.616 | 8.005 | 31.671 | 178.950 | 101.013 |
| 7 | 4.283 | 1.224 | 212.382 | 8.363 | 34.838 | 185.907 | 95.400 |
| 8 | 4.276 | 1.218 | 222.620 | 8.737 | 38.322 | 193.036 | 90.053 |
| 9 | 4.269 | 1.211 | 233.353 | 9.128 | 42.154 | 200.328 | 84.959 |
| 10 | 4.261 | 1.205 | 244.605 | 9.537 | 46.369 | 207.773 | 80.105 |
| 11 | 4.254 | 1.199 | 256.401 | 9.963 | 51.006 | 215.359 | 75.482 |
| 12 | 4.247 | 1.193 | 268.768 | 10.409 | 56.107 | 223.070 | 71.077 |
| 13 | 4.240 | 1.187 | 281.732 | 10.875 | 61.717 | 230.890 | 66.881 |
| 14 | 4.233 | 1.181 | 295.323 | 11.362 | 67.889 | 238.796 | 62.882 |
| 15 | 4.226 | 1.176 | 309.572 | 11.870 | 74.678 | 246.764 | 59.073 |
| 16 | 4.219 | 1.170 | 324.510 | 12.401 | 82.146 | 254.765 | 55.444 |
| 17 | 4.212 | 1.164 | 340.170 | 12.956 | 90.360 | 262.766 | 51.987 |
| 18 | 4.205 | 1.158 | 356.589 | 13.536 | 99.396 | 270.729 | 48.693 |
| 19 | 4.198 | 1.152 | 373.801 | 14.142 | 109.336 | 278.608 | 45.555 |
| 20 | 4.191 | 1.146 | 391.847 | 14.775 | 120.269 | 286.353 | 42.565 |
| 21 | 4.184 | 1.141 | 410.767 | 15.436 | 132.296 | 293.906 | 39.716 |
| 22 | 4.177 | 1.135 | 430.602 | 16.127 | 145.526 | 301.203 | 37.002 |
| 23 | 4.171 | 1.129 | 451.397 | 16.848 | 160.079 | 308.167 | 34.416 |
| 24 | 4.164 | 1.124 | 473.200 | 17.602 | 176.086 | 314.716 | 31.952 |
| 25 | 4.157 | 1.118 | 496.058 | 18.390 | 193.695 | 320.753 | 29.604 |
| 26 | 4.150 | 1.112 | 520.023 | 19.213 | 213.064 | 326.172 | 27.368 |
| 27 | 4.144 | 1.107 | 545.149 | 20.073 | 234.371 | 330.851 | 25.237 |
| 28 | 4.137 | 1.101 | 571.493 | 20.971 | 257.808 | 334.656 | 23.206 |
| 29 | 4.131 | 1.096 | 599.112 | 21.909 | 283.589 | 337.433 | 21.272 |
| 30 | 4.124 | 1.090 | 628.070 | 22.890 | 311.948 | 339.012 | 19.428 |
| | | | | | Σ | 7.477.707 | 1.919.882 |

5. táblázat: Az összetett megtérülési idő számítása szigetüzemű napelemes rendszer esetében 30 éves élettartama alatt.

| Összes költség: 5.554.000 Ft | | Kivitelezési költség: 1.219.000 Ft | | Anyagköltség: 4.335.000 Ft | |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Év | Megtakarított energia (kWh) | Megtakarított pénzösszeg (Ft) | Biztosítási és működési költség (Ft) | Profit (Ft) | Inflációval korrigált profit (Ft) |
| 1 | 4.328 | 160.136 | 21.675 | 138.461 | 125.874 |
| 2 | 4.320 | 167.850 | 23.843 | 144.007 | 119.014 |
| 3 | 4.313 | 175.936 | 26.227 | 149.710 | 112.479 |
| 4 | 4.305 | 184.413 | 28.849 | 155.564 | 106.252 |
| 5 | 4.298 | 193.300 | 31.734 | 161.566 | 100.320 |
| 6 | 4.291 | 202.616 | 34.908 | 167.708 | 94.667 |
| 7 | 4.283 | 212.382 | 38.399 | 173.984 | 89.281 |
| 8 | 4.276 | 222.620 | 42.238 | 180.382 | 84.150 |
| 9 | 4.269 | 233.353 | 46.462 | 186.891 | 79.260 |
| 10 | 4.261 | 244.605 | 51.109 | 193.497 | 74.601 |
| 11 | 4.254 | 256.401 | 56.219 | 200.182 | 70.163 |
| 12 | 4.247 | 268.768 | 61.841 | 206.926 | 65.933 |
| 13 | 4.240 | 281.732 | 68.025 | 213.706 | 61.903 |
| 14 | 4.233 | 295.323 | 74.828 | 220.495 | 58.063 |
| 15 | 4.226 | 309.572 | 82.311 | 227.261 | 54.404 |
| 16 | 4.219 | 324.510 | 90.542 | 233.968 | 50.918 |
| 17 | 4.212 | 340.170 | 99.596 | 240.574 | 47.596 |
| 18 | 4.205 | 356.589 | 109.556 | 247.033 | 44.431 |
| 19 | 4.198 | 373.801 | 120.511 | 253.290 | 41.415 |
| 20 | 4.191 | 391.847 | 132.562 | 259.285 | 38.541 |
| 21 | 4.184 | 410.767 | 145.819 | 264.948 | 35.803 |
| 22 | 4.177 | 430.602 | 160.400 | 270.202 | 33.193 |
| 23 | 4.171 | 451.397 | 176.440 | 274.957 | 30.707 |
| 24 | 4.164 | 473.200 | 194.085 | 279.115 | 28.337 |
| 25 | 4.157 | 496.058 | 213.493 | 282.565 | 26.080 |
| 26 | 4.150 | 520.023 | 234.842 | 285.181 | 23.928 |
| 27 | 4.144 | 545.149 | 258.326 | 286.823 | 21.878 |
| 28 | 4.137 | 571.493 | 284.159 | 287.334 | 19.925 |
| 29 | 4.131 | 599.112 | 312.575 | 286.537 | 18.063 |
| 30 | 4.124 | 628.070 | 343.833 | 284.237 | 16.289 |
| | | | Σ | 6.756.389 | 1.773.469 |

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Ahogy láhattuk, a két rendszer üzemelése során termelt profit meghatározásánál a biztosítási és működési költségeket kivontuk a megtakarított - visszatáplálás esetén a nyereséggel is kiegészített - pénzösszegekből az egyes évekre nézve. A számítások során a megtakarított és a nyereségi energiákból származó összegeket 0,5%-os amortizációs tényezővel vettük figyelembe. A profitot 10%-os évenkénti inflációval korrigáltuk. A megtérülési számítások mindkét esetben azt mutatták, hogy a hálózatra visszatápláló napelemes rendszer hamarabb térül meg a

szigetüzemű rendszerénél. Az egyszerűsített megtérülési idő visszatápláló üzem esetén 24,6 év, szigetüzem esetén 26,5 év. Az eltérés az összetett megtérülésnél is hasonló volt. A visszatápláló rendszer a telepítést követő 23. évben, míg a szigetüzemű rendszer beruházási költsége a 26. év végén térül meg. A szigetüzemű rendszer költségtervében szereplő, jelentős összeget képviselő akkumulátor telep és a visszatáplálás lehetőségének a hiánya miatt elmaradó pénznyereség áll a megtérülési számítások eredményének eltérése mögött.

Megtakarítás szempontjából mindkét rendszertípus igen jól teljesít. Az éves szinten termelt 4.328 kWh villamos energia a jelenlegi egységáraknak és a várható ár növekedésnek köszönhetően jelentős profitot eredményez. A hálózatra visszatápláló rendszer 2.325.707 Ft, míg a szigetüzemű 1.202.389 Ft hasznot hoz a családnak 30 év alatt. A visszatápláló rendszer túltermeléséből adódó nyereség a megtérülési idő szempontjából azonban az értékesített villamos energia jelenlegi alacsony ára miatt nem nagy jelentőségű. A nyereség mindössze 6.431 Ft az első évben, ami a 30 év során sem sokat emelkedik.

Mivel a 413/2022 (X. 26.) kormányrendelet az villamos hálózatra történő csatlakozást csak 2022. október 31-nél korábbi igénybejelentő tulajdonosok számára engedélyezi, jelenleg csak szigetüzemű rendszerek kiépítése engedélyezett. Mivel az újonnan telepített rendszerek hálózati csatlakozásának a felfüggesztése ideiglenes, ezért érdemes mérlegelni a beruházás elhalasztását és a korlátozás feloldása után inkább hálózatra visszatápláló rendszer telepítését végrehajtani. Amennyiben egy ilyen rendszert túlméretezünk, üzleti szempontból lehetőséget nyújthat haszonszerzési célra, valamint a megtérülési idő csökkentésére. Ehhez a szolgáltató által megvásárolt villamos energia árát, valamint az energiapiac várható változását is figyelembe kell venni. Egy jól tervezett, folyamatosan karbantartott, jelentős mérettel rendelkező és maximális hatásfokkal üzemelő hálózatra visszatápláló napelemes rendszer az energiapiaci körülmények kedvező alakulása mellett hosszú távú, nyereséges befektetés lehet.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MÉSZÁROS, L., SCHOTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek*. Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- [2] VÉGHELY, T.: *Napelemes rendszerek villamos berendezései*. CSER Kiadó, Budapest, 2014.
- [3] VÉGHELY, T.: *Napelemek és napelemrendszerek szerelése*. CSER Kiadó, Budapest, 2013.
- [4] <https://napelem.us/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 19.)
- [5] KOVÁCS CSABA: *Napelemes rendszerek és a villamosenergia tárolási lehetősége*. MEE – 58. Vándorgyűlés. Szeged, 2011.09.15.
- [6] <https://kp.hu/mennyi-egy-csaladihaz-energiafogyasztasa/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 25.)
- [7] <https://abgreen.hu/tudastar/klimaszereles/mennyit-fogyaszt-egy-klima> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 25.)
- [8] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., SZALÁNCZI, D.: *Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, pp. 119-135. 2022.
- [9] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J.: *Szigetüzemű háztartási méretű kiserőmű (HMKE) megtérülési idejének elemzése*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 18. évfolyam, különszám, pp. 445-465. 2023.

CSALÁDI HÁZ ENERGETIKAI KORSZERŰSÍTÉSE NAPELEMES ÉS NAPKOLLEKTOROS RENDSZERREL

ENERGY MODERNIZATION OF A FAMILY HOUSE WITH A PHOTO- VOLTAIC AND SOLAR COLLECTOR SYSTEM

KOVÁCS Gergely¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹épületüzemeltetési referens, gergelykovacs1990@gmail.com
Salgótarján Megyei Jogú Város Polgármesteri Hivatala;
H-3100 Magyarország, Salgótarján, Múzeum tér 1., Tel: +36 32 417-255

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A cikkben egy családi ház komplex energetikai korszerűsítését tárgyaljuk, amely két részből állna. A napelemes rendszer villamos energiával látná el a házat, míg a napkollektoros kiegészítő rendszer a használati melegvíz előállítását szolgálná. Természetesen egy ilyen több millió forint értékű beruházásnál az egyik legfontosabb kérdés a gazdaságosság. Az árajánlat szerinti anyag- és kivitelezési költségek alapján kiszámoljuk a rendszer megtérülési idejét, így a tulajdonos el tudja dönteni, hogy a beruházást érdemes-e megvalósítani, azaz megtérül-e a rendszer az élettartama alatt, vagy sem.

Kulcsszavak: energetikai korszerűsítés, napelemes rendszer, napkollektor, gazdaságossági kérdések, megtérülési idő

Abstract: In the paper the complex energetic modernization of a family house is discussed, which would consist of two parts. The photovoltaic system would supply the house with electricity, while the additional solar collector system would serve to produce domestic hot water. Of course, the most important issue for such an investment worth several million forints is the economy. Based on the material and construction costs according to the quotation, the payback period of the system is calculated, so the owner can decide whether the investment is worth implementing, i.e. whether the system is profitable during its lifetime or not.

Keywords: energetic modernization, photovoltaic system, solar collector, economic issues, payback period

1. BEVEZETÉS

Az elkövetkező néhány évtized hatalmas változásokat fog hozni, hiszen a kőolaj és földgáz készleteink végesek. A megújuló energiaforrások folyamatosan újratermelődnek, tehát kimeríthetetlenek. A megújuló energiáink a geotermikus energia, ami a Földünk belső hőjét aknázza ki, a vízenergia, ami a napsugárzás és a gravitáció (Hold által gerjesztett ár-ápany vízmozgás) együttes hatását használja ki, illetve a biomassa, ami a bomlásból eredő hőt hasznosítja. A Nap által sugárzott hő az alapja a szélenergiának és a napelemek működésének is.

A Nap energiája hő és fény formájában, sugárzással éri el a Földet, melyet az emberiség ősidők óta hasznosít. A napenergiához kapcsolódó technológiák, mint a fotovoltaiikus berendezések, a naperőművek, a napkollektorok vagy a napenergiát felhasználó passzív házak segíthetnek fedezni az emberiség energiaigényét. Napelemmel minden elektromos eszközt el lehet látni villamos energiával, pl. a háztartási gépeket, az IT eszközöket, elektromos autókat, hajókat, lakókocsikat, egyéb közlekedési eszközöket, de akár a fűtés is megoldható napenergiával (víz vagy levegő felmelegítésével). Napkollektor használatával pedig magát a hőt hasznosítjuk ugyancsak épület fűtésére vagy használati melegvíz előállítására, illetve, ha van rá lehetőség, akkor akár medence fűtésére is.

A napenergiának tehát számos előnye van, pl. ha már egy napenergiát hasznosító rendszer üzemel, maga az energia „ingyen” van, nem függ beszállítótól, csökkenti a más országoktól való energiafüggőséget, tiszta és decentralizált. Azonban hátrányai is ismertek, pl. a napenergia időbeli eloszlása és intenzitása csak korlátozott mértékben tervezhető előre (nappal süt a Nap, este nem), megoszlása szezonális (legnagyobb mennyiségben nyáron áll rendelkezésre), a hasznosítható energiamennyiség függ a földrajzi fekvéstől, jelentős beruházásigénnyel jár, ami komoly megtérülési számításokat követel. A cikkben az energiaszektor egyik legmodernebb és legnépszerűbb részével foglalkozunk, a napenergiával és annak hasznosításával egy meglévő családi ház esetében. Célunk, hogy a családi ház komplex energetikai korszerűsítése minél hatékonyabban tudjon megvalósulni.

2. NAPKOLLEKTOROK BEMUTATÁSA

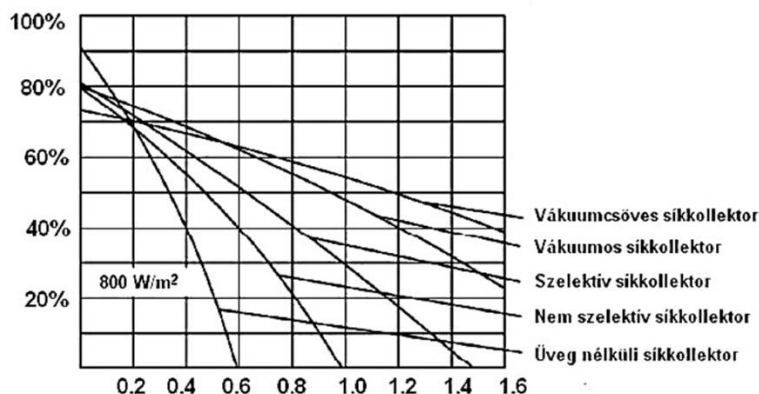
A Naptól érkező energia hasznosításának két alapvető módja létezik: passzív és aktív. Passzív energiahasznosításról akkor beszélünk, ha egy épület fűtését segíti a napsugárzás. A passzív napenergia-hasznosítás főként az átmeneti időszakokban működik, vagyis akkor, amikor a külső hőmérséklet miatt az épületen már hőveszteség keletkezik, de a napsugárzás még jelentős. Ilyenkor az üvegházhatást használjuk ki hőtermelésre. Az aktív energiatermelésnek két módja van. Az első módszer, hogy a napenergiát hőenergiává alakítjuk, ekkor a hőenergia „gyűjtése” és tárolása napkollektorokkal történik. A másik módszerrel, az ún. fotovoltaius eszközzel (PV), vagyis napelem segítségével a napsugárzás energiáját elektromos energiává alakítjuk.

A napkollektor üvegezésén keresztül a fény vastag, nagy hőtároló képességű lemezre esik, mely külső felülete szintén hőszigetelt, így hosszú időn át képes tárolni az beérkezett hőt. A napkollektorok működése egyszerűnek mondható. A kollektor elnyeli a napsugarak által közvetített hőt és azt átadja a kollektorban keringő fagyálló, jó hőközvetítő folyadéknak. A folyadék egy zárt hőcserélő tartályban átadja a többlet hőt az ott tárolt folyadéknak, ezzel lehűl. A napkollektor tehát olyan épületgépészeti berendezés, amely a napenergia felhasználásával közvetlenül állít elő fűtésre és vízmelegítésre használható hőenergiát. Fűtésre való alkalmazása esetén az épület megfelelő hőszigetelése is szükséges. Fűtési rendszer esetén a hasznosítása általában tavasszal és ősszel jellemző, illetve télen, mint kiegészítő fűtés. Hőcserélő közege jellemzően folyadék, de a levegőt vagy vákuumot használó változatai is elterjedtek [1, 2].

Napkollektor telepítésekor figyelni kell a tájolásra, mert optimális esetben tehát déli tájolás, valamint 40-45°-os dőlésszög esetén lesz a legnagyobb a hatásfoka. Ezekkel a tájolásokkal egész évben fel tudjuk használni a Naptól érkező sugárzást. A telepítés szögének beállítása attól függ, hogy mire szeretnénk felhasználni a napkollektoros rendszert. Ha meredekebb dőlésszöget (50-60°) választunk, akkor főleg téli időszakra teljesít ideálisan a napkollektorunk, laposabb dőlésszög (30°) esetén pedig nyáron érjük el ugyanezt [1].

A napkollektorokat több csoportba oszthatjuk. Megkülönböztetünk lefedés nélküli, illetve lefedéssel rendelkező napkollektorokat. A lefedés nélküli napkollektorokat legtöbbször mendence fűtésére, vagy nyáron melegvíz előállítására használják. A lefedéses napkollektorokat további két csoportra bonthatjuk. Szelektív bevonat nélküli, valamint szelektív bevonatos napkollektorra. A szelektív bevonat nélküli napkollektor mára elavult. Hatásfoka alacsony, de nem annyira behatárolt az alkalmazhatósági területe, mint a lefedés nélküli napkollektornak. A szelektív bevonattal rendelkező napkollektorokon belül létezik a síkkollektor és a vákuumcsöves síkkollektor. A vákuumcsöves síkkollektor rendelkezik a legjobb hatásfokkal, de a vákuum fenntartása érdekében ez a típus igényli a legtöbb karbantartást. A síkkollektor is további két részre osztható: sima és vákuumos síkkollektorra. A sima síkkollektor legjobb tulajdonsága, hogy a direkt és az indirekt (szórt) fényt is egyaránt hasznosítja. Magyarországon ez az egyik legelterjedtebb kollektorfajta, a kedvező ára és a relatív magas hatásfoka miatt. Családi ház

használati melegvíz előállításához a vákuumcsöves síkkollektorok előnyösebbek, mint a síkkollektorok, hiszen az 1. ábrán lévő hatásfokgörbék alapján látható, hogy egységnyi felületre vetített teljesítménye (y tengely) a melegvíz előállításához szükséges hőfok tartományban (x tengely) a vákuumcsöves síkkollektoroknak a legnagyobb [1, 2].

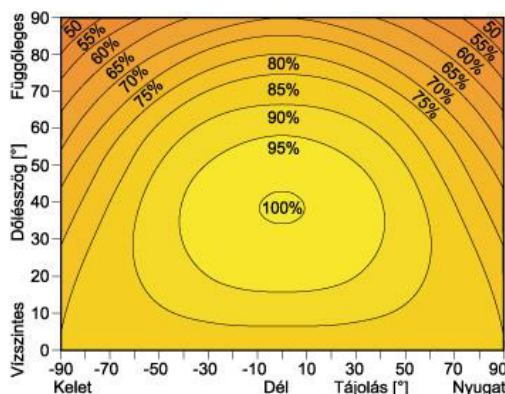


1. ábra: Napkollektorok hatásfoka [3].

3. NAPELEMEK BEMUTATÁSA

A napelemeket egy félvezető-alapú technológia jellemzi, amely képes a fény energiáját egyenáramú villamos energiává alakítani. Ezt fel lehet használni azonnal, de akkumulátorban is lehet tárolni későbbi felhasználásra. A napelem panelek egyre elterjedtebbek a sokoldalúságuk, a könnyű tetőre, épületre vagy akár földre való szerelhetőségük miatt. A szerkezet biztosítja a tiszta, megújuló energiaforrást, amely ki tudja egészíteni az adott épület hálózatról vételezett villamos energiáját, így minimalizálva a villamos hálózattól való függőséget. Azokban a régiókban, ahol nincs kiépített közüzemi hálózat, mert túl költséges lenne a kiépítés, mint például farmokon, a napenergia megbízható villamosenergia-ellátást nyújt.

A napelemek elhelyezésénél a megfelelő dőlésszög és tájolás rendkívül fontos. A legtöbb napsugárzás déli tájolású felületre érkezik, ezért a napelemeket is lehetőleg délre tájolva helyezzük el. A helyszín adottságai - pl. a rendelkezésre álló tetőfelületek - azonban sokszor nem teszik lehetővé a pontos déli tájolást. Ilyenkor nem kell tartószerkezeteket alkotnunk azért, hogy a napelemeket a tető síkjából kiemelve egzaktul délre fordítsuk. Ez ugyanis általában messze nem hoz olyan eredményt, ami indokolná a plusz költségeket és munkát. Ha ugyanis kis mértékben eltérünk az optimális tájolástól és dőlésszögtől, akkor a napelemek felületére érkező napenergia mennyisége csak kis mértékben csökken, melyet a 2. ábrán láthatunk.



2. ábra: A hasznosítható napenergia változása a dőlésszög és tájolás függvényében [6].

Leolvasható, hogyha pl. 40° -os dőlésszög mellett déli tájolás helyett délnyugati tájolást alkalmazunk, akkor a napsugárzási energiaráta csak kb. 5%-kal csökken, de pl. teljesen nyugati, vagy keleti tájolás esetén is csak 25% körüli a csökkenés. Fontos azonban, hogy ezek a viszonyszámok egész éves használatra vonatkoznak [4, 5].

A napelemes rendszereknek a közcélú hálózattal való kapcsolatuk szerint három típusát különböztetjük meg: hálózatra visszatápláló, hibrid, vagy szigetüzemű rendszer. A hálózatra visszatápláló rendszer esetében a megtermelt villamos energiát visszatáplálhatjuk a közcélú hálózatba. Az elszámolás szerződés szerint egy ad-vesz mérőórán keresztül történik éves vagy havi periódusokban. A betermelt és vételezett villamos energia pozitív különbségét (tehát, ha többet termeltünk be, mint amennyit fogyasztottunk) éves, vagy havi ütemezésben kifizeti nekünk a szolgáltató. Ezt nevezik szaldó elszámolásnak. Azonban a betermelt energiának az ára viszont jóval alacsonyabb, mint a vételezetté, ezért érdemes úgy tervezni a napelemes rendszerünket, hogy optimális módon csak a saját fogyasztásunkat fedezze. Szigetüzemű rendszer esetében a megtermelt villamos energiát azonnal elfogyasztjuk vagy akkumulátorokban tároljuk. Itt teljesen függetlenek vagyunk a szolgáltatótól, azonban a megtermelt többlet energiát nem lehet a közcélú hálózatba betáplálni. Az akkumulátorok magas ára és korlátozott élettartama miatt ez a rendszer kevésbé elterjedt. Olyan helyekre szokták telepíteni, ahol nincs a szolgáltató által kiépített elektromos csatlakozási lehetőség, pl.: nyaralók, tanyák. A nagyobb önellátás felé tett első lépés a hibrid napelemes rendszerek alkalmazása lesz, azonban hazánkban ilyen rendszer telepítése még nem engedélyezett. A hibrid elnevezés azt jelenti, hogy a napelemes rendszer energiatárolóval, akkumulátorral is ki van egészítve. Így az épületnek a napelemes rendszer nemcsak közvetlenül a napelemekről, hanem napsütésmentes időszakokban az akkumulátorról is tud energiát szolgáltatni. Az energiatároló célja az tehát, hogy a napelemekkel megtermelt energiát minél nagyobb arányban az épület önmaga használja fel. Azaz az energiatároló segít, hogy a napelemekkel megtermelt energia kisebb részben kerüljön visszatáplálásra a hálózatba és így a hálózatból vételezett energia mennyisége is csökkenjen. Ennek elsősorban akkor lesz forintban is érezhető jelentősége, ha Magyarországon megváltozik az éves szaldó elszámolás [7].

A napelemes rendszerek főbb részei: napelem panel, inverter, tartószerkezet és egyéb villamosipari kiegészítő berendezések (pl. szolár kábelek, csatlakozók, túlfeszültség elleni védelem, okos mérő). A mai napelemes rendszerek élettartama 30+ év. A gyártók általában 10 év garanciát vállalnak a napelem panelre, az inverterre és a tartószerkezetre.

4. A KOMPLEX ENERGETIKAI RENDSZER A CSALÁDI HÁZ ESETÉBEN

A komplex energetikai rendszer két részből állna a konkrét családi ház vonatkozásában, amely Salgótarjában belvárosában található (3. ábra).



3. ábra: A családi ház elhelyezkedése [8].

A hálózatra visszatápláló napelemes rendszer villamos energiával látná el a házat, a napkollektoros kiegészítő rendszer pedig a használati melegvíz előállítását szolgálná. Sajnos az épület földrajzi elhelyezkedés szempontjából nem ideális, mert délnyugati tájolású.

4.1. A NAPELEMES RENDSZER

A család havi villamosenergia-fogyasztása 15.000 Ft. Így 154 Ft elosztói alapidíjat és 36,208 Ft/kWh villamos energia egységárat feltételezve

$$\frac{15000 - 154}{36,208} = 410,02 \text{ kWh} \quad (1.)$$

adódik, tehát a család havi villamosenergia-fogyasztása 410,02 kWh. Természetesen az éves fogyasztásuk a kapott eredmény 12-szerese, tehát 4.920,24 kWh lesz. Egy 12 panelből álló egyenként 405 Wp teljesítménnyel bíró napelemes rendszer teljes teljesítménye 4,86 kWp. Mivel ideális déli tájolás és 35°-os dőlésszög esetén 1 kWp teljesítményű napelemes rendszer közelítőleg 1.200 kWh energiát termel, a 4,86 kWp teljesítményű kiserőmű teljesen le tudja fedni a család éves fogyasztását ($4,86 \cdot 1.200 = 5.832 \text{ kWh}$). A napelemes rendszer az épület melletti garázs tetejére kerül majd telepítésre, melynek mérete 7x8 m. A napelemek és a tartószerkezet helyigénye 3,5x8 m, így nincs akadálya a telepítésnek. Azonban a garázs tetőfelülete nem ideális tájolású és dőlésszögű, amely kismértékű termelésesökkenést fog okozni. Ennek kiszámításához ad támpontot a 2. ábra. Az ábrából megállapítható, hogy 20°-os dőlésszöggel és 20°-os DNY-i tájolással 5%-os csökkenéssel kell számolni, azaz 5.540 kWh éves villamosenergia-termelésre számíthatunk, amely még így is képes fedezni a család energiaigényét.

A napelemes rendszerre 2023. májusában egy cégtől kapott árajánlatot az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Árajánlat.

| Megnevezése | Nettó egységár (Ft) | Mennyiség (db) | Nettó összérték (Ft) | Áfa (27%) | Bruttó összérték (Ft) |
|-----------------------------------|---------------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------------|
| Risen Solar RSM 405 Wp napelem | 80.496 | 12 | 965.952 | 260.807 | 1.226.759 |
| Huawei SUN 2000-5KTL-M1 inverter | 610.896 | 1 | 610.896 | 164.942 | 775.838 |
| Tartószerkezet | 299.520 | 1 | 299.520 | 80.870 | 380.390 |
| Kivitelezés | 496.136 | 1 | 496.136 | 133.957 | 630.093 |
| Villanyszerelési anyag | 229.500 | 1 | 229.500 | 61.965 | 291.465 |
| Huawei okos mérő | 80.550 | 1 | 80.550 | 21.749 | 102.299 |
| Tűzvédelmi főkapcsoló | 122.400 | 1 | 122.400 | 33.048 | 155.448 |
| Optimalizáló | 26.700 | 6 | 160.200 | 43.254 | 203.454 |
| Kedvezmény a főbb elemekből (20%) | -520.401 | 1 | -520.401 | -140.508 | -660.909 |
| Összesen | - | - | 2444.753 | 660.083 | 3.104.837 |

Látható, hogy a napelemes rendszer összköltsége 3.104.837 Ft. A táblázatból könnyen kiolvasható, hogy az energetikai rendszer két fő költségviselő eleme a napelem panelek és az inverter. Az árajánlatban szereplő inverter 5 kW teljesítményű napelemes rendszert tud kezelni

3 fázison. A rendszer később maximum 30%-kal bővíthető. Az ajánlatban szereplő okos mérő és az optimalizáló a legtöbb energia kinyerése szolgáló eszköz. Segítségükkel áthidalhatunk bizonyos teljesítményromlást eredményező eseményeket, például, ha az egyik napelemre árnyék vetül, annak teljesítménye leromlik, ami befolyásolná a többi napelem teljesítményét is. 12 panelnél kettésével helyezünk el optimalizálót a költségek csökkentése, ezzel együtt a legmagasabb elérhető teljesítmény elérése érdekében. Mivel a garázs és a villanyóraszekrény közötti távolság meghaladja az 5 m távolságot és lakóteret is érint, ezért tűzvédelmi főkapcsolót is be kell majd építeni.

4.2. A NAPKOLLEKTOROS RENDSZER

Mivel a napkollektoros rendszer csak kiegészítő rendszer lesz, nem biztos, hogy telepítésre fog kerülni, ezért célszerű külön kezelni a két rendszer beruházási költségét. Először is a napkollektor méretezését kell elvégezni a konkrét család vonatkozásában. Egy fő naponta megközelítőleg 50-60 liter melegvizet használ el. Az ideális melegvíz hőmérséklete pedig 45 °C. A családban a melegvíz felhasználók száma 3 fő. A használati melegvíz hőigényének számításához tehát az alábbi adatokat vehetjük figyelembe:

- Melegvíz felhasználók száma: $n=3$ fő,
- Felhasználónkénti vízfogyasztás: $V^1=60$ liter/nap/fő,
- Szükséges hőmérséklet: $t_m=45$ °C.

Így az átlagos napi melegvíz szükséglet (V), valamint a víz tömege naponta (m) az alábbi képlet szerint alakul:

$$V = n \cdot V^1 = 3 \cdot 60 = 180 \text{ liter/nap,}$$

$$m = V \cdot 1 = 180 \text{ kg/nap.} \quad (2.)$$

A melegvíz előállításához szükséges hőmennyiség (Q_{HMV}) számítása egy napra vonatkoztatva pedig (tárolási és felhasználási veszteségnek 1,14-et feltételeztünk) [9]:

$$Q_{HMV} = 1,14 \cdot c \cdot m \cdot \Delta T = 1,14 \cdot c \cdot \rho \cdot V \cdot (t_m - t_h)$$

$$= 1,14 \cdot 4,1795 \cdot 990,25 \cdot 0,18 \cdot (45 - 10) = 29.724,5 \text{ kJ} \quad (3.)$$

$$= 8,2568 \text{ kWh,}$$

ahol:

- c a víz fajhője 45°C-on (4,1795 kJ/kgK) [10],
- m a víz súlya, 180 kg/nap, amely felírható $m = \rho \cdot V$,
- V a napi vízfogyasztás (180 l, azaz 0,18 m³),
- ρ a víz sűrűsége 45°C-on (990,25 kg/m³) [10],
- t_m a használati melegvíz hőmérséklete (45 °C),
- t_h a hálózati hidegvíz hőmérséklete (10 °C).

Mivel 1 m² napkollektorral egész évben átlagosan 2 kWh napenergia hasznosítható [11], kiszámítható, hogy a 8,2568 kWh energia előállításához, egy ~4 m² napkollektor szükséges, amely közel 100%-ban fedezi a család melegvíz szükségletét. A napkollektoros rendszer beruházási költségének kiszámításához egy 2015-ben elkészített napkollektoros rendszert vettünk alapul. Akkor egy 4 m²-es napkollektoros rendszer telepítése 950.000 Ft-ba került. A napkollektoros rendszerek kiépítésének díja 8 év alatt, 10%-os inflációt feltételezve jövőérték számí-

tással meghatározva $950.000 \cdot (1 + 0,1)^8 = 2.036.409$ Ft-ra emelkedhetett [12, 13]. Az egyszerűség kedvéért később 2.000.000 Ft beruházási értékkel és 25 év várható élettartammal fogunk számolni.

5. MEGTÉRÜLÉSI IDŐK SZÁMÍTÁSA

Egy több millió forint értékű beruházásnál a legfontosabb kérdés a gazdaságosság. Elsősorban azt akarjuk elérni, hogy a befektetett összeg a lehető legrövidebb idő alatt megtérüljön. Hosszú távú cél pedig, hogy a napelemek vagy napkollektorok felhelyezése a ház értékét növelő beruházás legyen. Ahogy az előző fejezetben láthattuk a beruházások várható költségei jól tervezhetők, ha a rendszerelemek méretezésénél az éves energiaigényt vesszük alapul.

A leggyorsabb módszer a beruházás gazdaságosságának vizsgálatára az egyszerűsített megtérülési idő. Ez az idő azt mutatja meg, hogy a rendszer beruházási költsége hány év alatt térül meg. Az egyszerűsített megtérülési idő számítása jelenérték segítségével végezhető el [12, 13]

$$n = C_0 \div PV, \quad (4.)$$

ahol:

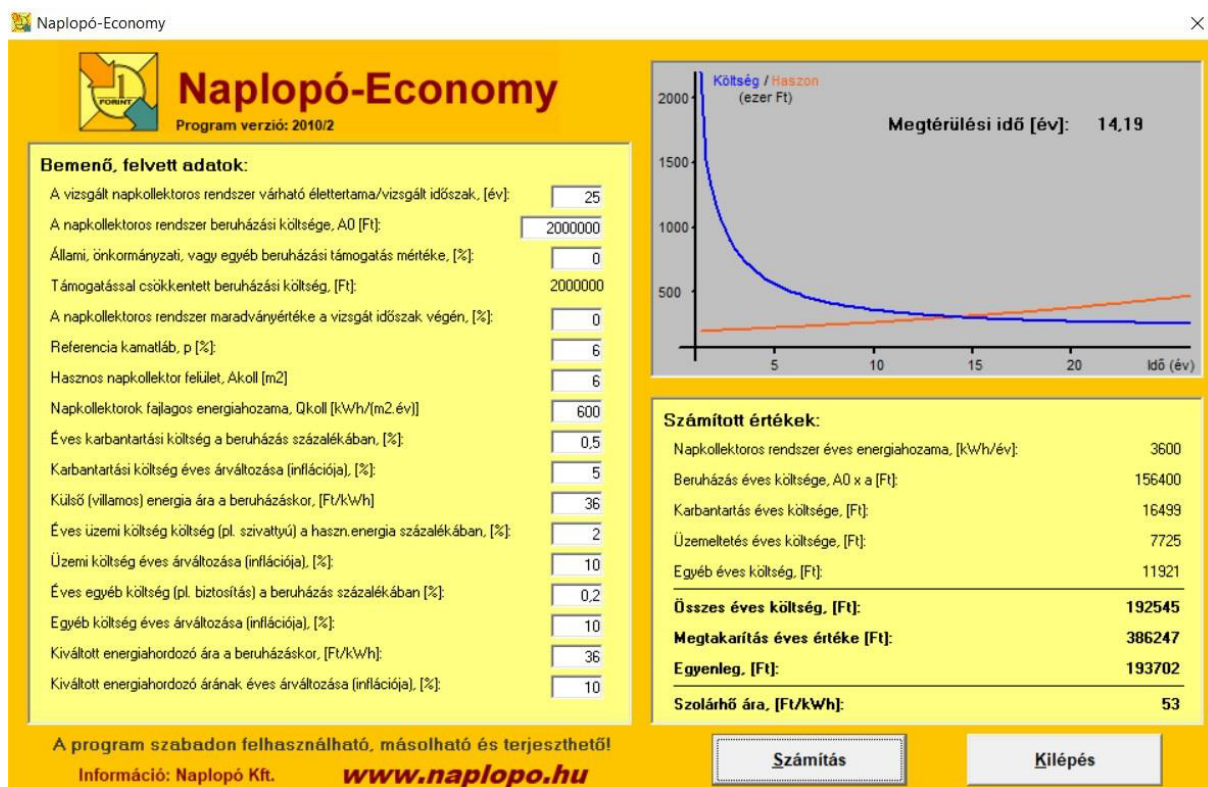
- n a megtérülési idő (év),
- C_0 a beruházás összege (jelen feladatban 1 kWp-re vonatkoztatott összeg),
- PV az éves haszon jelenértéke (minden évben a napelemek által megtermelt energia pénzbeli értéke, azaz a villamos energia egységárának és a rendszer által évente termelt villamos energiának a szorzata).

A fenti képlet segítségével kiszámolható a családi ház energetikai felújításának megtérülési ideje. A beruházás összegét az egyszerűség kedvéért, kerekítve 3.100.000 Ft-nak véve, valamint a 4,86 kWp-es rendszer, 1 kWp-re vonatkoztatott teljesítményére átlagosan kerekítve 640.000 Ft-ot számolva a megtérülési idő [12, 13]:

$$\frac{640.000}{36,208 \cdot 1.200} = 14,73 \sim 15 \text{ év}. \quad (5.)$$

Tehát a napelemes rendszerünk egyszerűsített megtérülési ideje nagyjából 15 év. Összességében elmondható, hogy a beruházást érdemes megvalósítani, mert bár 15 év múlva az inverterre és a napelemekre már nem lesz garancia, amíg azokat nem kell cserélni, hasznot termelnek. Az elemek elhasználódása miatt cserék, valamint a kisebb javítások költsége ellenére is nyereséges lehet a beruházás.

A napelemes rendszerre számított megtérülési idő nem tartalmazta a napkollektoros kiegészítő rendszert. A napkollektoros rendszer megtérülési idejét a Naplopó Kft. ingyenes programjával határoztuk meg (4. ábra) [14]. Azért lett kettébontva, mert ez a kiegészítő rendszer nem biztos, hogy telepítésre fog kerülni, azonban a napelemes kiserőmű mindenképpen meg fog valósulni. A szoftverrel történő kalkuláció során meg kellett adni számos adatot (lásd a 4. ábrán pl. beruházási költség: 2.000.000 Ft, várható élettartam: 25 év stb.), ahhoz, hogy valós megtérülési időt tudjon számolni a program. Az alapadatok megadása után kicsit több, mint 14,19 év a beruházás egyszerűsített megtérülési ideje, melyet a 4. ábrán is láthatunk. Összességében ezzel a projekttel kapcsolatban is elmondható, hogy a beruházást érdemes megvalósítani, mert bár 10 év múlva a napkollektor részelemeire már nincs garancia, amíg azokat nem kell cserélni, „ingyen” energiát termelnek. A megtérülési idő letelte után csekély összegű és folyamatos karbantartás mellett a rendszer még 15 évig állíthat elő a családnak melegvizet.



4. ábra: A napkollektoros kiegészítő rendszer megtérülési idejének meghatározása [14].

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A mai modern ember legnagyobb kihívása a megújuló energiák okos felhasználása. Ebben segít a hőszigetelés, a modern nyílászáró vagy a napsugárzás adta energia kihasználása. A Nap energiáját direkt módon felhasználó rendszerek a napelemes és a napkollektoros rendszerek. Ahogy láthattuk egy családi ház energetikai korszerűsítése napelem és napkollektor segítségével viszonylag alacsony, 5.100.000 Ft-os beruházási költséggel megvalósítható. A beruházás megtérülési idejének kiszámításához a leggyorsabb számítási formát választottuk, mind a napelemes és a napkollektoros rendszer esetében is. A hálózatra visszatápláló napelemes rendszernél az egyszerűsített megtérülési idő formuláját alkalmaztuk, míg a napkollektor esetében a Naplopó Kft. ingyenes programját használtuk. A napelemes rendszer 14,73, míg a melegvíz előállítását szolgáló napkollektoros kiegészítő rendszer 14,19 év alatt térülne meg a családnak. Tehát elmondható, hogy megéri a komplex napelemes és napkollektoros rendszert telepíteni.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <https://sisolar.hu/napkollektorok/> (megtekintés dátuma: 2023. április 3.)
- [2] MÉSZÁROS, L., SCHÖTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek*. Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- [3] <http://www.csaladihaztervezes.hu/kalkulator/napkollektor-kalkulator> (megtekintés dátuma: 2023. május 10)
- [4] VÉGHÉLY, T.: *Napelemes rendszerek villamos berendezései*. CSER Kiadó, Budapest, 2014.
- [5] BODNÁR, I.: *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergiatermelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. Micropress Kft., 2019.

- [6] <https://www.naplopo.hu/naplopo-partneri-hirlevelek> (megtekintés dátuma: 2023. március 13.)
- [7] <https://index.hu/gazdasag/2023/02/13/napenergia-energia-veszelyhelyzet-megujulo-energia-mavir-energiavalsag/> (megtekintés dátuma: 2023. április 21.)
- [8] <https://www.google.com/maps/place/Salg%C3%B3tarj%C3%A1n,+Blaha+Lujza+%C3%BA+12,+3104/@48.078279,19.7799359,181m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x4740132fd90dea95:0x831649620cf8c9ac!8m2!3d48.0781401!4d19.7804931!16s%2Fg%2F11c1xzmqqk?entry=ttu> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 24.)
- [9] <https://www.gepeszbolt.hu/simonyi/Vizellatas%20csatornazas/HMV%20konyv%20XY.pdf> (letöltés dátuma: 2023. augusztus 24.)
- [10] <https://fizipedia.bme.hu/images/2/29/Tablazierok.pdf> (letöltés dátuma: 2023. augusztus 24.)
- [11] <https://www.naplopo.hu/rendszerek/napkollektoros-rendszerek/csaladi-hazak/melegviz-keszito-rendszerek/standard-rendszerek> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 24.)
- [12] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., SZALÁNCZI, D.: *Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, pp. 119-135. 2022.
- [13] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J.: *Szigetüzemű háztartási méretű kiserőmű (HMKE) megtérülési idejének elemzése*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 18. évfolyam, különszám, pp. 445-465. 2023.
- [14] <https://www.naplopo.hu/tudastar/ingyenes-hasznos-szoftvereink/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 25.)

CSALÁDI HÁZ HÁZTARTÁSI MÉRETŰ KISERŐMŰVÉNEK TERVEZÉSE

DESIGN OF A HOUSEHOLD-SIZED SMALL POWER PLANT OF A FAMILY HOUSE

NÉMETH Norbert¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit²

¹technologia támogató igazgató, nnemeth1@gmailhanonsystems.com
Hanon Systems Hungary Kft.;
H-8000 Magyarország, Székesfehérvár, Aszalvölgyi u. 9.-11., Tel: +36 30 227-6775

²PhD, egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A cikkben egy háztartási méretű kiserőmű méretezését és tervezését mutatjuk be. A beruházás a családi ház energiahatékonyságának korunk elvárásainak megfelelő szintre való emelésével járul hozzá annak költséghatékony működéséhez. A tervezés során figyelembe vettük a családi ház infrastrukturális környezetét, tájolását, a rendelkezésre álló fázisszámot, a tetőfelületet és annak dőlésszögét, valamint az esetleges kitakarások jelenlétét is. A napelemes rendszer gazdasági vonatkozásait is elemezzük, figyelembe véve a háztartás ismert éves és jövőbeli beruházásokkal tervezett fogyasztását, valamint a beruházási költségeket. Majd az ezekből adatokból számítható megtérülési időt vizsgáljuk meg, figyelembe véve a 2022 októberéig érvényes szabályozási háttérrel is (a 413/2022. (X. 26.) rendelet értelmében a 2022. október 31. előtt az egyetemes szolgáltatóknak benyújtott igénybejelentések alapján kivitelezett háztartási méretű kiserőművek táplálhatnak csak be a közüzemi hálózatba, valamint a 259/2022. (VII. 21.) Kormányrendelet értelmében 2022. augusztus 1-jétől a lakossági fogyasztó az egyetemes szolgáltatótól 2.523 kWh/év/mérési pont fogyasztásig a villamos energia egyetemes szolgáltatás árképzéséről szóló miniszteri rendeletben meghatározott áron jogosult villamos energiát vételezni).

Kulcsszavak: háztartási méretű kiserőmű, napelemes rendszer, hálózati betáplálás, megtérülési idő, tervezés

Abstract: In the paper the sizing and design of a household-sized small solar power plant is presented. The investment contributes to its cost-effective operation by increasing the energy efficiency of the family house to a level that meets the expectations of our time. During the planning, the infrastructural environment of the family house, its orientation, the available number of phases, the roof surface and its angle, as well as the presence of possible coverings are taken into account. The economic aspect of the photovoltaic system is also analysed, considering the known annual and the planned with future investments consumption of the household as well as the investment costs. The payback periods that can be calculated from these data is investigated considering the regulatory background valid until October 2022 (according to the decree 413/2022. (X. 26.), household-sized small power plants implemented based on the request submitted to the universal service provider before October 31, 2022 can only feed into the public utility network as well as pursuant to the government decree 259/2022. (VII. 21.), from August 1, 2022 the residential consumer is entitled to purchase electricity from the universal service provider at the price determined in the ministerial decree on the pricing of the universal service of electricity up to a consumption of 2.523 kWh/year/measuring point).

Keywords: household-sized small power plant, photovoltaic system, feed into the grid, payback period, planning

1. BEVEZETÉS

Egyértelműen kijelenthető, hogy napjainkban trendfordulás zajlik az energiaellátásban, melynek kulcsszereplői a napenergiát használó háztartási, vagy ipari erőművek. A nap energiájának hasznosítása a kor és technológia előre haladtával, valamint a széles körben rendelkezésre álló támogatásokkal (pl. lakossági napelemes rendszerekre vonatkozó pályázat, otthonfelújítási támogatás) egyre inkább elérhető nem csak ipari, hanem lakossági alkalmazások szintjén is. Meg kell jegyezni, hogy az előbbi támogatásra történő pályázatok beadása egyelőre fel

van függesztve, az utóbbi támogatási forma pedig kivezetésre került 2023.01.01-jén, de várhatóan hamarosan ismét megnyílnak ehhez hasonló támogatási lehetőségek.

A családi és társasházak tetején létesített úgynevezett háztartási méretű kiserőművek (HMKE) tiszta, megújuló energia rendelkezésre bocsátásával segítenek a háztartások energiaellátásában. A megújuló energiaforrások minél szélesebb körű és hatékony kiaknázása a jövő egyik kulcsfontosságú kérdése. Napjainkban a tudomány és a technika fejlődésével egyre szélesebb körben és egyre nagyobb hatásokkal igyekeznek az emberiség a rendelkezésre álló megújuló energiaforrásokat kihasználni. A napelemes erőművek nem csak mikro szinten segítik a lakosság energiabiztonságát, de makro szinten is hozzájárulnak a régió fenntarthatósági törekvéseihez. A napenergia hasznosítása számos előnnyel bír, pl. folyamatosan rendelkezésre áll, kimeríthetetlen, a CO₂ kibocsátás csökkentése is megvalósul, a környezetre és az élőlényekre ártalmas gázokat és melléktermékeket nem bocsát ki. Azonban hátrányai is ismertek, pl. az energiát nem minden esetben előre eltervezhető és szabályozható módon adja le, energiatárolási nehézségek, a földrajzi egyenlőtlenségek, napsütötte órák számának ingadozása hatással van a hatásfokára, telepítése nagy helyigénnyel és élőhelyrombolással jár [1, 2, 3].

2. A NAPELEMES RENDSZEREK ÉS AZOK TÍPUSAI

A napelemek olyan berendezések, amelyek a napenergiából közvetlenül egyenáramú villamos energiát képesek előállítani, működésük alapja a fényelektromos hatás. A lakossági és ipari felhasználásban is egyre nagyobb számban alkalmazzák őket. Fejlődésük következményeként hatásfokuk egyre növekszik, míg előállítási költségük csökken. Típustól függően hatásfokuk 15-25% között mozog. Értelemszerűen a lakossági felhasználás területén, költségességük miatt nem állnak rendelkezésre még a legújabb megoldások pl.: többrétegű napelem cella technológia. A jelenleg alkalmazott napelemek döntő többsége szilícium monokristály vagy polikristály félvezetőkön alapszik, de a technológia fejlesztésére folyamatos törekvés van [1, 2].

A napelemes rendszerek típusait alapján véve a közcélú hálózattal történő kapcsolatuk alapján csoportosítjuk. Az első csoportot azok a rendszerek képviselik, melyek közvetlen összeköttetésben állnak a közcélú hálózattal. Alapvetően a villamos energia áramlásának iránya kétirányú lehet, ha a napelemek által termelt villamos energia mennyisége több, mint háztartási fogyasztók aktuális igénye, akkor a többlet energia a közcélú hálózatra táplálódik. Ellenkező esetben a hiány a hálózathoz pótlódik. Ez az ún. hálózatra tápláló napelemes rendszer. Az ilyen rendszerek telepítése áramszolgáltatói engedélyköteles. A napelemekkel termelhető villamos energia mennyisége természetesen függ a napelemek dőlésszögétől és tájolásától. Magyarországon hálózatra csatlakozó napelemes rendszerek esetén az optimális, legmagasabb hozam déli tájolás és megközelítőleg 35°-os dőlésszög alkalmazása mellett érhető el. A napelemek azonban kevésbé irányérzékenyek, az elérhető hozam csak kis mértékben csökken az optimális elhelyezéstől való eltéréssel. Ezért a napelemek elhelyezésénél nem kell feltétlenül ragaszkodni a legnagyobb hozamot biztosító tájoláshoz és dőlésszöghöz, attól el is lehet és bizonyos esetekben el is kell térni [1, 2, 3].

A második típus, a szigetüzemű napelemes rendszerek esetében nincs kapcsolat a napelemes rendszer és a közcélú hálózat között. Felépítését tekintve bonyolultabb, mint a hálózatra tápláló rendszer, hiszen, ha a termelt villamos energiát nem használjuk fel azonnal, akkor ki kell egészíteni energiatárolásra alkalmas akkumulátor teleppel és maximális teljesítményű munkapontra szabályozóval ellátott töltésvezérlővel is. A hálózatot mind a DC, mind az AC oldalon túlfeszültségvezetőkkel kell ellátni, így biztosítható a kellő védelem [1, 2, 3].

A harmadik típus szintén kapcsolatban áll a közcélú hálózattal, azonban ez a kapcsolat közvetett, ami azt jelenti, hogy az erőművek a visszawatt védelem miatt nem tudnak a közcélú hálózatra táplálni, azonban a napelemes rendszer kiesése esetén onnan tudnak vételezni. A hálózat

csak ráségít a napelemes rendszerre, így ezt hibrid napelemes rendszernek nevezzük (a kétirányú energiaáramlásra is alkalmas rendszer hazánkban még nem engedélyezett). A hibrid üzem kiválóan alkalmas szünetmentes energiaellátó rendszerek kiépítésére. Fontos, hogy a hálózat és a napelem által termelt energia nem használható fel egyidejűleg, mert a két energiaforrás között vagy kapcsolat áll fenn. Vagy az egyik, vagy a másik látja el a fogyasztót. A két forrás nem kapcsolható össze, mert az zárlatot eredményezne. A hibrid napelemes rendszerek ötvözik a szigetüzemű és a hálózatra tápláló napelemes rendszerek előnyeit. Felépítésüket tekintve minden olyan elemet tartalmaznak, amit egy hálózatra tápláló és egy szigetüzemű rendszer: napelem, töltésvezérlő, akkumulátor, hagyományos inverter. A hibrid rendszerek kiegészülnek a két be- és egy kimenettel rendelkező terhelésátkapcsoló állomással. Az egyik bemenetre a napelemes rendszer, a másikra a közcélú hálózat csatlakozik. A kimentre a fogyasztók csatlakoztatása történik. Az átkapcsoló állomás képes automatikus átváltásra a napelemes rendszer és a hálózat között. A két bemenet elsődleges és másodlagos prioritású bemenet. Amennyiben az elsődleges bemeneten megszűnik a tápfeszültség, akkor automatikusan átkapcsolja a fogyasztót a másodlagos energiaforrásra, feszültség-visszatérés esetén pedig visszakapcsol az elsődleges bemenetre. Az átkapcsolási idő típustól függően néhány száz ms-tól több másodpercig is terjed [1, 2, 3].

3. A CSALÁDI HÁZ INFRASTRUKTURÁLIS KÖRÜLMÉNYEINEK ELEMZÉSE

A háztartások esetében a napelemeket többnyire az épületek tetőfelületére szerelik fel, az invertert pedig lehetőség szerint a napelemektől nem túl messze, száraz, hűvös, jól szellőztetett helyen helyezik el. A legtöbb inverter IP védettsége a kültéri elhelyezést is lehetővé teszi. Napelemes rendszerek telepítése előtt elengedhetetlen a befolyásoló körülmények, azaz például a ház elhelyezkedésének, tájolásának, a tetőzet anyagának, dőlésszögének és a teherviselő felületnek, valamint a rendelkezésre álló fázisszámnak és minden egyéb tényezőnek az alapos felmérése, mivel ezek szignifikánsan befolyásolhatják a későbbi működést.

A családi ház 2016-ban került megépítésre, melynek során a későbbi esetleges napelemes rendszer telepítésének igénye miatt előkészítésként beépítésre került a falazatba védőcsőrendszer a tetőről érkező vezetékek részére. Az épület tetőszerkezete hagyományos fa szerkezettel készült, kontyolt nyeregtető formában, 30°-os hajlásszögben. A tető kiállása a hőszigetelés nélküli falsíktól 50 cm. A tető héjazata Bramac Római Protector típusú tetőcseréppel készült. A tetőszerkezetbe beépítésre kerül 1-1 db tetőkibúvó ablak, melyek elhelyezkedését figyelembe kell majd venni telepítés során. Az 1. ábrán láthatjuk a ház 60 m²-es tetőfelületét.



1. ábra: A családi ház tetőfelülete (forrás: Google térkép).

A tervezés első lépéseként fontos megvizsgálni, hogy a tetőszerkezet elbírja-e a napelemes rendszerünket. Ehhez előzetesen tudnunk kell a tervezett rendszerünk méretét. Esetünkben a villamosenergia-felhasználás és lehetséges többletfogyasztás figyelembevételével 15 db napelem panel telepítés valósulna meg (a következő fejezetben kifejtésre kerül ennek oka is, itt fogadjuk el ezt a keretszámot). Ebből adódóan meghatározható a napelemes rendszer tömege. A megvalósítandó tervek szerint Jinko Solar Tiger 66TR 390-410W Mono-Facial Modul P-Type panelek kerülnének fel a tetőszerkezetre. Ezek tömege 20,8 kg, így a panelek össztömege $15 \cdot 20,8 = 312 \text{ kg}$ lesz. Ehhez hozzá kell számolni még a tartószerkezet tömegét, mely nagyságrendileg 3 kg panelenként, azaz összesen $15 \cdot 3 = 45 \text{ kg}$. A teljes tömeg a két részből összesen $312+45=357 \text{ kg}$ -ra jön ki, amely az egész 60 m^2 felületen oszlik majd el. Az 1 m^2 -re vetített tömeg $357/60=5,95 \text{ kg}$ jön ki, így belátható, hogy a tető a napelemeket is el fogja bírni [4].

A tetőzet elemzése során a második fontos tényező a dőlésszög vizsgálata. Egy egyszerű ökölszabályt szoktak alkalmazni, az ideális dőlésszög meghatározására. Ennek alapján a napelemes rendszer dőlésszöge legyen egyenlő a telepítési helyszín szélességi fokával. Például Budapest az északi félgömbön helyezkedik el, ezért ott a rendszert dél felé kell tájolni, másfelől pedig Budapest az északi szélesség $47,55^\circ$ -án helyezkedik el, ezért ott célszerűen ennyinek kellene lennie a dőlésszögnek. Ilyen beállítások mellett tudná a rendszerünk a lehető legtöbb energiát megtermelni. Ezen meghatározott értéket nehéz beállítani, így általánosságban 45° -ot szoktak kiindulásként venni. Iparági standardok szerint jelenleg $30-60^\circ$ közötti dőlésszög választása is elfogadható. Ilyen esetekben viszont számolnunk kell valamennyi veszteséggel az energiatermelés során (5-8%). Esetünkben a tetőszerkezet kialakítása 30° -os, így telepítésre mindenképpen alkalmas, de számolni kell majd a már említett veszteséggel [5].

Napelemes rendszerek telepítésénél fontos kérdés még, hogy a tető melyik oldalára helyezzük a paneleket. Ideális esetben a déli oldalt választjuk. A családi ház tájolása jelen esetben dél-délkeleti, amely azt jelenti, hogy mindkét irányban számolni kell napelemek felrakásával, melyet a rendszer teljesítményigénye és a tetőfelületek nagysága tesz szükségessé. Azt mindenképpen figyelembe kell vennünk, hogy a legjobb déli irányú tájoláshoz képest a délkelet vagy délnyugat irányú telepítés kb. 5%-os veszteséget fog okozni [1, 2, 3].

További vizsgálatok során egyértelműen meghatározható volt, hogy egyéb zavaró tényezők pl.: kémény, ablak nincsenek az érintett tetőfelületen, valamint az esetleges kitakarást jelentő növényzet sincs a tervezett rendszer közelében. A rendelkezésre álló információk elemzése alapján a tetőfelület nagysága, kialakítása és tájolása teljes mértékben alkalmas napelemes rendszer telepítésére.

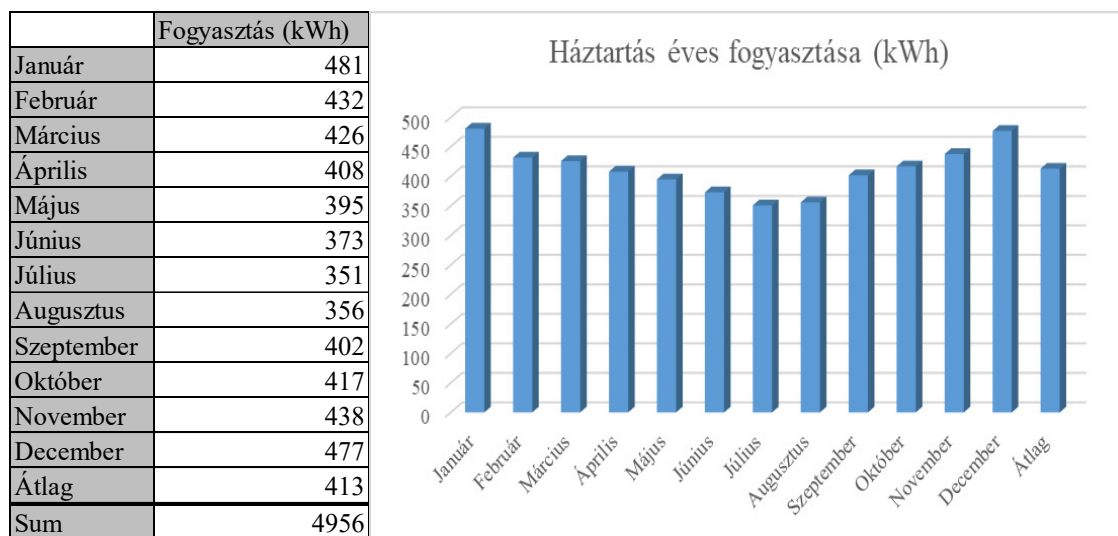
Az infrastruktúra további elemzése során szót kell ejteni a rendelkezésre álló fázisszámok vizsgálatáról. Napelemes rendszerek telepítésénél figyelembe kell venni a mindenkor hatályos jogszabályi követelményeket. Magyarországon esetünkben az Elosztói szabályzat iránymutató. A szabályzat egyértelműen meghatározza, hogy egyfázisú termelőegység $2,5 \text{ kVA}$ -ig csatlakoztatható a kisméretű hálózatra, $2,5 \text{ kVA}$ felett csak 3 fázisú csatlakoztatás megengedett. Több inverterből kialakított háromfázisú HMKE esetén a fázisaszimmetria maximum $2,5 \text{ kVA}$ lehet. A beépített berendezések csatlakozása fixen kell történnjen, bontható csatlakozás (pl. dugaszoló aljzaton keresztül) nem engedélyezett [6]. A kiserőmű tervezett teljesítményét később részletezzük, most fogadjuk el, hogy $5,705 \text{ kWp}$ lesz. Így egyértelmű, hogy a tervezett HMKE kialakítása csakis 3 fázis rendelkezésre állása esetén valósítható meg. A csatlakozási pont fizikai vizsgálata, valamint a hálózat csatlakozási szerződés elemzése során megállapításra került, hogy a jelenleg rendelkezésre álló teljesítmény vételezésre $17,25 \text{ kVA}$ azaz 3 fázis, fázisonként 25 A . Ezen rendelkezésre álló információk alapján a tervezett rendszerünk villamos csatlakozási szempontból kivitelezhető.

4. A TERVEZETT HMKE BERUHÁZÁSI ÉS MŰKÖDÉSI KÖLTSÉGEINEK, VALAMINT MEGTÉRÜLÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A telepítés előtt célszerű megvizsgálni a tervezett HMKE beruházási, működési költségeit, valamint megtérülési idejét. Elemzésünk során figyelembe fogjuk venni a jelenlegi és a jövőben tervezett esetleges többlet villamosenergia-fogyasztást is.

4.1. A HÁZTARTÁS VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÁSÁNAK ELEMZÉSE ÉS A SZÜKSÉGES MODULSZÁM MEGHATÁROZÁSA

Ahhoz, hogy ki tudjuk számolni mekkora napelemes rendszerre lesz szükségünk, figyelembe kell venni a háztartás energiaigényét. Legkézenfekvőbb megoldás, ha letöltjük a rendelkezésre álló számlákat és készítünk belőle egy éves összképet, melyet a 2. ábra mutat.



2. ábra: A háztartás éves energiaigénye.

Mint látható a háztartás éves szinten 4.956 kWh villamosenergia-fogyasztással rendelkezik, így a havi átlagfogyasztás 413 kWh, amely egy 5 fős háztartásnál, még teljesen elfogadható. A téli időszakokban tapasztalható fogyasztás emelkedése egyrészt a több otthoni tartózkodás, valamint a fűtés miatt alkalmazott elektromos rásegítésnek tudható be.

Az elektrifikáció előrehaladtával az elektromos autózás egyre inkább előtérbe kerül, így célszerű a jövőben elektromos autó töltésére alkalmas berendezést is telepíteni. A számításnál célszerű figyelembe venni ezen jövőbeni igényt is. Ehhez szükségünk van az elektromos autók átlag kWh/100 km fogyasztására és a várható havi/éves tervezett gépjárműfutasra. A számítás a következőképpen alakul:

- az elektromos autók átlag fogyasztása: 17,5 kWh/100 km [7],
- a gépjármű tervezett havi futása: 900 km,
- a gépjármű tervezett éves futása: $900 \times 12 = 10.800$ km.

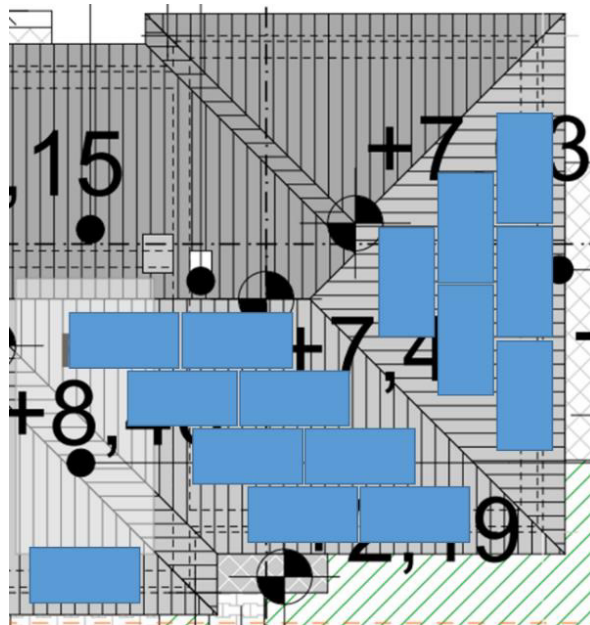
A fentiekből következően az elektromos autó várható villamosenergia-igénye éves szinten $10.800 \text{ km} / 100 \text{ km} \times 17,5 \text{ kWh} = 1.890 \text{ kWh}$. A már korábban meghatározott éves fogyasztáshoz hozzáadva ezt az értéket megkapjuk a háztartás teljes jövőbeli villamosenergia-fogyasztási értékét:

- a háztartás fogyasztása: 4.956 kWh,
- az elektromos autó várható villamosenergia-igénye: 1.890 kWh,
- a napelemes rendszer szükséges teljesítménye: $4.690 + 1.890 = 6.846 \text{ kWh}$.

A fenti számítás segítséget ad a szükséges rendszer teljesítményének és ezáltal a napelem modulok számának pontos meghatározásához. Összességében elmondható, hogy 1 kWp értékű napelemes rendszer 1200-1250 kWh villamos energiát állít elő. Ezen érték segítségével kiszámolhatjuk a szükséges beépített teljesítményt:

$$\begin{aligned} \text{Beépített teljesítmény} &= \frac{\text{Összfogyasztás}}{\text{Megtermelt energia}} \cdot 1 \text{ kWp} = \\ &= \frac{6.846 \text{ kWh}}{1.200 \text{ kWh}} \cdot 1 \text{ kWp} = 5,705 \text{ kWp}. \end{aligned} \quad (1.)$$

Ahhoz, hogy az energiaigényünket fedezhessük, így minimum egy 5,705 kWp teljesítményű rendszer telepítése szükséges, ami alapján könnyen meghatározható a modulok száma, hiszen $5,705 \text{ kWp} / 390 \text{ Wp} = 14,6$, azaz 15 db modulra lesz szükségünk (a kiválasztott panel 390 Wp teljesítményű). A 3. ábra a fenti kalkuláció alapján meghatározott napelem modulszám lehetséges elrendezését mutatja a tetőfelületen.



3. ábra: A napelemek elhelyezése a tetőfelületen.

A telepítés során szükséges a délkeleti tetőfelület kihasználása is, mely ~5% veszteséget jelent majd, míg a déli oldalon nem kell ilyennel kalkulálni. Tehát a napelemes rendszer várható villamosenergia-termelése az alábbiak szerint alakul:

- a délkeleti oldalon várható elméleti termelés: $\text{modulok száma} \cdot \text{teljesítmény} \cdot 0,95 = 6 \text{ db} \cdot 390 \text{ Wp} \cdot 0,95 = 2,223 \text{ kWp}$,
- a déli oldalon várható elméleti termelés: $\text{modulok száma} \cdot \text{teljesítmény} = 9 \text{ db} \cdot 390 \text{ Wp} = 3,510 \text{ kWp}$.
- teljes elméleti termelés: $\text{déli} + \text{délkeleti} = 2,223 \text{ kWp} + 3,510 \text{ kWp} = 5,733 \text{ kWp}$.
- a várható energiatermelés így: $\text{teljes termelés} \cdot 1.200 \text{ kWh} = 6.879,6 \text{ kWh}$.

Tehát megállapítható, hogy a tervezett 15 napelem modul alkalmas lesz a ház várható 6.846 kWh-s energiaigényének kielégítésére [8].

4.2. A HMKE BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGE

A HMKE kialakításának költsége fontos tényező a megtérülési számításoknál. Közismert, hogy a 413/2022. (X. 26.) rendelet értelmében a 2022. október 31. előtt az egyetemes szolgáltatóknak benyújtott igénybejelentések alapján kivitelezett háztartási méretű kiserőművek táplálhatnak csak be a közüzemi hálózatba. Mivel jelen esetben a telepítési igény még 2022. október 31-ét megelőzően benyújtásra került, még biztosított a hálózatra történő betáplálás lehetősége és az éves szaldó elszámolásban való részvétel. Jelen esetben tehát a kialakítandó háztartási méretű kiserőmű standard hálózatra tápláló HMKE kategóriába tartozik. Ennek megfelelően a következő építőelemek és azok költségeit kell részletezni: napelem modul, inverter, tartószerkezet, túlfeszültség-levezető, egyéb kiegészítők, mint szolár kábel, csatlakozók stb.

Korábban már említésre került, hogy a Jinko Solar 66TR 390Wp mono, félcellás, Tiger P-Type napelem modul került kiválasztásra, amely bekerülési költsége 51.252,3 Ft/db. Mivel esetünkben 15 db-ról beszélünk, így a teljes összeg 768.785 Ft. Fontos megemlíteni, hogy a Tiger P-típusú monokristályos modulok esetén a degradáció az első évben 2%, ezt követően évi 0,55% a 25 éves teljesítmény-garancia lejártáig. A garancia lejártakor a tényleges leadott teljesítmény nem lehet kevesebb, mint a névleges leadott teljesítmény 84,8%-a [8, 9].

Inverterek tekintetében a Huawei SUN2000-6KTL-M1 Hibridre esett a választás, melyre 10 év a gyártói garancia. Előnye, hogy kompakt kialakítású, beépített WiFi kezelőfelülete révén egyszerű a karbantartása és az üzemeltetése, amely okostelefon applikáció használatát és távmonitorozást is lehetővé tesz. Nagy hatékonyságú inverter topológiával rendelkezik, max. hatásfoka 98,4% és 0,1%-os meghibásodási aránya van (kiemelt előnye, hogy hibabejelentés és kivizsgálás után 3 napon belül ingyen cserélik és teljesen új invertert szerelnek be). A bekerülési költsége: 481.373 Ft [9].

A tartószerkezet alkatrészeinek segítségével történik a napelem modul rögzítése a tetőhöz. Jelen esetben tetőhorogról, profilsínről és a szükséges csavarokról, valamint rögzítő elemekről van szó [10]. Továbbá szükség lesz kiegészítő elemekre is: szolár kábelekre, a napelemes rendszerünk elemeit összekötő csatlakozókra és gondoskodnunk kell a megfelelő zárlatvédelemről is túlfeszültség levezetővel [1, 2]. A napelemes rendszerünkhöz tartozó anyagköltségeket részletesen az *1. táblázat* tartalmazza.

1. táblázat: A napelemes rendszer beruházási költsége.

| Megnevezés | | Mennyiség | Összes bruttó ár (Ft) |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|
| Jinko Solar 66TR 390Wp mono, félcellás, Tiger P-Type napelem modul | | 15 db | 768.785 Ft |
| Huawei SUN2000-6KTL-M1 Hibrid inverter | | 1 db | 481.373 Ft |
| Tartószerkezet | Schletter szerelőkeret szett 1 db napelem modulhoz | 2 db | 49.800 |
| | Schletter szerelőkeret szett 2 db napelem modulhoz | 5 db | 157.500 |
| | Schletter szerelőkeret szett 3 db napelem modulhoz | 1 db | 42.400 |
| Kiegészítők | Egyenáramú kábelek - Szolár kábel 1m 1x6 mm ² fekete | 40 m | 20.200 |
| | Egyenáramú kábelek - Szolár kábel 1m 1x6 mm ² piros | 40 m | 20.200 |
| | MC4 típusú csatlakozó készlet 3.0-6.0 szerszám- mentes | 32 db | 40.000 |
| | Túlfeszültség levezető | 1 db | 7.920 |
| Munkadíj | | - | 773.509 |
| Összesen | | - | 2.361.687 |

4.3. HOZAM ÉS MEGTÉRÜLÉSI IDŐ SZÁMÍTÁSA

A 259/2022. (VII. 21.) Kormányrendelet értelmében 2022. augusztus 1-jétől a lakossági fogyasztó az egytetemes szolgáltatótól 2.523 kWh/év/mérési pont fogyasztásig a villamos energia egytetemes szolgáltatás árképzéséről szóló miniszteri rendeletben meghatározott áron jogosult villamos energiát vételezni. Tehát a korábban meghatározásra került 6.846 kWh tervezett fogyasztásnak a jelenlegi jogszabályi körülményeket figyelembe véve lesz egy kedvezményes (rezsitámogatott) és egy lakossági piaci áras része. Ezek egységárai a 4. ábrán láthatóak. Tehát a háztartás teljes várható éves fogyasztásának költsége a 2. táblázat szerint alakul.

| ELMŰ Hálózati Kft. területén hatályos egységárak | | A1 árszabás | |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| | | Általános felhasználási célra / Egész nap | |
| | | Kedvezményes árszabás | Lakossági piaci ár |
| Villamosenergia-ár (Ft/kWh)* | | 5,110 | 31,800 |
| Rendszerhasználati díjak* | Elosztói alapdíj (Ft/csatlakozási pont/hó) | 120,5000 | 120,5000 |
| | Elosztási és átviteli díjak (Ft/kWh) | 23,4000 | 23,4000 |
| Áfával növelt elosztói alapdíj (Ft/csatlakozási pont/hó) | | 153,0350 | 153,0350 |
| Áfával növelt Ft/kWh árak | | 36,208 | 70,104 |

4. ábra: ELMŰ villamos energia díjak 2022.08.01-től [11].

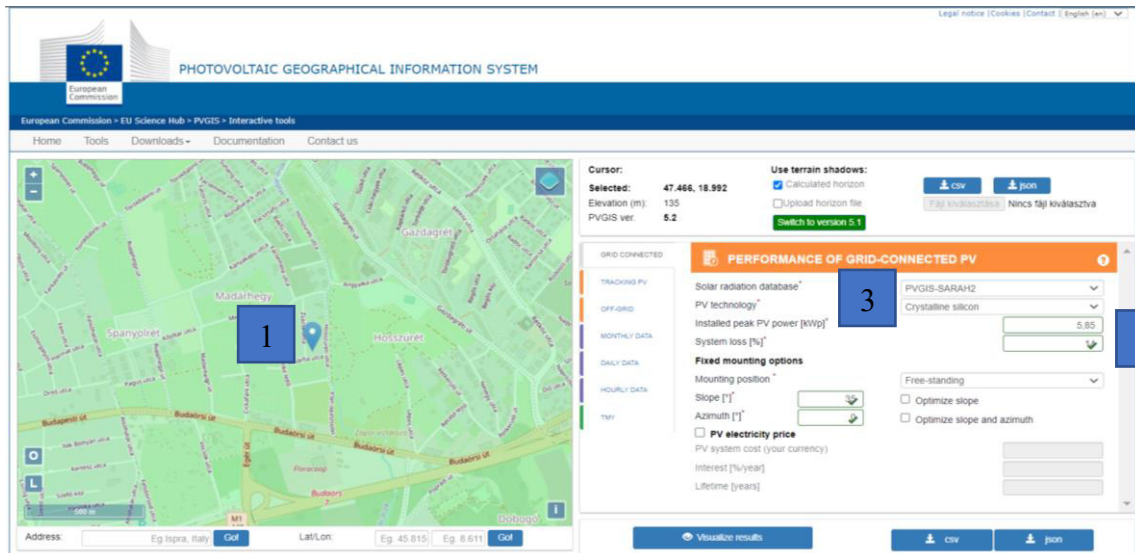
2. táblázat: A háztartás várható éves villamosenergia-fogyasztásának költségmegosztása.

| | Fogyasztás (kWh) | Árszabás (Ft/kWh) | Költség (Ft) |
|--------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Kedvezményes árszabás | 2.523 | 36,208 | 91.353 |
| Lakossági piaci árszabás | 4.323 | 70,104 | 303.060 |
| Összesen | 6.846 | - | 394.412 |

A napelemes rendszerünk bekerülési költségének és fogyasztásunk tudatában a HMKE megtérülési ideje [12, 13]:

$$\begin{aligned} \text{Megtérülési idő} &= \frac{\text{Napelemes rendszer költsége (Ft)}}{\text{Éves fogyasztás (Ft/év)}} = \frac{2.361.687}{394.412} \\ &= 5,99 \text{ év.} \end{aligned} \quad (1.)$$

Fontos megjegyezni, hogy egy esetleges állami támogatás igénybevétele esetén a ~6 év megtérülési idő csökkenhet. Ilyen támogatás várhatóan hamarosan újra elérhető lesz hazánkban. Célszerű megvizsgálni azt is, hogy a fizikálisan megvalósított háztartási méretű kiserőművünk valóban képes lesz-e az elvárt mennyiségű villamos energiát megtermelni. Ennek meghatározásához az interneten is elérhető Photovoltaic Geographical Information System oldalán található kalkulátort használtuk, melyet az 5. ábrán láthatunk [14]. A rendszerbe első lépésként meg kell adni földrajzi elhelyezkedést (1), a HMKE beépített teljesítményét kWp-ben (2) és az alkalmazott napelem típust pl.: szilícium monokristály (3).



5. ábra: A Photovoltaic Geographical Information System felülete [14].

Miután megadtuk a kezdő adatokat, a rendszer a rendelkezésére álló adatbázisból kalkulálja a várható éves hozamot és sugárzási értékeket (6. ábra). Míg előbbit 7.007 kWh-ra, addig az utóbbit 1.572,91 kWh/m²-re becsüli.



6. ábra: A napelemes rendszer várható éves hozama és napsütéses órák számának alakulása [14].

Az EU által összeállított adatbázis kalkulációja alapján arra következtethetünk, hogy a tervezett napelemes rendszer éves hozama fedezni fogja a háztartás várható villamosenergia-igényét. A másik fontos megállapítás, hogy a rendszer bekerülési költsége a jelenleg ismert szabályozási rendszer által meghatározott villamos energia díjakkal ~6 év alatt megtérül. Összességében mind termelés, mind pedig költségek szempontjából érdemes napelemes rendszerben gondolkodni.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben bemutatuk egy családi ház napelemes rendszerének tervezési lépéseit, az elvégzendő legfontosabb számításokat és az épület infrastrukturális körülményeinek vizsgálati elemeit. A korábban részletezett eredmények alapján elmondható, hogy a ház mind tetőszerkezet, mind pedig a rendelkezésre álló villamos csatlakozás szempontjából alkalmas az előzetesen tervezett napelemes rendszer telepítésére. A háztartás jelenlegi és jövőbeni energiaigényét figyelembe véve a 6.846 kWh fogyasztás kiindulási alapot adott a rendszer méretének meghatározásához. Az 5,705 kWp teljesítményű erőmű összes anyagköltségének, valamint a rendszer kivitelezési költségeinek összegzésével meghatározásra került a beruházási költség, mely 2.361.687 Ft lett. Ezek után az ismert energiaárakkal kalkulált fogyasztási költségek alapján meghatározásra került a megtérülési idő, amely ~6 évre jött ki.

Fontos megemlíteni, hogy a kiserőmű jelentős fejlesztési potenciállal bír, hiszen a jövőben tovább bővíthető. Elsősorban a lítium-ion alapú energiatárolás és az elektromos autó otthoni töltése jöhet szóba. Szerencsére a választott inverter, a Huawei SUN 2000 család része, mely alkalmas hibrid működésre, azaz támogatja hasonló márkájú Huawei LUNA 2000 akkumulátor és töltésvezérlő csatlakoztatását. A Luna 2000 HUAWEI LUNA2000 5 kWh moduláris lítium-ion akkumulátor lehetővé teszi, hogy az inverteren erre kialakított felületen párhuzamosan több modul csatlakoztassunk a meglévő rendszerre, akár 30 kWh kapacitás eléréséig. Azonban figyelembe kell vennünk az eszközök flexibilitása mellett sajnos egy nagy hátrányát is. Jelenleg

az energiátárolás rendkívül költséges. Estünkben ez bruttó 2.067.281-5.137.931 Ft között mozog, mely jelentős mértékben rontaná a telepített napelemes rendszer megtérülési idejét. Összességében elmondható, hogy bár jelentős rugalmasságot és függetlenséget nyújtana, de szignifikáns költségvonzattal is járna, így a rendszer akkumulátorral való kiegészítése egyelőre kétségesé teszi ezt a beruházást [15, 16, 17].

A háztartás energiamedzsent rendszer másik lehetséges fejlesztési iránya egy elektromos autó töltésére alkalmas berendezés elhelyezése. Ennek a megoldásnak ezért is van létjogosultsága, mivel a jövőben az elektrifikáció elterjedésével egyre relevánsabb, hogy a háztartások, saját töltő berendezéssel is rendelkezzenek. A jövőben célszerű egy elektromos autó vásárlása, mivel 2023. elején az országosan elérhető töltőhálózatok töltési költségei jelentősen drágultak, így csökkentve a benzines vagy dízel autókkal szembeni előnyüket. Mivel a vizsgált háztartásban rendelkezésre áll a 3 fázis, így érdemes olyan töltőt választani, mely ezt az infrastruktúrát képes kihasználni. A Type 2 csatlakozással ellátott töltőt kültéren lehetne elhelyezni, emiatt legalább IP55, de ha lehet IP66-os védettség szükséges. Természetesen, mint más termék esetén, itt is tág keretek között mozog a piacon elérhető töltők ára, specifikációja, kialakítása. Jelenlegi helyzetben ésszerű egy közepkategóriás eszköz választása, mely teljesíti a fenti igényeket, ilyen például Astreea - Self Standing Charger függőleges elektromos autó töltőállomás. A berendezés költsége bruttó 400.823 Ft [18, 19].

Láthatjuk tehát, hogy a napelemes rendszer bővítésénél a két opció közül az akkumulátor alkalmazása a jelenlegi helyzetben jelentős, akár 5,1 millió Ft-os többletberuházással járna, mely miatt bár később hatékony eleme lehetne rendszernek, nem éri meg telepíteni. Remélhetőleg a közeljövőben rendelkezésre fognak állni a lakosság számára is olyan támogatási lehetőségek, melyek ösztönözni tudják az ilyen rendszerek elterjedését. Ezzel szemben a másik bővítési opció, az otthoni elektromos autó töltő csak 400.000 Ft körüli összegbe kerülne, így egyszerű, költséghatékony és elérhető megoldást kínál a töltésre, amennyiben a háztartás elektromos autóra ruházna be.

Fontos megemlíteni, hogy jelenlegi ismereteink szerint az éves szaldó elszámolás 2024. január 01. hatállyal kivezetésre fog kerülni, helyette bruttó elszámolás lesz érvényben. Az éves szaldó elszámolás csak a már működő lakossági napelemes rendszereknél lesz továbbra is elérhető, a telepítéstől számított 10 éven keresztül. A kedvezőbb éves szaldó elszámolást alkalmazzák azokra a háztartási kiserőművekre is, amelyek tulajdonosai 2023. szeptember 7. éjfélig jelezték fejlesztési igényüket [20]. Ebben az esetben a kivitelés határideje 2026. január 1., így a már előkészületben lévő fejlesztések is az éves szaldóban maradhatnak tíz éven át. A 2023. szeptember 7-e után a szolgáltatóhoz beérkező újabb igényekre alapozó beruházások pedig egyégesen a bruttó elszámolásba kerülnek. Bruttó elszámolás esetén a hálózathálóból vételezett villamos energia teljes mértékben kiszámlázásra kerül a fogyasztónak, míg a hálózatba betáplált teljes villamosenergia-mennyiség után kérheti a kifizetést [21]. Ez azt jelenti, hogy havonta történik majd az elszámolás az áramszolgáltatóval a betáplált és a hálózathálóból vételezett villamos energia tekintetében. Természetesen nyári, napsütéses hónapokban sokkal több villamos energiát termel egy kiserőmű, míg a téli hónapokban pedig jóval kevesebbet, így ekkor sokkal több villamos energiát kell vételeznie a kiserőmű tulajdonosoknak a hálózathálóból. A téli vételezett energia ára jóval magasabb, mint a nyári hónapokban megtermelt, de el nem használt, így a hálózatba táplált energia eladási ára, ezért a tulajdonosok rosszabbul járnak és a HMKE megtérülési ideje kitolódik. Tehát a felhasználók motiváltak lesznek abban, hogy a saját kiserőművük által megtermelt villamos energiából minél többet felhasználjanak/eltároljanak. Összességében ezen téma komplex feldolgozásával szeretnénk volna segíteni az esetlegesen hasonló helyzetben lévő családi házak háztartási méretű kiserőmű rendszerének megvalósítását.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MÉSZÁROS, L., SCHOTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek*. Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- [2] VÉGHÉLY, T.: *Napelemes rendszerek villamos berendezései*. CSER Kiadó, Budapest, 2014.
- [3] BODNÁR, I.: *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergiatermelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. Micropress Kft., 2019.
- [4] <https://www.tiszaenergiak.hu/a-napelem-sulya-elbirja-a-tetoszerkezet/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [5] <https://innovativnapelem.hu/napelem-tajolasa.html> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [6] <https://mvmhalozat.hu/attachments/29115> (letöltés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [7] <https://b-evmobil.hu/blog/elektromos-auto-toltes-otthon-mennyivel-fog-emelkedni-a-szamlam/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [8] <https://solarity.eu/hu/blog/milyen-tipusu-jinko-solar-napelemet-erdemes-valasztania-projektjeihez/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [9] <https://solar-kit.hu/termekeink/inverterek/> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [10] https://www.napelemmarket.hu/egyeb_kiegeszito/szolar_csatlakozok (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [11] <https://ee.mvm.hu/elmu/file/downloadfile?id=daf8fc17-f774-420d-92cc-c3a82863d3b7> (letöltés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [12] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J., SZALÁNCZI, D.: *Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata*. Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022: konferencia előadások publikációi, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, pp. 119-135. 2022.
- [13] SOMOGYINÉ MOLNÁR, J.: *Szigetüzemű háztartási méretű kiserőmű (HMKE) megtérülési idejének elemzése*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 18. évfolyam, különszám, pp. 445-465. 2023.
- [14] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [15] https://www.technoform.hu/bolt/hirek/liion_akkumulatorok_elonyei/ (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [16] <https://www.homeinfo.hu/epitkezes-felujitas/gepeszet/3474-az-energiatarolas-es-az-aramhalozattol-fuggetlenedes-nezzuk-az-elonyokat-es-a-hatranynyokat.> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [17] <https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fat-attachment%2Fpdf%2Feu%2Fdatasheet%2FLUNA2000-5-15-S0.pdf> (letöltés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [18] https://autopro.hu/elemzesek/megugro-toltesi-arak-megeri-elektromos-autot-valasztani/829575_ (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [19] <https://astreea-igloo.hu/elektromos-auto-tolto> (megtekintés dátuma: 2023. augusztus 28.)
- [20] <https://444.hu/2023/09/08/visszavonulot-fujt-a-kormany-megis-marad-az-eves-elszamlolas-a-napelemes-haztartasoknal> (megtekintés dátuma: 2023. szeptember 09.)
- [21] <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=9313319> (megtekintés dátuma: 2023. szeptember 09.)

GEIGER-MÜLLER SZÁMLÁLÓ TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA

GEIGER COUNTER DESIGN AND TESTING

BOROS Rafael Ruben

egyetemi tanársegéd, ruben.boros@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46/565-111/12-20 mellék

Kivonat: A tanulmány bemutatja egy egyedi Geiger-Müller számláló cső tervezését és tesztelését. Napjainkban széleskörben alkalmazzák a Geiger-Müller számlálósöveket. Személyek és tárgyak közvetlen, gyors felületi szennyezettség mérésére a legtöbb esetben kézi műszereket használnak. A piacon kapható mérőeszközök drágák. Saját célra érdemes egyedi műszert fejleszteni, mivel sokkal olcsóbb. Ezért készült el a tanulmányban látható Geiger-Müller számláló. A radioaktív sugárzás megismerése után az elemátalakulásokat, bomlási törvényt, a cső felépítését ismerhetjük meg. Továbbá bemutatásra kerülnek a csőhöz tervezett áramkörök, ezeknek a kalibrációja más műszerek segítségével, valamint meghatározásra kerül a cső határfoka, plató feszültsége is.

Kulcsszavak: Geiger-Müller számlálóső, plató feszültség, radioaktív

Abstract: The paper presents the design and testing of a unique Geiger-Müller counter tube. Today, Geiger-Müller counter tubes are widely used. For direct, rapid surface contamination measurements of persons and objects, manual instruments are used in most cases. The measuring instruments available on the market are expensive. It is worth developing a custom-made instrument for your own use, as it is much cheaper. This is why the Geiger-Müller counter shown in this study was developed. After learning about radioactivity, we can learn about elementary transformations, the law of decay and the construction of the tube. Furthermore, the circuits designed for the tube and their calibration using other instruments will be presented, as well as the tube efficiency and plateau voltage will be determined too.

Keywords: Geiger-Muller tube, plateau voltage, radioactive

1. BEVEZETÉS

Napjainkban széleskörben alkalmazzák a Geiger-Müller számlálósöveket. Személyek és tárgyak közvetlen, gyors felületi szennyezettség mérésére a legtöbb esetben kézi műszereket használnak. A műszerekbe béta-számlálásra leggyakrabban nagyfelületű végablakos Geiger-Müller számlálót (egyet vagy többet) vagy alfamérésre ZnS(Ag) szcintillátort építenek be. Ezekkel a detektorokkal lehetővé válik tárgyak vagy személyek felületi szennyezettségének gyors és hatékony mérése [1-3]. Felületi szennyezettség mérésének megkezdése előtt háttérmerést szokás végrehajtani tiszta térben, hogy a gamma-háttérsugárzás ne befolyásolja a mérést. Ezzel az eljárással az a probléma, hogy a mérés közben a gammaháttérsugárzás nem feltétlenül állandó, különösen akkor változhat, ha például egy nukleáris baleset következtében a gammaháttérsugárzás megemelkedik vagy egyszerűen a mérés környezetében forrásokat mozgatnak, kezelnek. Az ilyen emelkedett gamma-dózisteljesítmény mellett történő gyors és pontos felületi szennyezettség mérése mindig is kihívások elé állította a szakembereket. Ennek a mérési feladatnak az elvégzéséhez két műszer együttes alkalmazása a legcélravezetőbb: egy gamma-dózisteljesítmény távadó, valamint egy béta- és gamma-detektor [1]. A gamma-dózisteljesítmény távadó által folyamatosan mért levegőben elnyelt gamma-dózisteljesítménnyel kompenzálni lehet a béta- és gamma-detektor által regisztrált összegzett béta- és gamma-sugárzás ^{137}Cs ekvivalens dózisteljesítményt, végeredményül a béta-felületi szennyezettséget meghatározva [3-6].

Az alábbi kutatásban a béta- és gamma detektor tervezését, mérését, tesztelését ismerhetjük meg, egy SBM-20 Geiger Müller csőre alkalmazva.

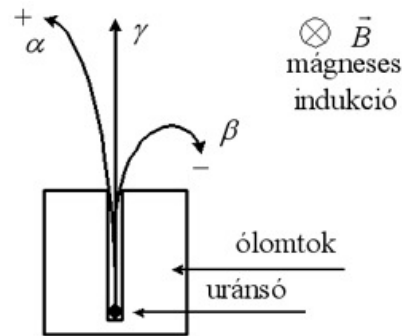
2. RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS

Rutherford 1911-ben arra a következtetésre jutott, hogy az atom pozitív töltését hordozó anyag nagyon kicsi helyre összpontosul, ezt nevezte atommagnak (nucleus). Az atommagban pozitív töltésű protonok és semleges neutronok találhatóak. A protonok számát Z -vel jelöljük, és rendszámnak nevezzük. A rendszám hármassal bír: a periódusos rendszerben az elem sorszáma, a protonok száma (és így az atommag töltése e egységekben mérve), és az elektronok száma a semleges atomban. A tömegszám A , megmutatja, hogy az illető atommag tömege közelítőleg hány-szorosa a proton (és így a neutron) tömegének. A mag Z számú proton mellett $N = A - Z$ számú neutronot tartalmaz. Adott Z esetén N változhat, ezeket nevezzük izotóp atommagoknak. A térfogat arányos a tömegszámmal, így a magsűrűség, a nukleonok számsűrűsége állandó, a nagyobb magok ugyanolyan sűrűk, mint a kisebbek [7].

Becquerel 1896-ban fedezte fel, hogy bizonyos anyagok minden külső behatás nélkül sugárzást bocsátanak ki, pl. az uránsó közelében a fotolemez megfeketedik. A későbbi vizsgálatok során megállapították, hogy ez a sugárzás mágneses mezőben három különböző természetű részre bomlik fel (1. ábra) [7]:

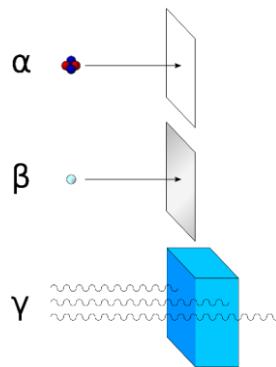
- α -sugárzás: Az alfa-részecske (α -sugár) hélium atommag, mely 4 nukleonból áll, 2 protonból és 2 neutronból (${}^4_2\text{He}^{2+}$). Így kétszeres pozitív töltésű héliumion, melynek a tömegszáma 4. Ezért, ha egy α -részecske távozik az atommagból, új elem jön létre, melynek a tömegszáma 4-gyel, a rendszáma 2-vel kevesebb. Ez az elem a periódusos rendszerben 2 hellyel balra található. A magátalakuláskor kilökött α -részecskének 10.000 – 30.000 km/s a sebessége. Útjuk során, normál légköri nyomáson, a levegő részecskéivel ütközve ionizálják azt, centiméterenként néhány-szor 10.000 ionpárt létrehozva. A részecskék energiájára általában a pálya hosszából (1–7cm) következtethetünk, mely általában jó közelítéssel centiméterenként 1 MeV energia ($1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ MJ}$). Az alfa-sugárzás áthatoló képessége igen kicsi. Egy vékony papírlap, alufólia, vagy az emberi bőr is könnyen elnyeli, így csak a véletlenül lenyelt, vagy belélegzett α -sugárzó veszélyes, mert közvetlenül az élő sejteket bombázva, elváltozásokat, rákosodást okozhat [2].
- β -sugárzás: a béta-részecske elektron, melynek a tömege igen kicsi, az α -részecske tömegének közel 8 ezred része. A β -részecskék sebessége széles tartományban mozog, elérhetik a fénysebesség 99%-át is. Ionizáló képességük kicsi, levegőben centiméterenként 50 – 100 iont hoznak létre. A sugárzás energiája 0,01 – 4 MeV. A β -bomlás során a magban egy neutron protonná alakul, miközben az atommag egy elektront bocsát ki. A rendszám (Z) eggyel nő ($Z+1$), a tömegszám (A) változatlan marad. Így az új elem a periódusos rendszerben egy hellyel jobbra lévő lesz. Pozitív béta-bomlásnál egy neutron keletkezik egy protonból, és egy pozitront lök ki az atommag. A β -sugár áthatoló képessége nagyobb az α -sugárnál. Vastag papírlapon, méter vastag levegőrétegen, alufólián, vagy az emberi bőrön is át tud hatolni a néhány cm mélyen lévő szövetekig [7].
- γ -sugárzás: a gamma-sugár a röntgen-sugaraknál is nagyobb energiájú elektromágneses hullám, melynek a hullámhossza $5 \cdot 10^{-11}$ és $5 \cdot 10^{-13}$ méter közé esik. A kvantum energiája akár a látható fény energiájának a millió-szorosa is lehet (0,1–6 MeV). Sebessége a fénysebességet közelíti, amely kb. 300.000 km/s a levegőben. Ionizáló hatása a legkisebb, kb. 10.000-red része az alfasugarakénak. Gamma-sugárzás akkor jön létre, amikor az

atom valamilyen bomlás után még gerjesztett állapotban van, és ezt egy vagy több gamma-fotonok formájában adja le. Ebben az esetben nem változik sem a rendszám, sem a tömegszám, csak a mag energiája. A gamma-sugár kibocsátása tehát nem változtatja meg az atommag összetételét. A γ -sugár töltéssel nem rendelkezik, ezért áthatoló képessége a legnagyobb. Képes áthatolni betonfalon, centiméternél vastagabb ólomlemezben, több száz méter levegőn. Árnyékolása megfelelő vastag ólom, vas, vagy beton réteggel, fallal lehetséges [7].



1. ábra: A radioaktív sugárzás komponenseinek viselkedése mágneses mezőben [8]

A radioaktív sugárzás komponenseinek elnyelődését szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: A radioaktív sugárzás komponenseinek elnyelődése különböző anyagokban (papír, fémlemez, vastag ólom) [8]

3. ELEMÁTALAKULÁSOK

3.1 ALFA-SUGÁRZÁS

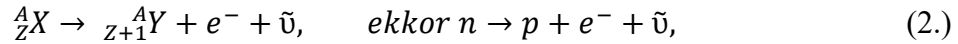
A radioaktív sugárzás kibocsátásakor általában elemátalakulás jön létre, α -sugárzás esetén a bomlás [8]:



Ez azt szimbolizálja, hogy ha egy tetszőleges A tömegszámú és Z rendszámú atommag α -bomlással bomlik, akkor egy másik Y elem atommagja és egy héliumatommag keletkezik, és a tömeg- és töltésmegmaradásnak megfelelően Y tömegszáma 4-gyel, rendszáma 2-vel kisebb, mint az X -é volt [8].

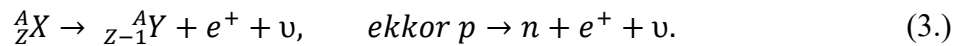
3.2 BÉTA-SUGÁRZÁS

A β -bomlásnak két fő fajtája van, a β^- és β^+ , aszerint, hogy elektron vagy pozitron keletkezik. Utóbbi az elektron antirészecskéje, minden tulajdonsága megegyezik az elektronnal, csak a töltése ellentétes. β^- -bomlás [8]:

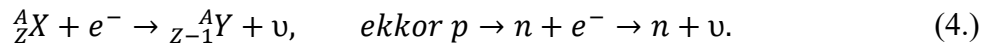


ahol $\bar{\nu}$ egy antineutrínó (töltés nélküli elemi részecske, amely szinte semmivel nem hat kölcsön és így nagyon nehéz kimutatni. Itt a tömegszám nem változik, a rendszám eggyel nő, vég eredményben egy neutron alakul át protonná és egy elektronná, utóbbi az antineutrínóval együtt hagyja el az atommagot [8].

A β^+ -bomlás hasonló, de ott pozitron és neutrínó keletkezik [8]:



A pozitron szintén elhagyja az atommagot, de mihelyt találkozik egy elektronnal, vele ütközve egymást kölcsönösen megsemmisítik (anyag és antianyag), energiájuk leggyakrabban két nagyenergiájú γ -foton formájában szabadul fel [8]. A β^- -bomlásokhoz soroljuk az ún. elektronbefogást is [8]:



Ekkor a legnagyobb energiájú proton, az elektronburokból (leggyakrabban a legbelső K-héjról) befog egy elektront és neutronná alakul egy neutrínó kibocsátása mellett. Az elektronbefogás a β^+ -bomláshoz hasonlóan relatív protontöbblettel rendelkező magokra jellemző. Az atommagok bizonyos százaléka elektronbefogással, a többi pedig β^+ -bomlással jut az alacsonyabb protonszámú állapotba. A természetben a β bomlások közül a β^- -bomlás a leggyakoribb [5].

3.3 GAMMA-SUGÁRZÁS

A γ -bomlás esetében nincs elemátalakulás [8]:



A csillag azt jelenti, hogy az atommag gerjesztett állapotban van, vagyis lehetséges kisebb energiájúnál magasabb állapotban. Ekkor az energiaminimum elve miatt az atommag leadja a fölös energiát, mégpedig gamma foton formájában [4].

3.4 BOMLÁSI TÖRVÉNY

A radioaktív bomlás spontán (magától végbemenő) folyamat, annak a valószínűsége, hogy a vizsgált anyag egy atommagja adott idő alatt elbomlik, teljesen független az életkorától, a radioaktív bomlás nem öregedés eredménye, hanem véletlen jelenség. Ezért a törvények is csak nagy átlagban érvényesülnek, statisztikai jellegűek [8].

Tegyük fel, hogy kezdetben van N_0 darab ugyanolyan atomunk, ahol N_0 nagy szám. A kis Δt idő alatt elbomlott magok száma arányos a még elbomlatlan atommagok N számával és Δt -vel [1]:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t, \quad (6.)$$

ahol a λ csak a magra jellemző állandó, bomlási állandónak nevezzük. A bomlási állandó tehát annak a valószínűsége, hogy egy adott atommag a következő másodpercben elbomlik. Az egyenletet átrendezve és dt -vel nullához tartva [8]:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N. \quad (7.)$$

A differenciálegyenlet megoldása az alábbi [8]:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (8.)$$

Tehát a bomlatlan atommagok száma exponenciálisan csökken [8].

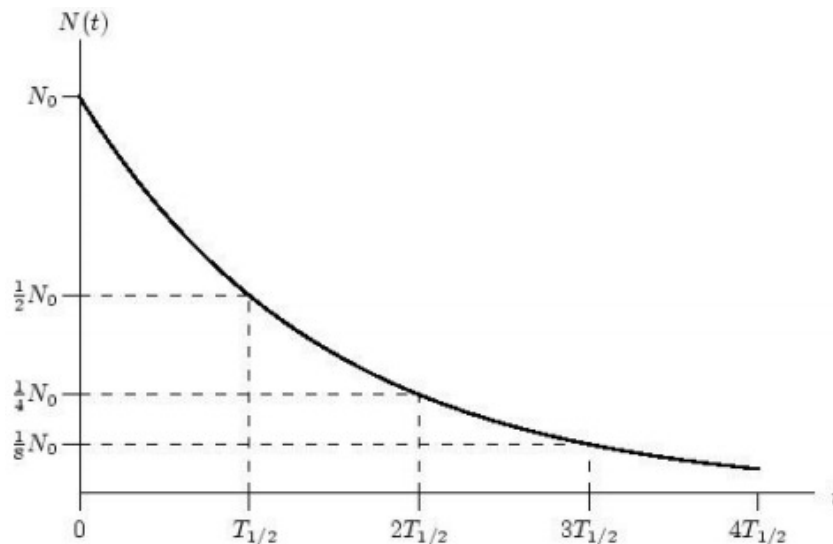
A mintában időegység alatt bekövetkező bomlások számát aktivitásnak nevezzük és A -val jelöljük [1]:

$$A(t) = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|. \quad (9.)$$

Az aktivitás SI egysége a becquerel (Bq): $1 Bq = 1$ bomlás/s. A fentiek szerint tehát az aktivitás arányos a még elbomlatlan atommagok N számával, azaz az időfüggését ugyanolyan exponenciális függvény írja le [8]:

$$A(t) = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = N(t) \cdot \lambda. \quad (10.)$$

A függvényt ábrázolva kapjuk a 3. ábrát, amely a bomlatlan magok számának az időfüggését mutatja. Azt az időtartamot, amely alatt a kezdetben bomlatlan magok fele elbomlik, felezési időnek nevezzük, jelölése $T_{1/2}$ [8].



3. ábra: A bomlatlan magok számának az időfüggése

4. A GEIGER-MÜLLER SZÁMLÁLÓCSŐ

A Geiger-Müller számlálócső (GM-cső) radioaktív sugárzások kimutatására ill. számlálására alkalmas. A számlálás a sugárzás ionizáló hatása révén történik. A GM-cső egy hengeres katódból és egy a katód tengelyében kifizített acél vagy volfrám anódszálból áll. A cső háza lehet maga a katód (vörösréz), vagy egy üvegcső. Az utóbbi esetben a katód rendszerint az üvegcső fém vagy grafit bevonata. Az ilyen GM-cső fala általában csak a gammasugárzást engedi át. A gamma-sugárzást mérő csövek esetében a cső falából kiváltott elektronok szolgáltatják a kezdeti gáz-ionizációt. Ha alfa vagy béta részecskéket is kívánunk detektálni, akkor alumínium vagy csillám-végablakos csövet kell használnunk. Az ablakvastagságot a vizsgálni kívánt sugárzás energiájának, tehát hatótávolságának megfelelően kell megválasztani.

Kisenergiájú (0,1 MeV-os) béta részecskéket, valamint alfa részecskéket számlálására kb. 2 mg/cm^2 vastagságú végablakos GM-csőket alkalmaznak. A csövet légritkítás után $12\,000 \text{ Pa}$ (90 torr)

nyomású argongáz és 1 300 Pa (10 torr) nyomású nagy molekulájú szerves vegyület (pl. alkohol) keverékével töltik meg: szerves vegyület helyett néha halogéngáz (pl. brómgőz) adalékot használnak.

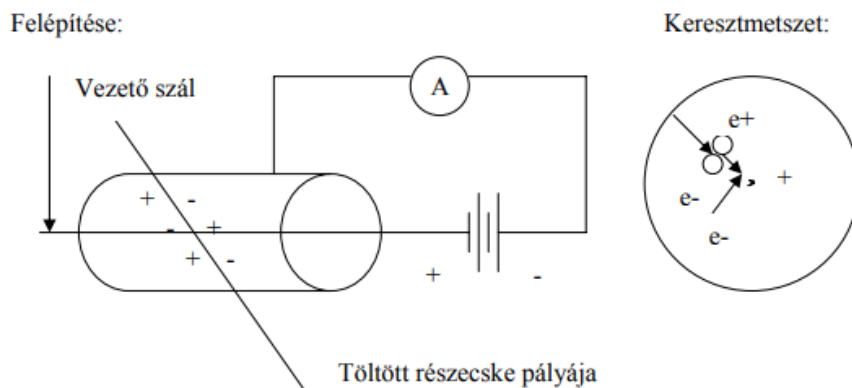
Ha a csövön áthaladó ionizáló részecske annak érzékeny térfogatában legalább egy elektron-ionpárt kelt, akkor ez a csőben egy lavina kialakulását indítja el. A nagy mozgékonyaságú elektronok az anódszál felé mozognak. A szál közvetlen közelében, attól 0,1–0,2 mm-re kialakult erős elektromos térben az elsődleges (primer) elektronok elegendő energiára tesznek szert újabb gázatomok ionizálásához. A primer és az ütközési folyamatokban keletkezett elektronlavina kb. 10^{-7} s alatt fut fel az anódra; ez szolgáltatja a detektor-jelet. Az elektronütközések egy része az argon atomok gerjesztéshez vezet. Ezek legerjesztődéskor ultraibolya fotonokat bocsátanak ki. A rövid hullámhosszú fotonok fotoelektromos hatás révén újabb lavínákat indítanak el a szál közelében, és kiterjesztik a kisülést a szál egész hosszában. Az anódon kapott impulzus nagysága tehát független lesz a kezdeti ionizáció mértékétől, a kimenő - viszonylag nagy amplitúdójú- jelek csak számlálásra alkalmazhatók, spektrometriai célra nem. A nagyobb tömegük miatt kisebb mozgékonyaságú pozitív ionok a szál környezetében pozitív tértöltést hoznak létre, amely a térerősséget a GM-küszöb alá csökkenti kb. 10^{-5} – 10^{-6} s időtartamra: ezen az ún. holtidőn belül újabb sokszorozási folyamat nem indulhat meg. Az argon-atomok legerjesztődésekor olyan, aránylag nagy hullámhosszúságú ultraibolya fotonok is keletkeznek, amelyek áthatoló képessége nagyobb. Ezek a gáztöltésen átjutva a katód felületéből váltanak ki fotoelektronokat.

A fotoelektronok közül azok, amelyek a holtidő eltelte után érkeznek az anódszál közelébe, újabb lavinát és ezzel újabb kisülést hoznak létre. Ugyanilyen következményekkel járhat a 10^{-5} – 10^{-4} s-on belül a katódhoz érkező pozitív ionok rekombinációját követő másodlagos elektron ill. ultraibolya foton kiváltása is. A tapasztalat azt mutatta, hogy fenti folyamatok következtében nagyszámú utókisülés, vagy folyamatos szikra-kisülés lép fel. Ennek megakadályozására kevernek a töltőgázhoz valamilyen nagy molekulájú szerves vegyület, pl. alkohol gőzt, amely az argon-ionoktól a töltést átveszi, és a katódon rekombinálódva az energiafeleslegtől nem elektron-emisszióval szabadul meg, hanem gyökökre ill. atomokra disszociál. Így az alkohol egy része minden kisülésben elhasználandó, ezért az argon-alkohol keverékkel töltött GM-csövek élettartama véges: 10^8 – 10^{10} impulzus.

A halogéngázt tartalmazó csövek élettartama elvileg korlátlan, de itt a jel sokkal többet késik a részecske áthaladásához képest, mint az argon-alkoholtöltésű csőben, ezért pl. koincidencia mérésekhez nem használhatók. Amíg a pozitív tértöltés-felhő a katód felé vándorol, a térerősség az anódszál közelében fokozatosan növekszik. Amíg ez a GM-küszöböt el nem éri, a cső újabb ionizáló részecskét nem tud jelezni (holtidő). Ez az idő 100–300 μ s körüli érték. A GM-küszöbnél nagyobb térerősség esetén a keletkező impulzus amplitúdója a pillanatnyi térerősségtől függ; maximumát akkor éri el, amikor a pozitív ionok eléri a katódot. Ebben a második un. regenerálódási időszakban a normálisnál kisebb impulzusok keletkeznek. A GM-csőhöz csatolt elektronikus erősítő csak egy minimális amplitúdónál nagyobbat tud érzékelni. Meg kell tehát különböztetni a számlálócső holt-idejét (τ) és az egész számláló-berendezés feloldási idejét (κ) Ez utóbbit az a legrövidebb időt értjük, amelyen belül egymást követően beérkező két részecskét a berendezés még külön regisztrálni képes; gyakorlati szempontból ennek az ismerete a fontosabb.

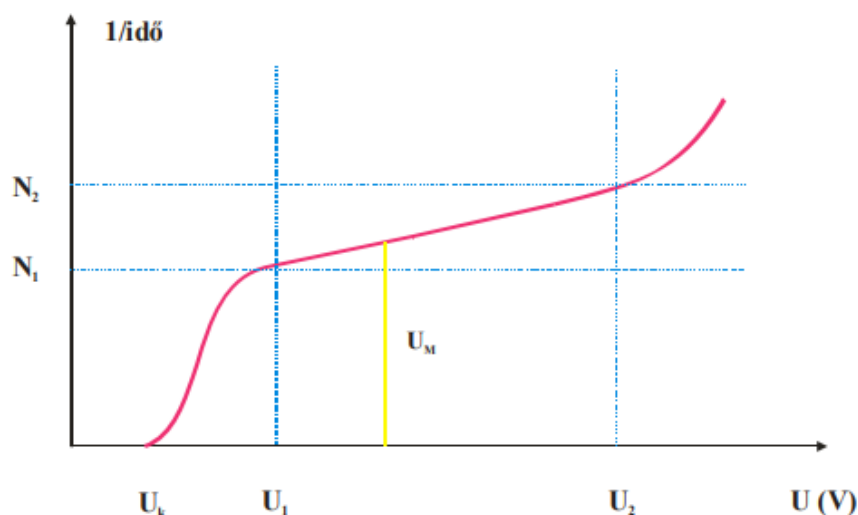
A GM-csőben egy lavina-folyamatban kb. 10^8 számú elektron-ion pár képződik, ezek a 10^6 – 10^{11} ohm nagyságrendű ellenálláson néhány tizedvoltage, 10^{-4} s időtartamú negatív feszültségimpulzust hoznak létre, amelyet tovább erősítve az elektronikus számlálószervezetbe vezetjük.

A 4. ábrán láthatjuk a Geiger-Müller számlálócsőhöz tartozó elvi mérőáramkört. A cső anód-katód kivezetései közé egy néhány száz voltos egyenfeszültségű tápegységet szükséges kötni, majd, amikor a cső detektál, áramimpulzus jön létre. Az áramimpulzust méri egy ampermérő.



4. ábra: A Geiger-Müller cső alkalmazása

A csőre adott feszültséget növelve, egy U_k küszöbfeszültségnél megindul a szál közelében a lavinaképződés, és - a közelben levő radioaktív forrás, valamint a háttér sugárzás hatására - a cső számlálni kezd. A feszültséget emelve a számlálási sebesség növekszik, majd széles intervallumban közel állandó marad. Ha a számlálási sebességet a feszültség függvényében ábrázoljuk, az 5. ábrán látható karakterisztikát kapjuk.



5. ábra: A számlálási sebesség a feszültség függvényében

Az U_1 , U_2 feszültségtartományt nevezzük a GM-cső platójának, amely állandó radioaktív forrásereőség mellett is kis emelkedést mutat (utókisülések, a szál aszimmetriája stb.). A számlálócövet akkor tekintjük jónak, ha a plató legalább 150-250 V hosszúságú és meredeksége legfeljebb $S=2-5 \text{ \%}/100 \text{ V}$.

A meredekséget kísérletileg (az 5. ábra jelölésével) az alábbi összefüggésből határozzuk meg:

$$S = 100 \frac{\frac{N_2 - N_1}{N_1}}{\frac{U_2 - U_1}{100}} \left(\frac{\%}{100V} \right). \quad (11.)$$

Az U_2 feszültség felett hirtelen növekedni kezd az impulzusszám és végül állandó korona-kisülésbe megy át a cső. Mind az álszámlálások, mind az állandó kisülés nagyszámú kioltógáz

molekulát disszociál, ami egyben a számlálósó élettartamának csökkenését, karakterisztikájának megváltozását okozza.

5. A DÓZIS

Az ionizáló sugárzások károsító hatásainak számszerű jellemzésére használjuk a dózismennyiségeket. A sugárvédelmi gyakorlatban többféle dózismennyiség használatos. A következőkben ezek ismertetése mellett röviden megmutatom a dózismennyiségek közötti kapcsolatokat is. Az ionizáló sugárzások felfedezésével egyidős az a felismerés, hogy e sugárzások károsak az ember szervezetére. A következőkben megismerkedünk a sugárkárosodás biológiai alapjaival, ehhez szükségünk lesz a sugárzás mennyiségének számszerű jellemzésére. Erre szolgálnak a dózismennyiségek. Ha a szervezetet sugárzás éri, a sejteket alkotó anyagok és a sugárzás között az előzőekben tárgyalt kölcsönhatások alakulnak ki; ezt a továbbiakban fizikai hatásnak nevezzük. A sejtekben bonyolult kémiai kötések találhatók. A fizikai hatás eredménye általában kémiai hatás, az élő szervezetben biokémiai hatás, amelynek során a kémiai kötésekben strukturális változások jelentkeznek. Ezek a változások kihatnak részben a károsodást szenvedett sejtre és ezen keresztül a szervezet egészére. Végző soron bekövetkezik a biológiai elváltozás.

A szervezet biológiai elváltozásának várható mértéke összefüggésben van a szervezetet ért sugáradaggal, a dózissal. Mivel bonyolult élettani folyamatokról van szó, érthető, hogy a sugárvédelem gyakorlatában több dózismennyiség terjedt el. E mennyiségek egy része a fizikai hatások alapján értelmezhető (elnyelt dózis, besugárzási dózis), míg a szervezetben végbemenő bonyolult biológiai folyamatokat is igyekszik figyelembe venni az egyenérték dózis és effektív dózis, amelyek a sugárvédelemben elsődleges jelentőséggel bíró dózismennyiségek.

A sugárzás és az anyag kölcsönhatása során a sugárzásból energia nyelődik el az anyagban, kézenfekvőnek látszik tehát a sugárzás mennyiségét a tömegegységben elnyelt sugárzási energiával jellemezni. Ennek megfelelően definiáljuk az elnyelt dózist:

$$D = \frac{dW_e}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dW_e}{dV}. \quad (12.)$$

A D az elnyelt dózis, W_e a sugárzásból elnyelt energia, m az elnyelő anyag tömege. A dózis definíciója:

$$[D] = [energia] / [tömeg] = 1 \text{ joule} / 1 \text{ kg} = 1 \text{ Gy (gray)}. \quad (13.)$$

A gyakorlati tapasztalatok azonban felhívják a figyelmet arra, hogy az emberi szervezet várható sugárkárosodásának mértéke nem kizárólag a testszövetben elnyelt dózis nagyságától függ. Ha ugyanis pl. γ -sugárzás és neutronsugárzás biológiai hatásait tekintjük, azonos testszövetben elnyelt dózis esetén nagyobb károsodás származik a neutronsugárzás hatására, tehát a szervezet érzékenysége eltérő más-más ionizáló sugárzásokkal szemben. Ezért szükséges az egyenérték dózis fogalmának a bevezetése; valamely ionizáló sugárzásnak a H_T egyenérték dóziséban az alábbi mennyiséget értjük:

$$H_T = D \cdot w_R, \quad (14.)$$

ahol D a T („tissue”) testszövetben az elnyelt dózis, w_R pedig az ionizáló sugárzás fajtájától függő ún. minőségi tényező (sugárzási súlytényező). A w_R minőségi tényező dimenzió nélküli szám, így az egyenérték dózis SI-egysége energia/tömeg jellegű mennyiség. Az elnyelt (fizikai) dózistól való megkülönböztetés céljából ennek az egységnek külön nevet adtak: az egyenérték dózis SI-egysége a sievert (Sv):

$$[H] = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy (ha } w_R = 1). \quad (15.)$$

Béta és gamma sugárzásra (mivel azokra $w_R=1$) tehát a gray-ben mért elnyelt dózis és a sievert-ben mért egyenérték dózis mérőszámok egyeznek, alfa sugárzásra ($w_R=20$) és neutronokra ($w_R=5-20$ az energia függvényében) azonban nagyon eltérnek.

6. VILLAMOS ÁRAMKÖR MEGVALÓSÍTÁSA A GM CSŐHÖZ

Olyan berendezés építése a cél, amiben egy programozható mikrovezérlő dolgozza fel egy erősítőn keresztül a GM cső által kiadott impulzusokat és kijelzőn megjeleníti a mért impulzus-számot, különféle mérési időtartományokban. A sugárásmérő készülék helyes megtervezéséhez szükséges első körben ismerni a GM cső adatait.

6.1 A FELHASZNÁLT CSŐ TÍPUSA, PARAMÉTEREI

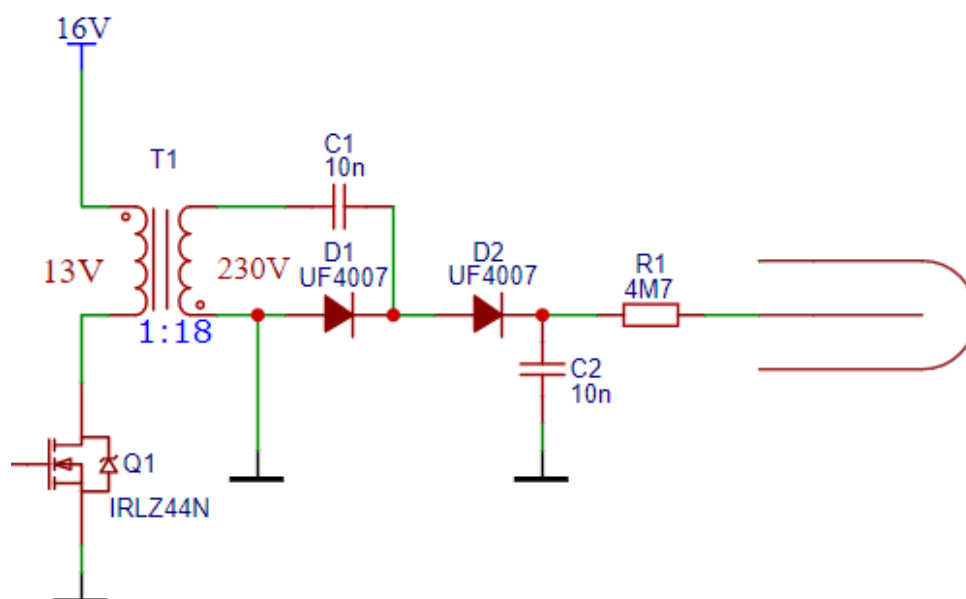
Az általam felhasznált cső típusa SBM-20. Ez egy olcsó GM cső, amelyet gamma-sugárzás detektálására tervezték. Ennek a csőnek az adatlapja látható az 1. táblázatban.

1. táblázat: SBM-20 GM cső adatai

| | |
|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Gáz töltet | Ne+Br2+Ar |
| Katód anyaga | Rozsdamentes acél, 50 μm anyagvastagág |
| Effektív hossz | 91 mm |
| Effektív átmérő | 10 mm |
| Ajánlott anód ellenállás | 5,1 M Ω |
| Ajánlott üzemi feszültség | 400 V |
| Üzemifeszültség tartománya | 350-475 V |
| Küszöbfeszültség nagysága | 260-320 V |
| Plató feszültség hossza | Legalább 100 V |
| Minimum holtidő 400 V esetén | 5 |

6.2 NAGYFESZÜLTSGŰ TÁPEGYSÉG, ERŐSÍTŐ, JELKONDITIONÁLÓ

A táblázatra hivatkozva elkészítettem egy feszültségnövelő konvertert, amely 16 V-os egyenfeszültségből 400 V-os egyenfeszültséget állít elő, majd ez 4,7 M Ω -os anódeellenálláson keresztül táplálja a GM csövet, ez a kapcsolás látható a 6. ábrán.



6. ábra: GM cső a nagyfeszültségű tápegységgel

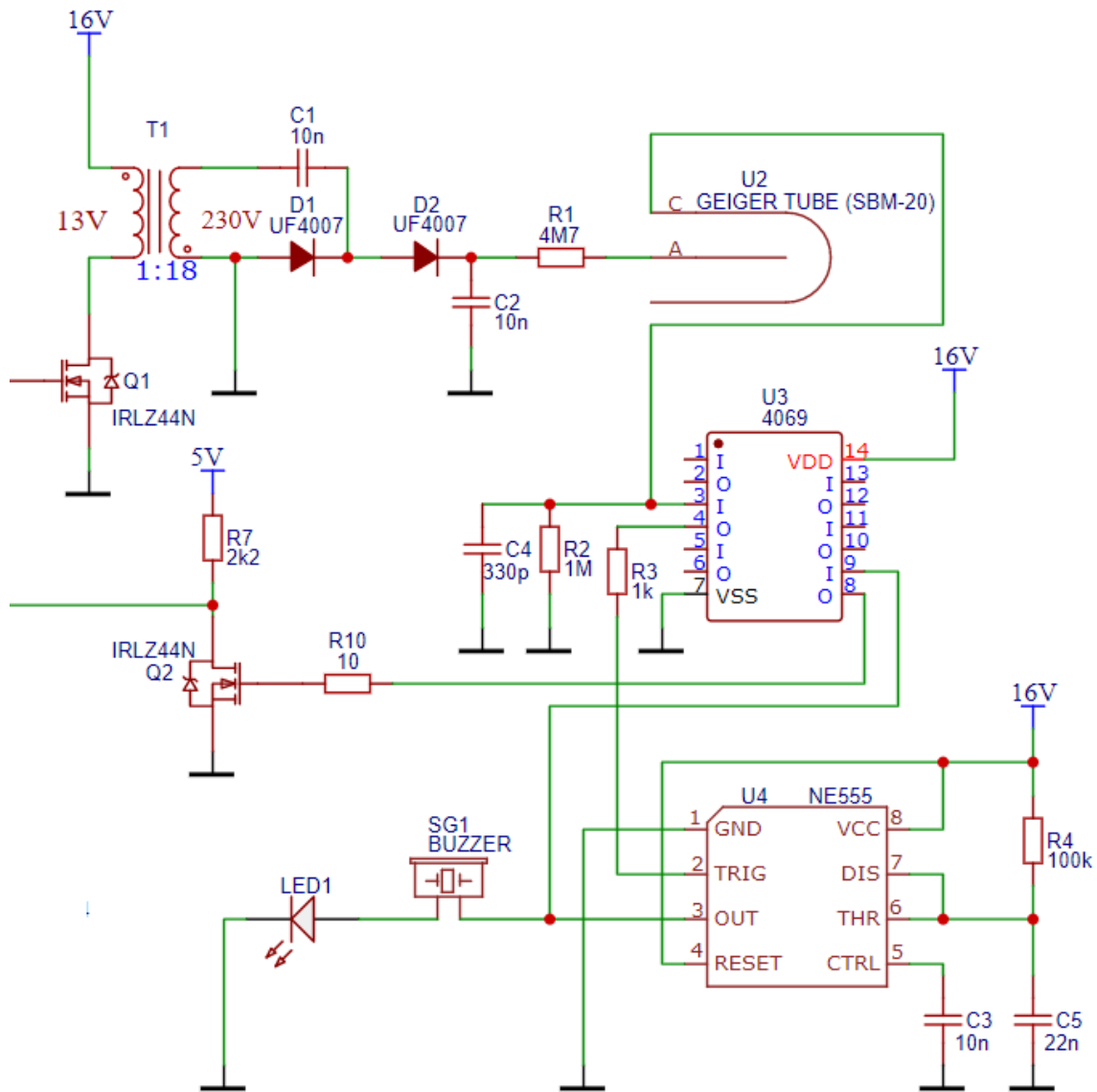
A bemeneti 16 V-os egyenfeszültségre a transzformátor primer tekercselése csatlakozik. A bemeneti egyenáramot egy MOSFET szaggat. A transzformátor szekunder tekercselésén a szaggatott bemeneti feszültség többszöröse jelenik meg (18x nagyobb). A transzformátor egy általános lágyvasas hálózati transzformátor, amelyre csak a hangfrekvenciás tartományban lehetséges feszültséget kapcsolni, előlött a vas megfelelő nagyságban nem mágnesezhető. A szekunder tekercselésén megjelenő kapocsfeszültség négyzetes középértéke még így sem éri el a 400 V-ot, ezért egy feszültségszorító kapcsolást használtam fel, amelynek a neve: Cockcroft Walton. Ez a kapcsolás a bemeneti feszültséget duplázza, a 6. ábra szerinti elrendezésben. A transzformátor kimenetén lévő váltakozó feszültséget a feszültségsokszorozó kapcsolás egyenirányítja a diódáknak köszönhetően. A C_2 jelű kondenzátor pedig a pulzáló egyenfeszültséget simítja, így konstans 400 V-os egyenfeszültség kerül a GM csőre. A MOSFET vezérlőjeleivel lehetőség van a GM csőre adott feszültség változtatására. A MOSFET-et egy mikrovezérlő kapcsolgatja.

A GM cső detektálásakor létrejövő áramimpulzust fel kell tudnia dolgozni a mikrovezérlőnek, ezért az áramimpulzus feszültséggé kell alakítani, és fel kell erősíteni egyben. Erre a célra a 7. ábrán látható áramkört terveztem meg. A GM cső katódjáról elfolyó áramimpulzust az R_2 ellenállás alakítja feszültséggé, a vele párhuzamosan kötött kapacitás pedig zavarűrés célkat valósít meg. A GM cső kapacitása néhány pF, ezért a mérőáramkör nagyon érzékeny a külső elektromos zajokra (pl. a közelben létrejövő villamos ívek). A létrejövő feszültségimpulzus egy logikai inverter áramkörön keresztül jut el egy monostabil időzítőáramkörre. Ez a monostabil áramkör a bemeneti nagyon rövid áramimpulzust egy kissé hosszabbá transzformálja és kondicionálja. A beállított időhossz az alábbiak szerint alakul:

$$t = 1,1 \cdot R_4 \cdot C_5 = 1,1 \cdot 10^5 \cdot 22 \cdot 10^{-9} = 2,42 \text{ ms.} \quad (16.)$$

Az időzítő kimeneti impulzusa triggereli a mikrovezérlő bemenetét, ekkor lefut egy megszakításhoz tartozó szubrutin, és a mikrovezérlő növeli eggyel az eltárolt értéket. Az időzítő egyúttal egy piezo kristályos csipogót is működtet, valamint LED-et villant fel. Az időzítő kimenete a Q_2 MOSFET-en keresztül jut a mikrovezérlőhöz, így a mikrovezérlő bemenetére 5 V-os négyszögjel kerül. A mikrovezérlő felfutójelet vizsgál, így igen gyorsan és pontosan képes feldolgozni az impulzusok számát.

A mikrovezérlő beépített időzítői segítségével jut a Q_1 tranzisztorra ISZM (Impulzusszélesség-moduláció) vezérlő jel. Így lehetőség nyílik a GM csőre adott feszültség változtatására, az én esetemben 288 V-tól 480 V-ig. Ennek következménye, hogy a plató közepére be lehet állítani a munkaponti feszültséget. A további kapcsolások az 1. mellékletben találhatóak meg, ahol még a tápfeszültséget előállító áramkör, kijelző, nyomógombok, mikrovezérlő, akkumulátor, ennek töltőáramköre foglal helyet. A programkód a 2. mellékletben látható.



7. ábra: A GM csőhöz tartozó erősítő-jelfeldolozó egység

6.3 MÉRÉSI LEHETŐSÉGEK, MENÜRENDSZER

A mikrovezérlő bemenetére még csatlakoznak nyomógombok, amelyek segítségével a képernyőn látható menürendszerben lehet lépkedni, különböző funkciókat lehet elvégezni. A főmenüben lehetőség van kiválasztani 1 perces, 10 perces, 20 perces, illetve folyamatos mérést, Ezek láthatóak a 8. és 9. ábrán. A főmenüben még lehetőség van a GM csőre adott feszültség változtatására, illetve a dózis faktor beállítására, amely csak dedikált izotópokhoz használható, mivel GM csővel nem lehetséges dózis mérésre. Adott izotópra, pl. Cs-137-re kiszámítható, hogy egy impulzus mennyi dózissal felel meg.



8. ábra: Főmenü első oldala



9. ábra: Főmenü második oldala

Példát láthatunk 1 percre mérésre a 10. ábrán. A mikrovezérlő egy percig számolja a beütéseket, majd kiírja az egy perc alatt mért értéket, ez a CPM. A CPM az angol Count Per Minutes jelentése. Az 1 perces és így tovább a 10 és 20 perces mérés is ismétlődik. A kijelzőn még az aktuális beütésszám (Gamma) és az eltelt idő jelenik meg.



10. ábra: 1 perces mérésre példa, háttérsugárzással

A kész készülék látható a 11. ábrán.



11. ábra: A kész áramkör a GM csővel

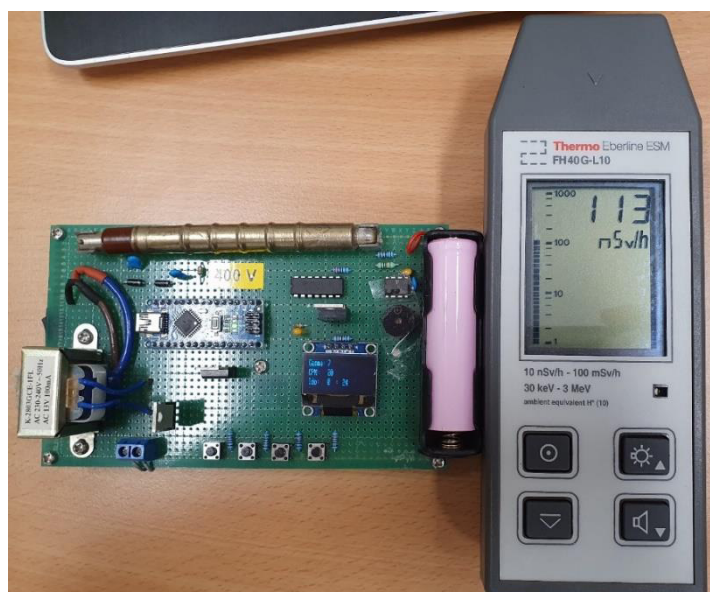
7. A KÉSZ ÁRAMKÖRREL VÉGZETT MÉRÉSEK

A készüléket elsősorban kipróbáltam különféle izotópok mérésével. Azt tapasztaltam, hogy a GM cső képes valamennyi béta-sugárzást is kimutatni, ez köszönhető az 50 μm vastagságú cső falának. Alfa-sugárzás mérésére biztosan nem alkalmas, hiszen nem képes bejutni az alfa-részecske ilyen vastagságú anyagon. A 12. ábrán láthatunk különféle izotópokat is.



12. ábra: A sugármérő és néhány különféle izotóp

A műszer képes volt gond nélkül detektálni 14.336 beütést percenként (CPM-et). Ekkor Sr-90 izotópot mértem, ami leginkább béta forrás. A műszeremet összehasonlítottam egy gyári készülékkel, amelyben proporcionális számláló is van. Ennek a műszernek a típusa látható a 13. ábrán. Ha izotópokat mértem, nem háttérsugárzást, akkor igen hasonló CPM számokat adott a két műszer.



13. ábra: A saját és gyári műszer

7.1 HATÁSFOK, 10 CM-ES MÉRÉS

A GM cső hatásfoka alatt az alábbiértjük:

$$\text{hatásfok} = \frac{\text{mért beütésszám}}{a \text{ GM - csövet elérő részecskék száma}} \quad (17.)$$

Általában a GM csövek hatásfoka gamma-sugárzás mérésekor nem haladja meg az 1%-ot, béta-sugárzás esetén pedig a 30%-ot. A GM cső hatásfokát Cs-137 izotóp sugárzása segítségével határoztam meg. Leggyakrabban ezt az izotópot szokták GM-csövek gamma hitelesítésére használni, mert közepes a gamma-energiája (662 keV), másrészt nagy az izotóp gyakorlati jelentősége. Ugyanis atombomba kísérletek, atomerőmű balesetek során nagyobb mennyiségben a környezetbe kerülhet és relative hosszú felezési ideje (kb. 30,2 év) miatt sokáig ott is marad. Az intézet Cs-137 izotópját 2003.02.04-én tokozták, ekkor 185 kBq volt az aktivitása. Az aktivitás az idő elteltével csökkent:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = 185 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{30,2} \cdot 18,25} = 121,62 \text{ kBq}. \quad (18.)$$

Tehát manapság másodpercenként 121.620 gamma foton hagyja el a sugárforrásunkat a tér minden irányába egyenletesen eloszolva. Ezeknek azonban csak töredéke halad a GM-cső irányába. Minél távolabb van a GM-cső, annál kevesebb, viszont annál homogénebb módon. Mi a csövet a forrástól 10cm távolságra tettük, a cső tengelye merőleges volt a sugárforrástól a cső közepéhez húzott egyenesre. Ekkor a cső különböző pontjainak a sugárforrástól mért távolsága 10 %-on belül volt, ami a sugárzási tér 20 %-on belüli homogenitását jelenti, amit még megfelelőnek ítéltünk. Másrészt ebben a távolságban még jól mérhető a beütés többlet, mert az még nagyságrendileg meghaladja a háttérét.

Ha 10 cm-re van a cső az izotóptól, és az izotóp pontszerűnek tekinthető, akkor az izotóptól 10 cm sugárban egy 1256,63 cm² felületű gömb rajzolható. Az egész GM cső felülete az effektív geometriai méretek alapján 9,1 cm². Következésképpen az izotópból kilépő sugárzás, csak 0,724 % eséllyel tart a GM cső felé, ez másodpercenként kb. 881 fotont jelent. Ezek el is érik a GM-csövet (kivéve azt az 1-2 fotont, amelyek már a forrás tokozásában és a levegőben megtett 10 cm-es úton kölcsön hatnak). Ennek a 880 fotonnak azonban csak töredéke hat kölcsön a GM-cső anyagával (a töltőgázzal vagy a cső falával), hisz a gamma fotonok átlagos szabad úthossza a levegőben száz méter, szilárd anyagban pedig cm nagyságrendű.

A forrástól 10 cm-re elhelyezett GM-cső átlagosan 150 CPM beütést detektált. Ebből kb. 20 CPM a háttér, ezek a jelek nem a Cs-137 izotóptól származnak. A nettó beütésszám tehát 130 CPM, ami 2,17 beütés/s-nak felel meg. A GM-cső Cs-137 izotópra számított gamma hatásfoka e kettő hányadosa, azaz 0,246 %.

$$\text{hatásfok} = \frac{\text{nettó beütésszám}}{a \text{ csövet elérő gamma fotonok száma}} = \frac{2,17}{880} = 0,246 \%. \quad (19.)$$

7.2 A GM-CSŐ KALIBRÁCIÓJA GAMMA DÓZISINTENZITÁSRA

A saját és gyári sugárzásmérőt elhelyeztem egyenlő távolságra, 10 cm-re a sugárforrástól (Cs-137). A gyári készülék 10 perc alatt átlagosan 980 nSv/h dózisintenzitást mért. Az saját készülékem pedig 150 CPM-et. A háttérsugárzás átlagosan 100 nSv/h volt, 25 CPM. Így lehetőség nyílik egy faktorialal való szorzással, hogy 1 beütésszámmal dózist feleltessünk meg, de ez csak kizárólag Cs-137 izotópra igaz. Íme a számítás:

$$980 \frac{\text{nSv}}{\text{h}} - 100 \frac{\text{nSv}}{\text{h}} = 880 \frac{\text{nSv}}{\text{h}} \text{ ennek megfelel} \quad (20.)$$

$$150 \text{ CPM} - 25 \text{ CPM} = 125 \text{ CPM}, \text{ így adódik, hogy} \quad (21.)$$

$$1 \text{ CPM} \rightarrow 7 \frac{nSv}{h}, \text{ Cs} - 137 \text{ esetén.} \quad (22.)$$

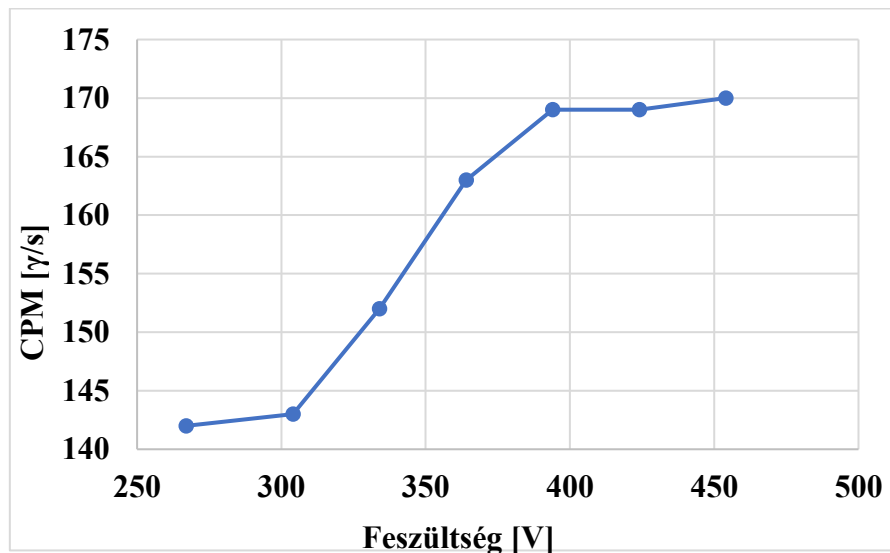
Ha a méréskor tudjuk milyen izotópot mérünk, akkor a műszerem képes a dózist is kijelezni. Ha különféle béta és gamma forrású izotópokra elvégzem a mérést, akkor azokra is érvényes az előző számítás.

7.3 MUNKAPONTI FESZÜLTSG ELLENŐRZÉSE

A 10 cm távolságból mért Cs-137 esetén változtattam a csőre jutó feszültséget, és megfigyeltem a beütések számát percenként. A mért eredményeket a 2. táblázat mutatja. Jól látható, hogy a feszültség növekedése maga után vonja a percenkénti beütésszám növekedését. A feszültség alsóhatárát 267 V-ra tudtam beállítani, 454 V felé pedig biztonsági okokból nem mentem a méréskor. A táblázatból egy grafikon is készült, amelyből a plató meredekségét meg lehet határozni. A CPM értékek többszöri mérések átlaga.

2. táblázat: A feszültség változtatásakor mért CPM

| Feszültség [V] | CPM [γ/s] |
|----------------|--------------------|
| 267 | 142 |
| 304 | 143 |
| 334 | 152 |
| 364 | 163 |
| 394 | 169 |
| 424 | 169 |
| 454 | 170 |

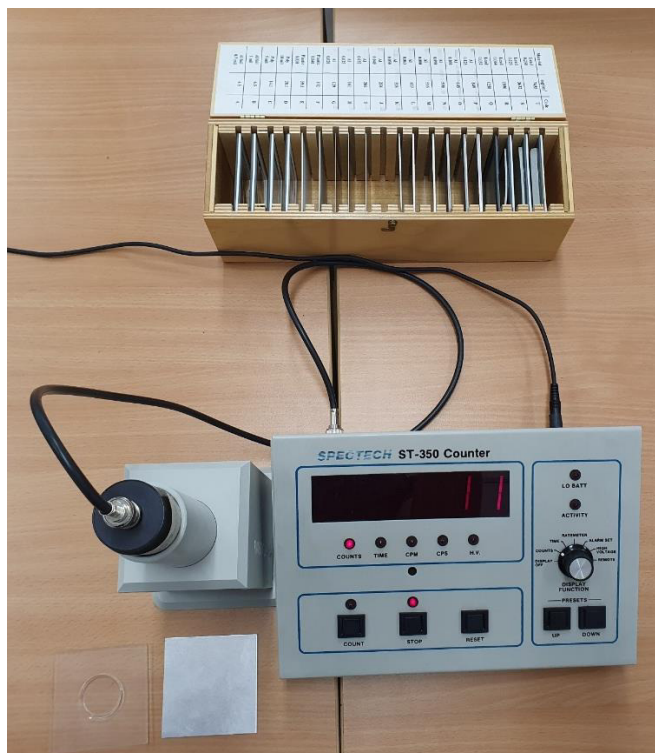


14. ábra: CPM a feszültség függvényében

Látható, hogy a grafikonról nem lehet egyértelműen megállapítani a meredekséget, mivel nem tudtam a könyöktől mérni. Az viszont látható, hogy a 400 V-os feszültség elfogadható, hiszen felette már nem növekszik a beütésszám percenként.

7.4 SPECTECH ST-350 MŰSZERES MÉRÉS

Intézetünkben található egy végablakos GM csővel rendelkező műszer, amely a 15. ábrán látható. Lehetőség van olyan mérésre, hogy a csőre adott feszültséget lehet 0 V-tól 1250 V-ig változtatni. Így a gyakorlatban ki tudtam próbálni egy mérést úgy, hogy megtudjam határozni egy GM cső plató hosszát, illetve meredekségét.

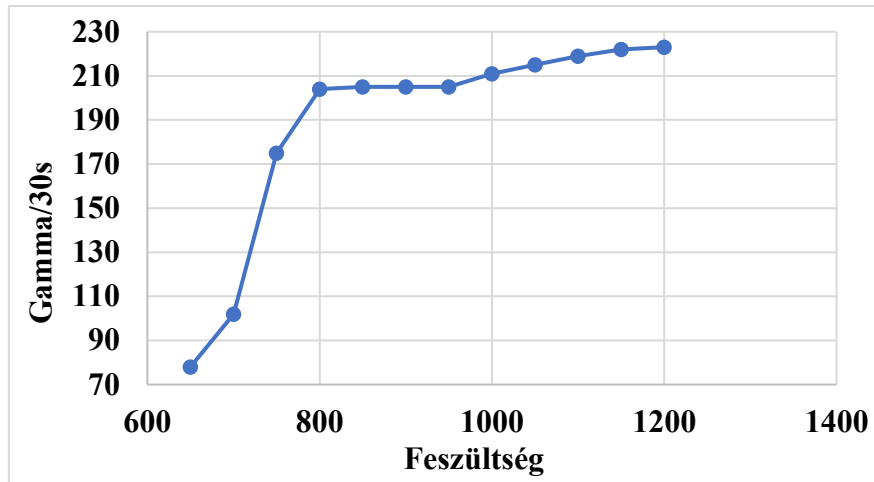


15. ábra: Spectech ST-350 műszer és különböző anyagok árnyékoláshoz

Cs-137-et helyeztem a mérőoszlopba, és fél perces mérésekkel végig pásztáztam a feszültséget. A sugárforrást ólomlemezrel leárnyékoltam, így csak gamma-sugárzás került a GM csőbe. A mérést adatokat a 3. táblázat tartalmazza, ebből egy grafikon készült, amelyet a 16. ábra mutat.

3. táblázat: A feszültség változtatásakor mért gamma/30s

| Feszültség [V] | Gamma/30s |
|----------------|-----------|
| 650 | 78 |
| 700 | 102 |
| 750 | 175 |
| 800 | 204 |
| 850 | 205 |
| 900 | 205 |
| 950 | 205 |
| 1000 | 211 |
| 1050 | 215 |
| 1100 | 219 |
| 1150 | 222 |
| 1200 | 223 |



16. ábra: A félperces mérések adatainak grafikonja

A grafikonon könnyen észrevehető, hogy a könyök 800 V-nál van. A berendezés 1200 V felé nem engedi a mérést, mivel felette már nagymértékben károsítaná a cső élettartamát. A mért értékekből meghatározható a plató meredeksége. Az eredmény az alábbiak szerint alakul:

$$S = 100 \frac{\frac{N_2 - N_1}{N_1}}{\frac{U_2 - U_1}{100}} = 100 \frac{\frac{223 - 204}{204}}{\frac{1200 - 800}{100}} = 2,3284 \% \quad (23.)$$

A kapott eredmény alapján a cső megfelelőnek tekinthető, az elvárt értéket produkálja.

8. KÖVEZTKÉZTETÉSEK

Összességében a megépített detektor jó hatásfokkal működik és hasonló beütésszámot mér, mint más eszközök. Méréssel bizonyítottam, hogy a 400 V-os feszültség megfelelő az SBM-20-as csőnek. Az eszköz alkalmas kisebb szennyezések kimutatására is.

9. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] PETRÁNYI J: *Nagy gamma-dózisteljesítmény mellett történő felületi szennyezettség mérése intelligens detektorokkal*. Sugárvédelem, 9(1), pp. 17-24, 2016.
- [2] SOLYMOSI J, BAUMLER E, GRESITS I, GUJGICZER Á, NÉMETH F, NAGY L GY, HORVÁTH L, SARKADI A: *Eljárás és kapcsolódási elrendezés radioaktív felületi szennyeződés mérésére*. Lajstromszám: 201 162.
- [3] ERDŐS J, PINTÉR I, SOLYMOSI J: *Magyar ABV védelmi technikai almanach*. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, p. 285, 2003.
- [4] SOLYMOSI J, VINCZE Á, BANA J: *The influence of the April 10, 2003 severe incident on Unit 2 of Paks Nuclear Power Plant on the nuclear safety*. Academic and Applied Research in Military Science 3(5), pp. 767-776, 2004.
- [5] HORVÁTH K, RÓNAKY J, SOLYMOSI J: *Determination of the root cause of the serious incident at Paks NPP on 10 April 2003*. Academic and Applied Research in Military Science 4(3) pp. 481-496, 2005.

- [6] VINCZE Á, RANGA T, NAGY G, ZSILLE O, SOLYMOSI J: *Environmental impact assessment of radioactive water pipe leakage at NPP Paks*. Periodica Polytechnica: Electrical Engineering 53(2), pp. 87-91, 2009.
- [7] JASIM, A. M., JASIM, B.H., BUREŠ, V., MIKULECKÝ, P.: *A New Decentralized Robust Secondary Control for Smart Islanded Microgrids*. Sensors 22, 8709. p. 23, 2022.
- [8] CSIGE I, TÓTH-BODROGI E, VÁRHEGYI A: *Sugárvédelem és dozimetria*, Paks, 2019. május 31.

A PAKSI ATOMERŐMŰ TURBÓGENERÁTORAINAK ZÁRLATI ÁRAMA

SHORT CIRCUIT CURRENT OF TURBOGENERATORS OF THE PAKS NUCLEAR POWER PLANT

JOBBÁGY Marcell

tanszéki mérnök, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A Paksi Atomerőmű első blokkja 1982 karácsonyára készült el és szinkronizálódott rá a hálózatra. Tervezésekor 30 évet írtak elő üzemidőnek, ezt azonban meghosszabbították és jelenleg 2032-ig van működési engedélye. Jelen állapotok szerint nagy valószínűséggel ismét hosszabbítani fogják az üzemidőt. 2023. október 14-én az MVM Paksi Atomerőmű ZRT. közbeszerzést írt ki 1+8 darab új turbógenerátor megvásárlásáról a régi GANZ TVV-221 típusú generátorok leváltására, így nagyobb villamos teljesítményt tudnának előállítani. Ebben a cikkben az ezzel járó villamos problémákat szeretném feltárni.

Kulcsszavak: generátor, atomerőmű, zárlatszámítás

Abstract: The first block of the Paks Nuclear Power Plant was completed and synchronised to the network on the Christmas of 1982. When it was designed, 30 years were specified for its operating life. However, this was extended, and it currently has a working permit until 2032. As it stands, another extension is expected. On 14th October 2023, the MVM NPP PLC has sent out a public procurement for the purchase of 1+8 pcs. of new turbo generators to replace the old GANZ TVV-221 generators. The new generators would allow the plant to create more electric power. The purpose of this paper is to explore the associated electrical problems.

Keywords: generator, nuclear power plant, short circuit calculations

1. BEVEZETÉS

Az 1800-as évek végén a második ipari forradalom hozta el a villamos energiát először az ipari, majd a háztartási szférába. A kohók átálltak ívkemencékre, amelyek jelentős mértékű teljesítménnyel rendelkeztek. A kiszolgálásukhoz az üzemek közelében erőműveket építettek, amelyek egymástól függetlenül, szigetüzemben működtek, teljesen eltérő villamos paraméterekkel. Később rájöttek, hogy jó lenne, ha több erőmű kooperálna, amelyek így jobb hatékonysággal működnek és az egyik kiesése esetén nem kell megszakítani a termelést. Ez addig folytatódott, amíg egész Magyarország egységes nem lett. Ezek után kerültek telepítésre a nagyteljesítményű alap és menetrendtartó erőművek, mint például Paks 1 vagy a Mátrai erőmű.

A nagy erőművek központi üzemvitele jelentős feladat, amely kihívást jelent a mérnököknek: megfelelni a változó fogyasztói igényeknek, előre több évre megtervezni a várható termelést és fogyasztást, lefoglalni az importot és a legfontosabb, hogy a szinkronból nem eshetnek ki. A naperőművek és egyéb zöld energiák bevezetésével a hálózat kiszámíthatatlanná vált és a fogyasztói oldalon történő termeléssel 70 évvel ezelőtt nem is számoltak. Ezért is fontos, hogy a villamos hálózatot ellátó erőművek biztonságosan üzemeljenek és a hálózatra biztonságosan termeljenek.

Ezeknek a biztonsági rendszereknek egy részét szeretném ebben a dolgozatban kifejteni és átszámolni.

2. ZÁRLATSZÁMÍTÁS

Az 1980-as években üzembehelyezett generátorok GANZ gyártmányú TVV-221 turbógenerátorok a 2010-es évek közepére az élettartamuk végéhez közeledtek. Emiatt az MVM Paksi Atomerőmű Zártkörűen Működő Részvénytársaság közbeszerzést indított ezeknek a generátoroknak a modernizációja, javítása és felújítása céljából. A nyertes ajánlattevő a General Electric Power Services volt, aki a nyolc generátorból öt darabot 2017-ig fel is újított [1].



1. ábra: A 2. blokkhoz tartozó egyik TVV-221. [2]

2023. október 19-én új közbeszerzési eljárás indult, új típusú, 320 MVA teljesítményű víz- és hidrogén hűtésű turbógenerátorok szállítása, beépítése és üzembe helyezése céljából. Az új turbógenerátorok hasonló alapadatokkal rendelkeznek a jelenleg meglévő társaikhoz képest, amit az 1. táblázatból olvashatunk le [3].

1. táblázat: Generátorok adatai.

| Paraméter | TVV-221 | Új |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Névleges teljesítmény (S_{NG}) | 259 MVA | 320 MVA |
| Teljesítménytényező ($\cos \varphi$) | 0,88 | 0,9 |
| Névleges feszültség (U_N) | 15,75 kV \pm 5% | 15,75 kV \pm 5% |
| Frekvencia (f) | 50 Hz | 50 Hz |
| Fordulatszám (n) | 3000 rpm | 3000 rpm |

A közbeszerzés a további paraméterekre azt írta elő, hogy az új generátor segédüzemi igénye nem haladhatja meg a meglévő generátorokét. Ebből következik, hogy legrosszabb esetben is a már működő TVV-221 turbógenerátorok adataival kell a méretezést folytatni, így az 1. táblázatban ismertetett adatok mellett a számításokhoz szükség lesz a 2. táblázatban foglaltakra is.

2. táblázat: Generátor speciális adatok.

| Paraméter | Érték |
|--------------------------------------|-------|
| Szinkron reaktancia (X_D) | 242% |
| Tranziens reaktancia (X'_D) | 22,5% |
| Szubtranziens reaktancia (X''_D) | 15,5% |
| Rövidzárási viszony | 0,52 |

2.1. AZ ÚJ GENERÁTOROK 3F KAPOCSZÁRLATAINAK SZÁMÍTÁSA

Először egy új generátoron végzem el a számolásokat. A generátor névleges statikus árama:

$$I_N = \frac{S_{NG}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{320 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 15,75 \text{ kV}} = 11,73 \text{ kA.} \quad (1)$$

A névleges impedancia a következő képpen alakul:

$$Z_G = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 11,73 \text{ kA}} = 0,775 \Omega. \quad (2)$$

A szubtranzies reaktancia:

$$X_1 = X_D'' \cdot Z_G = 0,155 \cdot 0,775 \Omega = 0,12 \Omega. \quad (3)$$

A szubtranzies reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned} U_P'' &= \sqrt{(I_N \cdot X_1 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_1 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\ &= \sqrt{(11,73 \text{ kA} \cdot 0,12 \Omega \cdot 0,9)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 11,73 \text{ kA} \cdot 0,12 \Omega \cdot 0,44\right)^2} = \\ &= 9,79 \text{ kV.} \end{aligned} \quad (4)$$

A szubtranzies zárlati áram:

$$I_z'' = \frac{U_P''}{X_1} = \frac{9,79 \text{ kV}}{0,12 \Omega} = 81,58 \text{ kA.} \quad (5)$$

A tranziens reaktancia:

$$X_2 = X_D' \cdot Z_G = 0,225 \cdot 0,775 \Omega = 0,174 \Omega. \quad (6)$$

A tranziens reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned} U_P' &= \sqrt{(I_N \cdot X_2 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_2 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\ &= \sqrt{(11,73 \text{ kA} \cdot 0,17 \Omega \cdot 0,9)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 11,73 \text{ kA} \cdot 0,174 \Omega \cdot 0,44\right)^2} = \\ &= 10,151 \text{ kV.} \end{aligned} \quad (7)$$

A tranziens zárlati áram:

$$I_z' = \frac{U_P'}{X_2} = \frac{10,151 \text{ kV}}{0,174 \Omega} = 58,34 \text{ kA.} \quad (8)$$

A szinkron reaktancia:

$$X_3 = X_D \cdot Z_G = 2,42 \cdot 0,775 \Omega = 1,8755 \Omega. \quad (9)$$

A szinkron reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned}
 U_P &= \sqrt{(I_N \cdot X_3 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_3 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(11,73 \text{ kA} \cdot 1,8755 \Omega \cdot 0,9)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 11,73 \text{ kA} \cdot 1,8755 \Omega \cdot 0,44\right)^2} \\
 &= 27,28 \text{ kV}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Az állandósult zárlati áram:

$$I_z = \frac{U_P}{X_3} = \frac{27,28 \text{ kV}}{1,8755 \Omega} = 14,55 \text{ kA}. \tag{11}$$

A maximális állandósult zárlati áram, a λ maximális értéke a VDE 0102/1 szabványból meghatározható.

$$I_{z\text{ául}} = I_n \cdot \lambda = 11,73 \text{ kA} \cdot 1,8 = 21,114 \text{ kA}. \tag{12}$$

2.2. A RÉGI GENERÁTOROK 3F KAPOCSZÁRLATAINAK SZÁMÍTÁSA

Ugyanezeket a számolásokat elvégezhetjük a jelenleg alkalmazott turbógenerátorokon.

A névleges statikus árama:

$$I_N = \frac{S_{NG}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{259 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 15,75 \text{ kV}} = 9,50 \text{ kA}. \tag{13}$$

A névleges impedancia a következő képpen alakul:

$$Z_G = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 9,50 \text{ kA}} = 0,9571 \Omega. \tag{14}$$

A szubtranzies reaktancia:

$$X_1 = X_D'' \cdot Z_G = 0,155 \cdot 0,9571 \Omega = 0,15 \Omega. \tag{15}$$

A szubtranzies reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned}
 U_P'' &= \sqrt{(I_N \cdot X_1 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_1 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(9,50 \text{ kA} \cdot 0,15 \Omega \cdot 0,88)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 9,50 \text{ kA} \cdot 0,15 \Omega \cdot 0,47\right)^2} = \\
 &= 9,09 \text{ kV}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

A szubtranzies zárlati áram:

$$I_z'' = \frac{U_P''}{X_1} = \frac{9,09 \text{ kV}}{0,15 \Omega} = 60,6 \text{ kA}. \tag{17}$$

A tranzies reaktancia:

$$X_2 = X_D' \cdot Z_G = 0,225 \cdot 0,9571 \Omega = 0,215 \Omega. \tag{18}$$

A tranzies reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned}
 U'_p &= \sqrt{(I_N \cdot X_2 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_2 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(9,50 \text{ kA} \cdot 0,215 \Omega \cdot 0,9)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 9,50 \text{ kA} \cdot 0,215 \Omega \cdot 0,44\right)^2} \\
 &= 10,160 \text{ kV}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

A tranzienst zárlati áram:

$$I'_z = \frac{U'_p}{X_2} = \frac{10,160 \text{ kV}}{0,215 \Omega} = 47,25 \text{ kA}. \tag{20}$$

A szinkron reaktancia:

$$X_3 = X_D \cdot Z_G = 2,42 \cdot 0,9571 \Omega = 2,316 \Omega. \tag{21}$$

A szinkron reaktanciához tartozó feszültség:

$$\begin{aligned}
 U_p &= \sqrt{(I_N \cdot X_3 \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + I_N \cdot X_3 \cdot \sin \varphi\right)^2} = \\
 &= \sqrt{(9,50 \text{ kA} \cdot 2,316 \Omega \cdot 0,9)^2 + \left(\frac{15,75 \text{ kV}}{\sqrt{3}} + 9,50 \text{ kA} \cdot 2,316 \Omega \cdot 0,44\right)^2} = \\
 &= 27,28 \text{ kV}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Az állandósult zárlati áram:

$$I_z = \frac{U_p}{X_3} = \frac{27,28 \text{ kV}}{2,316 \Omega} = 11,78 \text{ kA}. \tag{23}$$

A maximális állandósult zárlati áram, a λ maximális értéke a VDE 0102/1 szabványból meghatározható.

$$I_{z\text{áll}} = I_n \cdot \lambda = 9,50 \text{ kA} \cdot 1,8 = 17,1 \text{ kA}. \tag{24}$$

A fentiekben számított adatok összehasonlítását a 3. táblázatban láthatjuk.

3. táblázat: Alapadatok.

| | TVV-221 | Új |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| I_N | 9,50 kA | 11,73 kA |
| Z_G | 0,9571 Ω | 0,775 Ω |
| U''_p | 9,09 kV | 9,79 kV |
| I''_z | 60,6 kA | 81,58 kA |
| X_2 | 0,215 Ω | 0,174 Ω |
| U'_p | 10,16 kV | 10,151 kV |
| I'_z | 47,25 kA | 58,34 kA |
| X_3 | 2,316 Ω | 1,8755 Ω |
| U_p | 27,28 kV | 27,28 kV |
| I_z | 11,78 kA | 14,55 kA |
| $I_{z\text{áll}}$ | 17,1 kA | 21,114 kA |

A számolt értékeket megfigyelve, láthatjuk, hogy az új generátorok nagyobb zárlati áramot képesek szolgáltatni, mint a jelenlegiek, ezért szükségessé válhat a meglévő hálózati védelmek beállításainak módosítása.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A Paksi Atomerőmű villamos segédüzemi felújítása jelenleg is tart és bár a sajtóban nem található róla bővebb információ, a paksi látogatásom során megkérdezett, ott dolgozók közül többen is azt mondták, hogy már csak az utolsó két generátoron dolgoznak. Paks 2 még nem kapott létesítési engedélyt, talajszilárdítási és árokásási műveletek zajlanak, de fontos tudni, hogy Paks 1 legidősebb blokkjának működési engedélye 2031-ben lejár. Tehát üzemidő-hosszabbítás várható, amivel együtt létjogosultságot kap a 9 vadonatúj szinkron-generátor beszerzése is.

A számításokon jól látszik a számítások alapján, hogy nagyobb zárlati áramot tudnak alkotni az új specifikációval rendelkező generátorok. Ebből következik, hogy a túlméretezéstől függően a kivezetések vezetőkeit ill. kábeleit is cserélni kell, amely jelentős költség-növekedéssel járhat.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Műszaki Magazin, „*Műszaki Magazin*” 26. március 2017. [Online] <https://www.muszaki-magazin.hu/2017/03/26/paks-otodik-generator-felujitas/>. [Hozzáférés dátuma: 15. október 2023.].
- [2] MVM Paksi Atomerőmű Zrt., „*Turbinacsarnok*,” 21. október 2014.. [Online]. <https://atomeromu.mvm.hu/hu-HU/Sajtoszoba/Galeriak/Turbinacsarnok#gallery-10>. [Hozzáférés dátuma: 20. november 2023.].
- [3] Elektronikus Közbeszerzési Rendszer, „*Megindított eljárások*,” 19 október 2023. [Online]. <https://ekr.gov.hu/portal/kozbeszerzes/eljarasok/EKR000014412023/reszletek>. [Hozzáférés dátuma: 25. október 2023.].

FEKETETEST-SUGÁRZÁS MAGYARÁZATÁRA ALKOTOTT MODELLEK FEJLŐDÉSE

DEVELOPMENT OF MODELS TO EXPLAIN THE BLACK BODY RADIATION

KOZSELY Gábor

Ph.D., egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A modellalkotás a tudományos gondolkodásmód alapját jelenti, minden tudományterületen jelentős szerepe játszik. A kutatók ezek alapján szeretnék megoldani egy-egy a társadalmi, gazdasági, műszaki stb. problémát. A modell megalkotásához vagy kiválasztásához mindenekelőtt meg kell érteniük a vizsgált rendszer fizikáját. Érdemes általában a lehető legegyszerűbb fizikai modelltől kiindulni. Ilyenkor a geometriát a lehető legkényelmesebbre választani, kihasználjuk a szimmetriákat, a kevésbé jelentős tényezőket elhanyagoljuk, a és a lassan változó tényezőket állandónak tekintjük. Ezeknek az egyszerűsítéseknek az ellenmondásmentességét gyakran ellenőrizni kell. Erre a modellalkotási folyamatra nagyon jó példát ad a feketetest-sugárzás magyarázatára kidolgozott modellek sorozata. A tanulmány röviden összefoglalja ezeket modelleket, ismerteti azok korlátait, amely végül elvezetett a mai fizikai világgépünk kialakulásához.

Kulcsszavak: feketetest-sugárzás, Wien-féle sugárzási törvény, Rayleigh – Jeans törvény, Planck-féle sugárzási törvény

Abstract: Modelling is at the heart of scientific thinking, playing a major role in all disciplines. Researchers use them to solve a problem in society, economics, engineering, etc. To build or select a model, they must first understand the physics of the system under study. It is usually worth starting from the simplest possible physical model. In this case, the geometric is chosen as conveniently as possible, symmetries are exploited, less significant factors are neglected, and slowly varying factors are considered constant. The noncontradictory nature of these simplifications often needs to be checked. A very good example of this modelling process is the series of models developed to explain blackbody radiation. The paper briefly summarises these models, describing their limitations, which ultimately led to solve some non-classical physics problems.

Keywords: Blackbody radiation, Wien's radiation law, Rayleigh-Jans law, Planck's radiation law

1. BEVEZETÉS

Minden anyag elektromágneses sugárzást bocsát ki, ha hőmérséklete meghaladja az abszolút nulla hőmérsékletet. Ez a sugárzás a test belső energiájának elektromágneses energiává történő átalakulását jelenti. Ezzel szemben normál anyag bizonyos mértékben elnyeli az elektromágneses sugárzást. [1]

A hőmérsékleti sugárzás néhány kvalitatív tulajdonsága:

- Az energiakibocsátás széles hullámhossztartományban történik ($0 < \lambda < \infty$).
- A sugárzás intenzitása és spektrális (hullámhossz vagy frekvencia szerinti) energiaeloszlása egy adott testnél csak a hőmérséklettől függ.
- A kibocsátás (emisszió) és az elnyelés (abszorpció) folyamata egymástól független, azaz sugárzó test nem azt az energiát bocsátja ki, amit elnyelt, továbbá a testek akkor is sugároznak, ha a környezet miatt nem nyelnek el energiát.

Egy test emisszióképessége (sugárzóképesége) megadja a test, hogy a test egységnyi felületéről időegység alatt az egységnyi szélességű frekvenciatartományban kisugárzott energiát. [1 – 3]

Egy test abszorpcióképessége (elnyelőképesége) megadja, hogy a test felületére beeső $v + dv$ közötti frekvenciájú elektromágneses hullámok mekkora hányadát nyeli el.

Azt a tárgyat, amely minden hullámhosszon elnyeli az összes ráeső sugárzást, fekete testnek nevezzük. Ha egy fekete test hőmérséklete egyenletes, akkor a sugárzása jellegzetes frekvenciaeloszlással rendelkezik, amely fordítottan arányos az intenzitással, és csak a test hőmérsékletétől függ. [1 – 3]

Ez a jelenség különösen fontos, hogy bár a bolygók és a csillagok (beleértve a Földet és a Napot is), amelyek nincsenek termodinamikai egyensúlyban a környezetükkel, és nem is tekinthetők tökéletes fekete testnek, mindazonáltal a feketetest-sugárzásra felállított egyenletek jó első közelítés igazak az általuk kibocsátott energiára.

Termodinamikai egyensúly esetén az emittált és az abszorbeált energia megegyezik, ellenkező esetben a sugárzó test melegszik vagy hűl a környezetéhez képest. Kirchhoff elméleti megfontolások úgynevezett gondolat kísérletnek révén, amelynél feltételezett egy zárt üreget, amely falának legalább egy része nyelő és a fal mindenütt azonos hőmérsékleten van, abban izotróp és polarizálatlan sugárzás alakul ki, amelynek spektrális összetétele független az üreg alakjától és a falak anyagától. Ezért a sugárzó energia sűrűsége, valamint ennek spektrális eloszlása – a következőkben $u(\lambda, T)$ – kizárólag a hőmérséklet függvénye. Ez alapján a következő összefüggést állította fel; (1) egyenlet: [1; 4]

$$u_v(\lambda; T) \cdot \alpha(\lambda; T) \cdot d\lambda = \varepsilon(\lambda; T) \cdot d\lambda \rightarrow u_v(\lambda; T) = \frac{\varepsilon(\lambda; T)}{\alpha(\lambda; T)} \quad (1)$$

A fekete sugárzásra vonatkozó első mérési eredményt John Tyndall (1820 – 1893) produkálta, amikor megmérte a teljes spektrumban kisugárzott fluxust. A mérés alapján Josef Stefan (1835 – 1893) megállapította, hogy a térfogategységre jutó teljes energia (u) a hőmérséklet negyedik hatványával arányos. Erre Ludwig Eduard Boltzmann (1844 – 1906) adta az elméleti magyarázatot 1884-ben, amely szerint feltételezte, hogy a sugárzás nyomást gyakorol az üreg falára. A fénynyomás létezésének feltételezése is merőben új gondolat volt. A mai tudásunk szerint ez ugyan következik a Maxwell-egyenletekből, de ezt csak később bebizonyította Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894) 1888-ban, mérésekkel kimutatni pedig csak 1899-ben sikerült, Pjotr Nyikolajevics Lebegyev (Пётр Николаевич Лебедев; 1866 – 1912) orosz fizikusnak. [4; 5]

2. WIEN ÉS RAYLEIGH – JEANS MODELLJE

Látható, hogy a feketetest sugárzás görbeseregének kiszámítása a XIX. század végén az elméleti fizika egyik legnagyobb kihívása volt. A problémát az jelentette, hogy meg lehet adni egy $u(v; T)$, illetve $u(\lambda; T)$, energiasűrűség függvényt, amely v frekvencia körüli dv frekvencia-intervallumba, illetve λ hullámhossz körüli $d\lambda$ hullámhosszintervallumba eső kisugárzott energiaáramot adja meg. A kísérleti adatokra már rendelkezésre álltak, de pontosan illeszkedő a teljes spektrumot leíró elméleti egyenlet még nem létezett.

Boltzmann a termodinamika felől közelítette meg a problémát, feltételezte, hogy az abszolút feketetest sugárzóként működő üreg henger alakú, mozgó dugattyúval ellátott térfogatban van, és a Carnot-féle körfolyamat eredményeit alkalmazta a rendszerre. 1893-ban Wilhelm Wien (1864 – 1928) továbbfejlesztette ezt modellt, és a Doppler-effektust a mozgó dugattyú falán való visszaverődésre alkalmazva arra a következtetésre jutott, hogy az energia eloszlás csak a hullámhossz és a hőmérséklet szorzatától függhet. Ezzel Wien szűkítette a lehetséges összefüggések körét, törvényét eltolási törvénynek nevezzük. Jelentés, ha egyszer megismerjük a sűrűségfüggvény alakját, egy fix hullámhossz mellett, akkor könnyű átskálázni egy másik hullámhosszra és fordítva, azaz elegendő egyetlen hullámhosszon vagy hőmérsékleten – elmélet vagy

kísérlet alapján – meghatározni, hogyan függ az energiasűrűség a másik, megmaradt változótól. [1 – 7]

Továbbgondolva a problémát, a sugárzás emissziójának és az abszorpciójának a természetére tett bizonyos felvetéseket és le is vezetett egy összefüggést 1896-ban. Ez a Wien-féle sugárzási törvényt (más néven Wien-törvény vagy Wien-eloszlási törvény), amelyben a C_1 és C_2 állandókat úgy kell megválasztani, hogy a kísérleti adatokból meghatározandó állandók a görbe a lehető legjobban illeszkedjen; (2) egyenlet:

$$u(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{T} \frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

A hőszugárzás bizonyos spektrumának leírására ma is használnak, az egyenlet pontosan leírja a tárgyak hőszugárzásának rövid hullámhosszú (nagyfrekvenciás) spektrumát, de a hosszú hullámhosszú (alacsony frekvenciájú) sugárzásra vonatkozó kísérleti adatokra nem illeszkedik pontosan. [3 – 7]

Boltzmann és Wien termodinamikai gondolatmenete hasznos lépés volt, mert megmutatta, hogy a probléma megoldása egy olyan függvény, amelyben a hőmérsékleten és a hullámhosszon (frekvencián) kívül semmilyen más fizikai mennyiség nem játszik szerepet. Mivel a termodinamika igen általános elveken alapszik, amelyek minden fizika; rendszerre érvényesek, a termodinamikai gondolatmenet gyakran nem nyújt kellő betekintést az adott rendszer speciális folyamatainak részleteibe. [5]

John William Strutt, angol fizikus közismert nevén 3rd Baron Rayleigh (1842 –1919) más megközelítést alkalmazott, amely az ekvipartíció tétele alapján közelítette meg a problémát, amely szerint a termikus egyensúlyban lévő adott hőmérsékletű rendszerekben átlagban $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$ energia jut minden olyan változóra, amely a rendszer energiájának meghatározásához szükséges. Modelljében téglatest alakú üreget vizsgált, amelynek a falai fémből készültek, és feltételezte, hogy a falakban lévő elektromos töltések a sugárzás forrása. A töltések harmonikus oszcillátorként viselkednek és képesek a sugárzás kibocsátani és mindegyiket oszcillátort a rezgés karakterisztikus frekvenciája jellemzi. A térfogatban nagyszámú oszcillátor van, ezért a szomszédos frekvenciák közötti különbség elhanyagolható, azaz a kialakuló sugárzás minden hullámhossz környékén folytonos eloszlásúnak fog látszani. Adott hőmérsékleten az oszcillátorok állandó működése állóhullámok kialakulását eredményezi az üregben. Az ilyen állóhullámok száma az egységnyi térfogatban $8 \cdot \pi \cdot \lambda^{-4}$. [5]

Rayleigh egy triviális 8-as szorzói faktornyai hibát követett el a levezetésben, [8] szakirodalom (3) és (4) egyenlete. Miután az eredmény nyomtatásban megjelent Sir James Hopwood Jeans (1877 –1946) rámutatott a hibára, ezért a helyes összefüggés Rayleigh – Jeans törvényként vált ismertté. A legáltalánosabban elfogadott alakját (3) egyenletben adtam meg: [3 – 5; 7 –9]:

$$u(\nu, T) = 8 \cdot \pi \cdot \frac{k \cdot T}{c^3} \cdot \nu^2 \quad (3)$$

Adott hőmérsékleten alacsony frekvenciákon (nagyon nagy hullámhosszokon) az elmélet jól illeszkedik jól egyezik a kísérleti eredményekkel, de nagy frekvenciákon azzal teljesen ellentétben áll. Midőn a hullámhossz nullához a spektrális sűrűségfüggvény a végtelenhez, ami viszont fizikailag nem lehetséges, mert az elektromágneses tér véges energia térfogatsűrűséggel rendelkezik. A (3) egyenlet ellentétben van a termodinamikai III. főtételével is, mert az ebből számolt hőmérsékleti sugárzás hőkapacitására (az energia sűrűségfüggvény hőmérséklet szerinti első deriváltja) hőmérséklettől független eredmény adódik, ami viszont a III. főtétel szerint nulla. Minthogy ez az ellentmondás rövid hullámoknál a legjelentősebb ezért a problémát ultraibolya-katasztrófa névvel illetik (A kifejezést először Paul Ehrenfest használta 1911-ben). [1; 3; 5; 9; 10]

3. PLANCK KVANTUMHIPOTÉZISE

A probléma megoldását az energia spektrális eloszlásfüggvényt, és a hozzá vezető gondolatmenetet Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 –1947) 1900. december 14-én ismertette a Német Fizikai Társaság ülésén „A Wien-féle eloszlási törvény módosításáról” című előadásában ismertette. Dolgozat formájában 1901-ben jelent meg *Annalen der Physik* című tudományos folyóiratban. [11]

Először tisztán matematikai okoskodással találta meg a megoldást, majd feltárta, hogy az alkalmazott matematikai lépések mögött milyen fizikai folyamatok vannak. Végül sikerült olyan sugárzási törvényt találnia, amely a kísérleti adatokkal tökéletesen egyezett, de a fizikai következtetések oly meglepőek voltak, hogy éveken keresztül még ő maga sem volt hajlandó elfogadni az elméletét, mint a „valódi világ” leírásának elemeit. A klasszikus fizika gondolatvilágától idegen feltevései, a kvantumos elképzelések mag túl radikálisak voltak még számára is. [5; 10]

Klasszikus fizikában az oszcillátor (például rugóval összekötött tömeg) a zérustól nagyobb tetszőleges amplitúdóval rezeghet. Minthogy az energia a rezgés amplitúdójának négyzetével arányos az oszcillátor energiája a nulla és a végtelen közötti bármekkora lehet. A problémát az okozza, hogy ezekben a modellekben, hogy integráláskor a folytonos eloszlású energiák miatt a függvény a $\lambda \rightarrow 0$ esetben a végtelenhez tart. Planck jó matematikai érzékkel felismerte, ha az integrálás helyett nulla és végtelen közötti diszkrét energiaértékek összegzéséről lenne szó, akkor ennek eredményeként olyan függvény adódna, amely a $\lambda \rightarrow 0$ esetében szintén zérushoz tart, mint a kísérletekből meghatározott sugárzási görbék.

Planck korszakalkotó lépése az volt, hogy feltételezte, a rezgő oszcillátor energiája nem folytonosan változik, hanem a frekvenciával arányos kvantumokban. Az univerzális állandóként megjelenő h arányossági tényezőt, mivel hatás dimenziójú mennyiség, hatáskvantumnak nevezte. Ez későbbi megfogalmazásban azt jelenti, hogy az energia egy adott frekvencián csak meghatározott adagokban, kvantálva terjedhet. [5; 9; 10; 11]:

Ezután Planck kiszámította, hogy az adott hőmérsékleten a termikus egyensúlyban lévő oszcillátor átlagos energiáját Boltzmann-statisztika alapján, (4) egyenlet.

$$\overline{\varepsilon(\lambda, T)} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ n \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{n \cdot \varepsilon_0}{k \cdot T}} \right\}}{e^{-\frac{n \cdot \varepsilon_0}{k \cdot T}}} = \frac{h \cdot \nu}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot T \cdot \lambda}} - 1} \quad (4)$$

Ha az oszcillátoroknak ennyi az átlagos energiájuk, akkor annyi kell legyen az üregben kialakult állóhullámok átlagos energiája is (mert a falak és a sugárzás termikus egyensúlyban vannak). Ha ezt az átlagenergiát megszorozzuk az állóhullámok számával (amit Rayleigh és Jeans állapítottak meg), akkor megkapjuk a Planck-féle spektrális energiasűrűség-függvényt, amelynek a frekvencia szerinti függését a (5) egyenlet adja meg: [5; 9; 11]

$$u(\nu, T) = 8 \cdot \pi \cdot \frac{h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1} \quad (5)$$

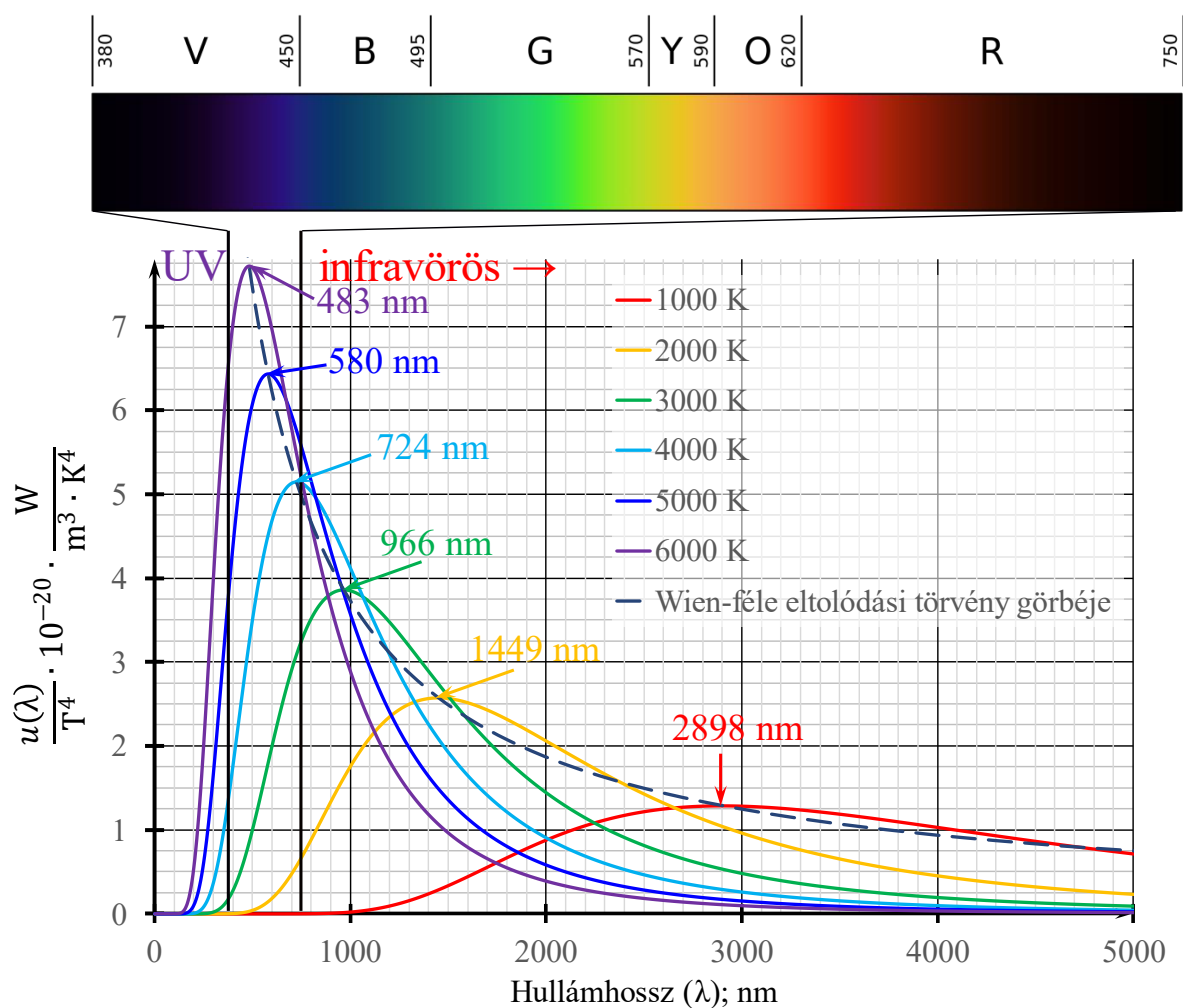
A hullámhossz szerinti függvényét pedig a (6) egyenlet adja meg [1; 7]:

$$u(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \frac{h}{c^3} \cdot \frac{\left(\frac{c}{\lambda}\right)^3}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot T \cdot \lambda}} - 1} = 8 \cdot \pi \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot T \cdot \lambda}} - 1} \quad (6)$$

Planck meghatározta a hatáskvantum értékét is oly módon, hogy az általa javasolt spektrális sűrűségfüggvényt ráillesztett a kísérleti adatokra és a ma elfogadott értékhez igen közeli számot kapott. [5; 10]

Kis hullámhosszoknál a Planck-törvény a Wien-féle kifejezéshez közeledik, ami abban tartományban helyes eredményt adott. Hosszú hullámhosszokon a Rayleigh - Jeans-törvényhez tart, ami helyes ezekben az esetben. Planck tulajdonképpen sikeresen épített hidat a két klasszikus sugárzáselmélet közé. [5]

A különböző hőmérsékletű feketetest sugárzás spektrális energiasűrűségét a hullámhossz függvényében az 1. ábrában mutatom be. Azért, hogy az ábrában 5000 K hőmérsékletet is tudjak ábrázolni a függőleges tengelyt logaritmikusan skáláztam.



1. ábra: A különböző hőmérsékletű feketetest sugárzás görbéi (saját szerkesztés).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Makroszkopikus mechanikai rendszereknél az energiaállapotok kvantumos mivolta kimutathatatlan. Az energiacsere kvantáltsága általában a hétköznapi jelenségek körében észrevétlen marad, mert a Planck-állandó igen kicsiny. Ha az értéke nagyobb lenne, akkor környezetünkben mindenütt láthatnánk kvantumos jelenségeket. Valójában ezek a jelenségek mindenütt jelen vannak, de csak mikroszkopikus rendszerekben, az atomok szintjén vehetők észre, ahol energiacsere és energia nagyságrendje azonos. Ennek a feltételnek a teljesülése teszi szokatlan mó-

don kimutathatóvá a kvantumos hatást a feketetest sugárzás esetében (nanométeres hullámhosszok esetében). Érdekes tény, hogy ha a $h \rightarrow 0$ hátramenetet képezzük a kvantumos összefüggések a megfelelő klasszikus egyenletekbe mennek át, azaz a kvantummechanika általánosabb elmélet, amely a klasszikus mechanikát speciális esetként foglalja magába.

A kvantumhipotézis valódi fizikai jelentőségét, hogy az energia kvantumos szerkezetű, először Einstein ismerte fel. Ennek alapján sikerült megmagyaráznia a fényelektromos jelenséget, amelyet már a múlt század vége felé ismerték, de a fény hullámtermészete alapján nem lehetett megérteni.

Ezek az elméleti előrelépések végül azt eredményezték, hogy a klasszikus elektromágneses-séget felváltotta a kvantumelektrodinamika. Ezeket a kvantumokat fotonoknak nevezték el, és a feketetest-üregről úgy gondolták, hogy az fotonok gázát tartalmazza. Továbbá ez vezetett a kvantum valószínűségi eloszlások kifejlesztéséhez, amelyeket Fermi-Dirac-statisztikának és Bose-Einstein-statisztikának neveztek el, és amelyek mindegyike a részecskék egy-egy különböző osztályára, a fermionokra és bozonokra alkalmazható. Ezek a törvényszerűségek az alapjai a napelemcellák működésének megértéséhez.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] JAVORSZKI, B. M., DETLAF, A. A.: *Fizikai zsebkönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1976
- [2] FÁY Á.: *Bevezetés a hőszugárzás elméletébe*. Egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem 2020
- [3] HORVÁTH J.: *Termodinamika és statisztikai mechanika*. Tankönyvkiadó 1960.
- [4] VARGA P.: *Esszé a mérésekről, amelyek a Planck-törvény felfedezéséhez vezettek – I. rész*. Fizikai szemle LXIII. évf. 2013. január
- [5] HUDSON, A., NELSON, R.: *University Physics Vol 2. Second Edition*. Saunders College Publishing, 1990
- [6] WIEN, W.: *On the division of energy in the emission-spectrum of a black body*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 43(262):214–220, 1896
- [7] ROSA, A.V., ORDÓÑEZ, J.C.: *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Elsevier Academic Press, 2022.
- [8] LORD RAYLEIGH: *Remarks upon the law of complete radiation*. Philosophical Magazine, 49:539–540, 1900.
- [9] NAGY K.: *Kvantummechanika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1994.
- [10] NAGY K.: *Aki ajtót nyitott a kvantumok világára*. Max Planck és százéves kvantumhipotézis. Fizikai Szemle 2001/2. 37.o.
- [11] PLANCK, M.: *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*. Vol. 309, Issue 3, 1901, pp 553-563

FÉLVEZETŐK FIZIKÁJA ALAPJÁN A MODELLKÉSZÍTÉS EGYENLETEI ÉS PARAMÉTEREI

MODELLING BY SEMICONDUCTOR PHYSICS EQUATIONS AND PARAMETERS OF MODELL

KOZSELY Gábor

Ph.D., egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A napelem cellákban az energiaátalakítás oly módon történik, hogy a sugárzás kölcsönhatásba lép a napelem anyagával és ez elektromos töltéshordozókat generál az anyagban. Elvi felépítésüket tekintve egy félvezető diódával egyeznek meg, így működési elvük megértéséhez elengedhetetlen ezek alapvető ismerete is. A gyakorlatban a szilícium alapú napelemek messze a legelterjedtebbek, így a tanulmány röviden ennek elméleti modelljét, illetve a modellépítéshez megfontolásokat mutatja be.

Kulcsszavak: félvezetők transzport folyamata, tranzienst állapot leírása, feszültség-áram karakterisztika

Abstract: In solar cells, energy conversion occurs by radiation interacting with the solar cell material to generate electrical charge carriers in it. In principle they are like a semiconductor diode, so fundamental understanding of their operation is essential to understand their principle of operation. In practice, silicon-based solar cells are by far the most widely used, and the paper briefly presents a theoretical model of these cells and the considerations for model construction.

Keywords: semiconductor transport mechanisms, transient state description, voltage-current characteristics

1. BEVEZETÉS

Az anyagok különböző nagyságú fajlagos vezetőképesség jellemzi. A jó villamos vezető anyagok (például a fémek) néhányszor $10^7 - 10^8$ S·m fajlagos vezetőképességgel jellemezhetők. A szigetelők vagy dielektrikumok fajlagos vezetőképessége pedig $10^{-8} - 10^{-14}$ S·m. Azokat az anyagokat, amelyek vezetőképesség szempontjából a fémek és dielektrikumok között helyezkednek el, félvezetőknek nevezzük, azaz fajlagos vezetőképessége $10^{-8} - 10^6$ S·m közé esik, azaz tizennégy nagyságrenddel is különbözhetnek. Ez a meghatározás azonban nem teljesen pontosan adja vissza a vezetőképességükkel kapcsolatos speciális tulajdonságukat.

Közismert tény a fémek ellenállása növekszik a hőmérséklet növekedésével. A félvezetők ellenállása viszont nagyon gyorsan csökken a hőmérséklettel. A fajlagos ellenállás, illetve fajlagos vezetőképesség hőmérséklet függése exponenciális, ez utóbbit a (1) egyenlet fejezi ki, ahol σ_0 preexponenciális tényező a zérus aktiválási energiához tartozó fajlagos vezetőképességet jelenti. Az adott félvezetőre jellemző E_a mennyiséget aktiválási energiának nevezzük, jelenléte azt jelzi, hogy a vezetőképessége növeléséhez energiát kell közölni.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{k \cdot T}} \quad (1)$$

A kísérletek azt mutatják, hogy félvezetők vezetőképessége nemcsak hőközléskor növekszik, hanem megvilágításkor, magrészecskékkel való besugárzáskor is, és változást mutat elektromos és mágneses terekben, továbbá a külső nyomás hatására is. Ha $T \rightarrow 0$, és kívülről nincs energiaközlés, akkor a félvezetők vezetőképessége nullához tart, ezért azt mondhatjuk, hogy a félvezetők olyan anyagok, amelyek csak gerjesztett állapotban rendelkeznek vezetőképességgel.[2]

Külső feltételeknek a félvezetők vezetőképességére gyakorolt hatása, az anyag szerkezetétől és tulajdonságaitól függően, különböző módon mutatkozik meg. Változatlan külső körülmények mellett ugyanannak az anyagnak a vezetőképessége különböző lesz tiszta és tökéletes egykristály esetén, a szennyezett és nem tökéletes egykristályok, valamint polikristályok esetén.

Ezek alapján a következő meghatározás adható a félvezetőkre: azok az anyagok, amelyek fajlagos vezetőképessége (σ) $10^{-8} - 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ között van. A vezetőképessége erősen függ a szennyezések típusától és mértékétől, az anyag szerkezetétől és külső feltételektől (a hőmérséklettől, a megvilágítástól, az elektromos és mágneses terektől). [1, 2]

A félvezető anyagoknak kétféle típusa létezik: az egyik az ionfélvezető, a másik az elektronfélvezető.

- Az ionfélvezetőkben az áramot az anyag ionjai közvetítik, ennek következtében az ionfélvezető összetétele és szerkezete az áram hatására megváltozik. Energiaátalakításra szolgáló készülékekben az ilyen anyagok nem használhatók, mert ha az áram halad rajtuk keresztül, tönkremennek.
- Az elektronfélvezetőkben az áramot az elektronok közvetítik, és így az elektromos áram áthaladásához nem kapcsolódik anyagtranszport, azaz az ilyen anyagból készített készülékek hosszú ideig működőképesek. Ebbe a csoportba számos különböző anyag tartozik, de közülük csak néhánynak van gyakorlati jelentősége. Természetesen, amilyen mértékben fejlődik az anyagtudomány elmélete és technológiája egyre több félvezető anyag nyer alkalmazást.

A félvezető anyagok csoportjába 12 elem tartozik: bór (B), szén (C), szilícium (Si), foszfor (P), kén (S), germánium (Ge), arzén (As), ón (Sn), antimon (Sb), tellúr (Te) jód (I). A felsorolt atomi félvezetők közül jelenleg a szilícium és germánium, vegyületek közül pedig a gallium-arszenid.

1. táblázat: A szilícium, a germánium és gallium-arszenid fizikai paramétereit.

| Fogalom megnevezése | Jelölés | Si | Ge | GaAs | Mértékegység |
|--------------------------------|----------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| Rendszám | Z | 14 | 32 | - | - |
| Vegyérték elektronok száma | N | 4 | 4 | - | - |
| Olvadáspont | T_{op} | 1414 | 938 | 1238 | °C |
| Tiltott sáv szélessége | E_G | 1,12 | 0,67 | 1,424 | eV |
| Elektronok mozgékonyasága | μ_n | 0,135 | 0,39 | 0,88 | $\text{m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| Lyukmozgékonyaság | μ_p | 0,048 | 0,19 | 0,01 | μm |
| Fajlagos ellenállás | ρ | $2,1\cdot 10^3$ | $4,6\cdot 10^{-1}$ | $4\cdot 10^6$ | $\Omega\cdot\text{m}$ |
| Intrinsic koncentráció | n_i | $2\cdot 10^{16}$ | $2,5\cdot 10^{19}$ | $1,5\cdot 10^{12}$ | m^{-3} |
| Elektronok diffúziós állandója | D_n | 35 | 100 | 290 | $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ |
| Lyukak diffúziós állandója | D_p | 12,5 | 49 | 10,4 | $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ |

2. FÉLVEZETŐK FAJLAGOS VEZETŐKÉPESSÉGE ÉS A TÖLTÉSHORDOZÓK TRANSZPORTJA

A félvezető szerkezetében, illetve eszközökben lejátszódó elektromos folyamatokat az alábbi alap összefüggésekkel írhatók le:

- a töltéshordozók mennyiségének időbeli változását a töltésmegmaradás törvények, illetve folytonossági egyenletekkel
- a töltéshordozók mozgásából származó áramokat transzportegyenletekkel

- a töltéshordozók mennyisége és helyhez kötött töltések kapcsolatát az elektromos erőterrel Poisson -egyenlettel, illetve Gauss-törvénnyel
- a vezetési és eltolási áramok összegzési szabályát első Maxwell - egyenlet).

Ezek az összefüggések általában differenciálegyenletek és az elektromos mennyiségek mellett a félvezető anyagjellemzőit is tartalmazza.

A félvezetőben két különböző jellegű áramvezetés jöhet létre: a drift és a diffúziós áram. Drift (sodródási) áram: a félvezetőben a villamos tér hatására létrejövő áram. A félvezető kristályban létesített elektromos térerősség hatására a szabad töltéshordozók mozgásának kitüntetett iránya van. A lyukak a tér irányába, az elektronok a tér irányával ellentétesen mozognak, sebességük arányos az elektromos tér nagyságával és az illető töltéshordozó mozgékonyaságával. A mozgékonyaság függ a félvezető anyagától, a töltéshordozók számától és a kristály hőmérsékletétől.

Mivel a pozitív töltéshordozók (lyukak) mozgása adja a technikai áramirányt, ezért a sebességek a következőképpen adhatóak meg (2) egyenlet:

$$\mathbf{v}_p = \mu_p \cdot \mathbf{E}; \quad \mathbf{v}_n = \mu_n \cdot \mathbf{E} \cdot \quad (2)$$

A mozgékonyaság a hőmérséklet növekedésekor csökken. A térerősség növelésével kezdetben lineárisan nő a töltéshordozók sebessége, majd egy bizonyos határon túl a sebesség már nem növekszik, gyakorlatilag független a térerősségtől. Igen nagy térerősségnél, egy kritikus értéken felül, a sebesség ugrásszerűen megnövekszik, úgynevezett átütés következik be.

A töltéshordozó mozgékonyasága általában független az elektromos mező erősségétől, kivéve, ha nagyon nagy az elektromos térerősség, ez viszont tipikusan nem jellemző a napelemekben. A lyukak és elektronok sodródási áramsűrűsége a következőképpen írható fel; a (3) és (4) egyenletek:

$$\mathbf{J}_{p \text{ drift}} = q \cdot p \cdot \mathbf{v}_{p \text{ drift}} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_{n \text{ drift}} = -q \cdot n \cdot \mathbf{v}_{n \text{ drift}} = -q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

A napelemekben a legjelentősebb szórási mechanizmusok a rács (fonon) és az ionizált szennyeződések szórása, (5) és (6) egyenlet. Ezek a komponensek mozgékonyasága felírható a rácsszórás és az ionizált szennyeződések szórása esetén. Ezeket aztán a Matthiessen-szabály segítségével kombinálni lehet a következők szerint a mozgékonyaságot; (7) egyenlet.

$$\mu_L = C_L \cdot T^{-\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$\mu_I = \frac{C_L \cdot T^{-\frac{3}{2}}}{N_d + N_a} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad (7)$$

Ez egy elsőrendű közelítés, amely elhanyagolja a szórási mechanizmusok sebességfüggését. A kétféle mozgékonyaság kísérletileg megkülönböztethető a hőmérséklettől és az adalékolástól való eltérő függésük alapján. Jobb közelítést (8) egyenlettel megadott közelítés, ahol C_i és S_i (nem tévesztendő össze a szilícium rövidítésével) a koszinusz-, illetve a szinuszintegrált jelenti. [3]

$$\frac{\mu}{\mu_L} = 1 + \frac{6 \cdot \mu_L}{\mu_I} \cdot \left\{ \text{Ci} \left(\frac{6 \cdot \mu_L}{\mu_I} \right) \cdot \cos \left(\frac{6 \cdot \mu_L}{\mu_I} \right) + \left\{ \text{Ci} \left(\frac{6 \cdot \mu_L}{\mu_I} \right) - \frac{\pi}{2} \right\} \cdot \sin \left(\frac{6 \cdot \mu_L}{\mu_I} \right) \right\} \quad (8)$$

A napelemek modellezésekor kényelmesebb a mért adatokkal vagy empirikus képletekkel használni. A lyukak és szabadelektronok mozgékonyasága szilíciumban 300 K hőmérsékleten jól közelíthetők az alábbi összefüggéssel; (9) és (10) egyenlet [3]:

$$\mu_p = 5,43 \cdot 10^{-3} + \frac{4,069 \cdot 10^{-2}}{\left(\frac{N_d + N_a}{1,3 \cdot 10^{17}} \right)^{0,91}} \quad (9)$$

$$\mu_n = 0,092 + \frac{0,1268}{\left(\frac{N_d + N_a}{1,3 \cdot 10^{17}} \right)^{0,91}} \quad (10)$$

Alacsony szennyezettségénél mobilitást a kristályrács atomjain való szóródás, amíg nagy szennyezettségi szintnél az ionizált szennyeződések szórása határozza meg a mozgékonyaságot.

Diffúziós áram akkor jön létre, ha a félvezetőben töltéshordozó koncentráció különbség van, bármilyen külső erőtér nélkül is folyik áram; a töltéshordozók az egyenletes sűrűségeloszlásra törekszenek. Az egyenlőtlen sűrűségeloszlás a töltéshordozók folyamatos pótlásával és elszállításával fenntartható, ekkor a kristályrácsban állandó áram folyik. A lyukak és szabadelektronok diffúziós áramát a (11) és (12) egyenletek adják meg. A folyamat hajtóereje a töltés hordozók sűrűségek gradiense, az arányossági tényező pedig a lyukak és az elektronok diffúziós együtthatója (D_p illetve D_n):

$$\mathbf{J}_{p \text{ diff}} = -q \cdot D_p \cdot \text{grad } p \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_{n \text{ diff}} = q \cdot D_n \cdot \text{grad } n \quad (12)$$

Egyensúly esetén a drift- és diffúziós áramok pontosan kiegyenlíti egymást. Ebből vezethető le Einstein-összefüggés, amely nem elfajult félvezetők esetében a (13) egyenlettel adható meg:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k \cdot T}{q} \quad (13)$$

Az elfajult félvezető esetén az összefüggés kicsivel bonyolultabb alakot ölt, amit a (14) és (15) egyenletek fejezik ki:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = -\frac{1}{q} \cdot p \cdot \left[\frac{dp}{dE_F} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{1}{q} \cdot n \cdot \left[\frac{dp}{dE_F} \right]^{-1} \quad (15)$$

A fenti egyenletekből jól látható, hogy a diffúziós állandók valójában növekednek, amikor degenerációs hatások jelentőssé válnak.

Az eredő lyuk- illetve elektron áramsűrűség a drift és a diffúziós áramsűrűségek algebrai összege, amelyet a (16) és (17) egyenletek fejeznek ki. Figyelembe véve, hogy elektromos térerősség vektor az elektromos potenciál gradienséből számolható: $\mathbf{E} = -\text{grad } \phi$.

$$\mathbf{J}_p = \mathbf{J}_{p \text{ drift}} + \mathbf{J}_{p \text{ diff}} = -q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \text{grad } \phi - q \cdot D_p \cdot \text{grad } p \quad (16)$$

$$\mathbf{J}_n = \mathbf{J}_{n \text{ drift}} + \mathbf{J}_{n \text{ diff}} = -q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \text{grad } \phi + q \cdot D_n \cdot \text{grad } p \quad (17)$$

Ezek alapján az eredő áramot a (18) egyenlettel lehet megadni:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_n + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (18)$$

A fenti egyenletek elektronika fenomenológiai elméletének alapegyenletei. A $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ tag az eltolási áram, amely az első Maxwell egyenletből következik. A napelemekben az eltolási áramot általában elhanyagolják, mivel azok egyenáramú eszközök.

3. TRANZIENS ÁLLAPOT

Ha töltésinjektálással vagy fotógerjesztéssel a töltéshordozók koncentrációjának a kristályrács adott tartományában termodinamikai egyensúlyi állapottól eltérő értékre növeljük, azaz $n_0 < n$ illetve $p_0 < p$. Ezután a magára hagyott rendszer meghatározott idő elteltével visszatér az egyensúlyi állapotába.

A töltéshordozókra vonatkozó generációs sebességet, vagyis az időegység alatt keletkezett (generált) elektronok, illetve lyukak számát, amelyek lehetnek az idő függvényei is $G_n(t)$, illetve $G_p(t)$ függvényekkel szokás megadni.

Egy rekombinációnak nevezett folyamat révén, amelynek során egy elektron a vezetési sávból a valenciasávba esik, és ezáltal egy valenciasávban lévő lyuk megszűnik. A napelemek működése szempontjából számos rekombinációs mechanizmus is jelentős szerepet játszik. A rekombinációs sebességet, pedig $R_n(t)$, illetve $R_p(t)$ függvényekkel jellemzik. A direkt rekombináció esetén lyukak úgy tűnnek el a valenciasávban, hogy a vezetési sávból átkerült elektronokkal egyesülnek rekombinálnak. Ez a folyamat foton kibocsátásával jár együtt. A másik lehetőség, az úgynevezett indirekt rekombináció, amikor a tiltott sávban lévő szennyezési szintekre jutnak, átmenetileg csapdába, rekombinációs centrumokba „esnek”. Ebben az esetben az energia- és az impulzuscsereben fononok is részt vesznek. A vezetési sávból egy rekombinációs centrummal kölcsönhatásba lépve fonon emittálódik. Ezt követően a fonon tűnik el, és az elektron ismét a vezetési sávba kerül. Hasonló jelenségek játszódnak le a lyukak és fononok között.

A nem egyensúlyi állapotokra is érvényesek a kontinuitási egyenletek, azaz az elektronmegmaradási, illetve lyukmegmaradási, valamint a töltésmegmaradási egyenletek.

A (19) egyenlet az elektronmegmaradást fejezi ki:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \text{div } \mathbf{J}_n + G_n(t) - R_n(t) \quad (19)$$

A (20) egyenlet a lyukmegmaradást fejezi ki:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \text{div } \mathbf{J}_p + G_p(t) - R_p(t) \quad (20)$$

A fenti egyenletekben a $\frac{1}{q} \cdot \text{div } \mathbf{J}$ kifejezés a térfogategységbe be- illetve kiáramlott töltéshordozók számát jelenti.

A (21) egyenlet a töltésmaradást fejezi ki, a térfogategységre vonatkoztatott teljes töltéssűrűség (ρ) (elektronoké, lyukaké, donoroké, akceptoroké, vagy más szennyezőknek megfelelő töltéshordozóké):

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p) \quad (21)$$

Ha térfogatelem csökken a töltés, akkor az csak elektron- és/vagy lyukáram miatt történhet. Ha $\text{div} \mathbf{J}_n = -\text{div} \mathbf{J}_p$ akkor térfogategységben egyenlő számú lyuk és elektron lép be (vagy lép ki belőle). Ha több elektron lép be, mint amennyi lyuk távozik, akkor $\text{div} \mathbf{J}_n > 0$ és $\text{div} \mathbf{J}_p < 0$ illetve $\text{div}(\mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p) > 0$ a térbeli töltéssűrűség abszolútértékben nő, de $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ negatív, azaz a (21) egyenlet baloldalán az érték pozitív lesz. Fontos megjegyezni, hogy a töltéspár-generációk nem befolyásolják a töltéssűrűséget

Ha a termikus egyensúlytalanság alakul valamely tartományban átmenetileg a töltésemleghesség felborulásával jár, akkor a kialakuló elektromos mező a (22) egyenlettel megadott Poisson-egyenletből számítható ki:

$$\text{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (22)$$

Legfőképpen csak egydimenziós esetre alkalmazzák, amikor a megoldáshoz vezető út nem túl bonyolult. A (23) egyenlet mutatja be a Poisson-egyenlet egydimenziós alakja figyelembevéve, hogy $\mathbf{E} = -\text{grad} \phi$.

$$\frac{dE_x}{dx} = -\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (23)$$

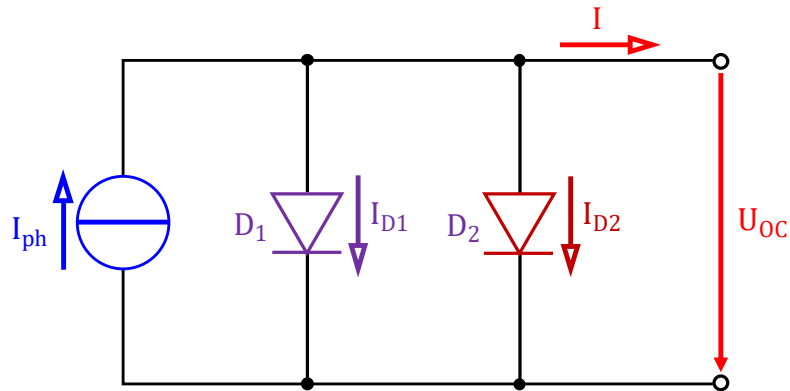
Nem egyensúlyi állapot tárgyalásánál külön kell kezelni a többségi töltéshordozók koncentrációjának, valamint a kisebbségi töltéshordozók koncentrációjának perturbációját (zavarását). A töltésneutralitást ezek a folyamatok megsértik, a nem-egyensúlyi állapot az idő szerint exponenciálisan szűnik meg, és ezt a félvezetőkire vonatkozó relaxációs idővel jellemzik. [1 ;2; 3]

4. FESZÜLTSEG – ÁRAM KARAKTERISZTIKA

A napelem cella alapvető áram-feszültség karakterisztikája vezethető kisebbségi hordozó diffúziós egyenletből vezethető le a peremfeltételek figyelembevételével, (24) egyenlet:

$$I = I_{ph} - I_{D1} \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) - I_{D2} \cdot \left(e^{\frac{2 \cdot U}{U_T}} - 1 \right) \quad (24)$$

A termikus feszültség a következőképpen számolható: $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$. A rövidzárlati áramot és a sötét telítési áramot meglehetősen összetett kifejezésekkel adják meg amelyek a napelem szerkezetétől, az anyagtulajdonságoktól és az üzemi körülményektől függenek. A napelem működésének teljes megértéséhez az egyenletben lévő tagok részletes vizsgálata szükséges. A (24) egyenlet alapformájának vizsgálatával azonban sokat megtudhatunk a napelem működéséről. Áramköri szempontból nyilvánvaló, hogy a napelem egy ideális áramforrással (I_{ph}) modellezhető, amely két diórával van párhuzamosan kapcsolva. A D_1 jelű dióda tényező egy, D_2 jelű diódaé kettő. A kapcsolást 1. ábra mutatja be.



1. ábra: Napelem cella ideális elektronikai helyettesítő képe (saját szerkesztés).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmányban a napelem cella ideális elektronikai helyettesítő kép megalkotáshoz szükséges logikai lépéseket mutatja be. A félvezetők fizikájából kiindulva, bemutatva azok alapvető fizikai paramétereit. Külön fejezetet szentelve az egyik fő paraméternek vezetési elektronok és lyukak mozgékonyosságának, ismertetve a félempirikus, illetve empirikus számítási módszereket.

Az alapvető transzportegyenletek, mint differenciálegyenletek adják a megfelelő peremfeltétel választása mellett a feszültség-áram karakterisztikát adó áramköri modellt.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GYURMÁNCZI GY ET AL: *Műszaki fizika III.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1990
- [2] KIRIJEV, P.SZ.: *Félvezetők fizikája.* Tankönyvkiadó, Budapest 1974
- [3] LUQUE, A., HEGEDŰS S. (EDS): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* John Wiley & Sons Ltd. 2003
- [4] ROSA, A.V., ORDÓÑEZ, J.C.: *Fundamentals of Renewable Energy Processes.* Elsevier Academic Press, 2022.

ELEKTROMÁGNESES SZIMULÁCIÓ A VILLAMOSMÉRNÖKI KÉPZÉSBEN

ELECTROMAGNETIC SIMULATION IN ELECTRICAL ENGINEERING EDUCATION

MARCSA Dániel

szimulációs mérnök, daniel.marcsa@econengineering.com
eCon Engineering Kft.;

H-1116 Magyarország, Budapest, Kondorosi út 3., Tel.: +36 70/333-9324

Kivonat: Napjainkra széles körben elterjedt gyakorlattá vált a számítógépes eszközök használata az oktatásban. A számítógépes szimuláció használata a gépészmérnöki képzésben már mindenhol jelen van, ezzel szemben a villamosmérnöki képzésben továbbra is csak elvétve lehet vele találkozni. Pedig a villamosmérnöki tárgyak között is sok olyan van, ahol bonyolult és absztrakt összefüggések megértésére, szemléltetésére lenne szükség. A tanulmány rávilágít arra, hogy fontos lenne, ha a villamosmérnöki oktatásban is jelentősebb szerepet kapna a számítógépes szimuláció, azon belül is az elektromágneses térszámítás. Ezt követően az Ansys Electronics Desktop Student környezetben megoldott két egyszerű példa eredményeit láthatjuk. A példákön és azok eredményein keresztül jól látható az elektromágneses térszámítás hasznossága és a benne rejlő potenciál az oktatásban vagy akár demonstrációs eszközként.

Kulcsszavak: elektromágneses szimuláció, villamosmérnöki képzés, mikroszalag tápvonal, örvényáram, Ansys Electronics Desktop Student

Abstract: Today, the use of computer tools in education has become a widespread practice. The use of computer simulation in mechanical engineering is now widespread, whereas it is still only rarely used in electrical engineering. However, there are many subjects in electrical engineering where complex and abstract concepts need to be understood and visualised. The study highlights the importance of giving a more prominent role to computer simulation, including electromagnetic field computation, in electrical engineering education. This is followed by the results of two simple examples solved in the Ansys Electronics Desktop Student environment. Through these examples and their results, the usefulness and potential of electromagnetic field computation in education or even as a demonstration tool is clearly demonstrated.

Keywords: electromagnetic simulation, electrical engineering education, microstrip, eddy current, Ansys Electronics Desktop Student

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az iskolába járó diákok már a digitális technológia és az okostelefonok világában születtek. Így nagy valószínűséggel az évtizedek alatt kiforrott és napjainkban használt oktatási módszerek már nem hatékonyak a tudás megfelelő átadására. A mostani fiatalok, az úgynevezett Z-generáció figyelmét egyre nehezebb megragadni, de a megtartása is egyre gyakoribb hatásos impulzusokat igényel. Gondolkodásmódjukat születésüktől befolyásolja az összetett és gyorsan változó világ. Számukra nem az információszerzés a fő cél, hanem a rájuk ömlő információban történő keresés és annak megfelelő szelektálása [1]. Emiatt a táblán krétával tartott óra sokszor nem elég motiváló és figyelemfelkeltő a diákok számára. A mostani diákok körében világszerte megfigyelték az ellenállást a régi „megmondó” paradigmával szemben [2].

Az új technológiák a tanulás megkönnyítése és közvetítése mellett jól használhatóak a diák és a külvilág összekapcsolására is. A szoftverek, virtuális tanulási környezetek, távoli laboratóriumok, digitális táblák, laptopok és okostelefonok példák azokra az eszközökre, amelyeket ma új digitális információs és kommunikációs technológiáknak nevezünk. Az osztályteremben a

tanítás és a tanulás folyamatának, valamint a tanár-diák interakciónak a közvetítése során pozitív hatásokat váltanak ki ezek az eszközök. Megfelelő alkalmazásuk elősegíti a tananyag hatékony elsajátítását és a diák figyelmének fenntartását [1] [2].

Ez eddig leírtak elsősorban az általános és a középiskolákra vonatkoznak. Azonban napjainkra ezek a problémák az egyetemeken is megjelentek, ahol komoly kihívás a hallgatók figyelmének felkeltése, az érdeklődés megtartása és nem utolsósorban a lemorzsolódás minimalizálása. Ezeket tovább nehezítik az absztrakt, erősen a matematikára épülő tantárgyak, ahol egy-egy jelenség demonstrálása komoly laboratóriumi háttérrel igényel. A villamosmérnök képzésre fókuszálva ilyen tantárgyakra jó példa a villamosságtan, az elektromágneses terek, a villamos gépek, az antennák és a hullámterjedés. A kihívások megoldásában nyújt jelentős segítséget az oktatónak a számítógépes szimuláció, azon belül az elektromágneses térszámítás.

Az összetett jelenségek vizuális megjelenítésén túl napjainkra a számítógépek kapacitása lehetőséget biztosít a nagyon bonyolult jelenségeket vizsgálatára szimulációs szoftverekkel ami a felhasználó részéről interaktivitást is igényel. A szimulációk motiválhatják a különböző tanulási képességű tanulókat azáltal, hogy valós feladat megoldásán dolgozhatnak. De nem elhanyagolható az élmény: ha a tanulók szeretnek „játszani” az eszközzel, akkor többet is tanulnak. Tehát a könnyen kezelhetőség rendkívül fontos, hogy a hallgatók hatékonyan végezhessék feladatukat. Ez utóbbi szempont, ahol elválhat egymástól a szabadon hozzáférhető, de sok esetben mély elméleti tudást (pl. ONELAB [3]) vagy programozást (pl. PETSc [4]) igénylő szoftverek és a kereskedelmi szoftverek diákverziói (pl. Ansys Electronics Desktop Student [5]).

2. SZIMULÁCIÓ A VILLAMOSMÉRNÖK KÉPZÉSBEN

Napjainkban a számítógépek és a különféle könnyen hozzáférhető szoftvercsomagok megjelenésével a számítógéppel segített oktatási eszközök mind a tantermi előadások, mind a laboratóriumi kísérletek elengedhetetlen részévé váltak a mérnökképzésben. Az olyan interaktív tanulási környezet, amely szimulációkat is tartalmaz, betöltheti a passzív tanulás és az aktív elköteleződés közötti híd szerepét, és ezáltal mélyebb gondolkodásra ösztönözheti a hallgatót, megalapozva a problémaalapú tanulási környezetet. Az alkalmazások nagyon fontosak az elmélet és a gyakorlat összekapcsolása szempontjából is, hogy a hallgatók mérnöki ítéletképesége fejlődjön.

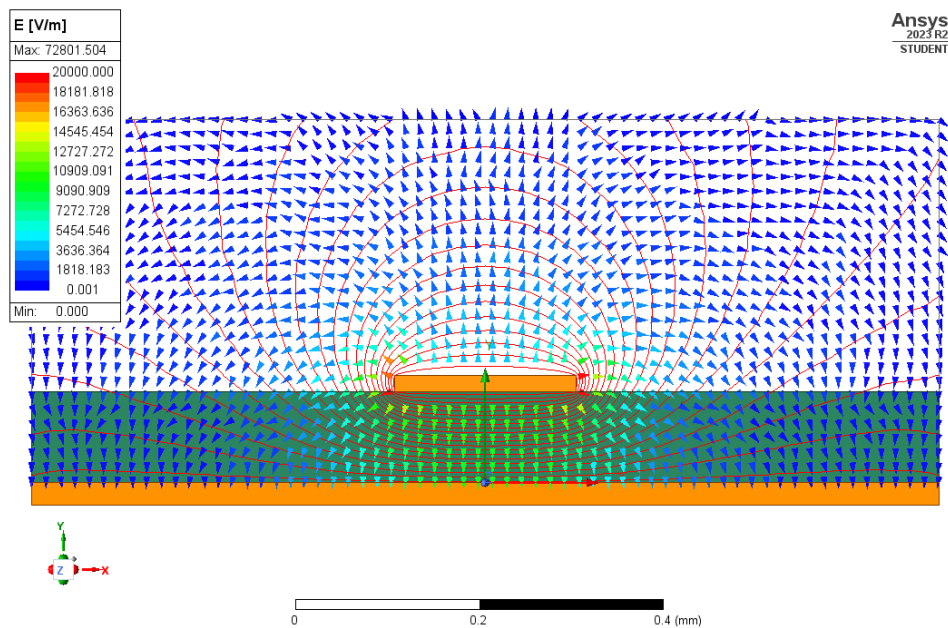
A jelenségek és a fogalmak összetettsége és sokfélesége sok hallgató számára kihívást jelent a villamosmérnök képzésben is. Ennek ellenére a legtöbb előadáson statikus diagramokon, fa-ábrákon és magyarázatokon keresztül próbálják ábrázolni a két és háromdimenziós jelenségeket. Külföldi egyetemeken (pl. Aalto University, University of Liège) találkozhatunk nagyon jó példákkal, ahol a mérés és az elektromágneses szimuláció, mint egymás komplementere jelenik meg a villamosmérnökök tantárgyaiban más és más arányban. De a jó példák ellenére a villamosmérnökök oktatása még napjainkban is leginkább a mérésre épül. Ami a külföldi és hazai villamosmérnöki képzés között jelentős különbség, hogy külföldön a szimulációval, tervezéssel foglalkozó tárgyakon belül vagy különállóan megtalálható az elektromágneses szimuláció. Hazánk esetében a 8 villamosmérnöki képzésből egy van, ahol több tárgynál is találkozunk a hallgató az elektromágneses térszámítással és ezen felül külön tantárgy is foglalkozik vele. Ezzel szemben például a hazai és külföldi gépészmérnöki képzés szerves részét képezi a mechanikai és áramlástan szimuláció.

A villamosmérnököknél is alapvető fontosságú lenne, hogy a hallgatók az egyetemen eltöltött idő alatt megtanulják ugyanazokat a szimulációs programokat használni, mint amilyeneket az iparban elvárnak tőlük. A számítógéppel segített tervezés (CAD) az egyik legalapvetőbb változás, amelyet a számítástechnika hozott a villamosmérnöki munkában. A CAD-eszközök lehetővé teszik a felhasználók számára, hogy a prototípusok elkészítése előtt egy virtuális környezetben összeállítsák és vizsgálhassák a termékek koncepcióját.

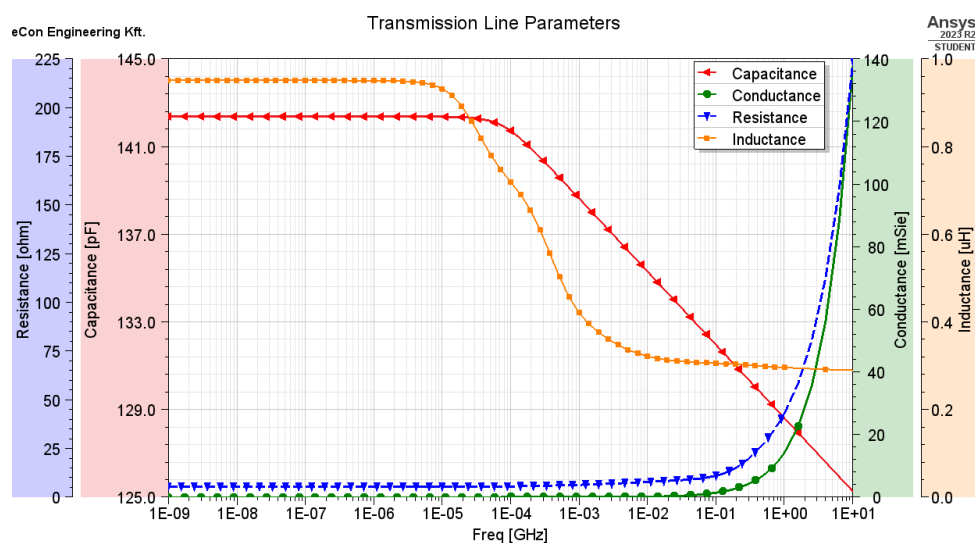
A következőkben röviden bemutatok két mintapéldát és azok eredményeit, melyek jól használhatóak oktatási célokra a villamosmérnöki oktatásban. A példákat a szabadon hozzáférhető Ansys Electronics Desktop Student [5] szoftvercsomaggal oldottam meg.

3. OKTATÁSBAN HASZNÁLHATÓ PÉLDÁK

Az első példa a nagysebességű áramkörökben elterjedten alkalmazott mikroszalag tápvonal vizsgálata [6]. Az Ansys 2DExtractor-ban felépített modellen a térváltozók megjelenítésével jól szemléltethető az elrendezésben kialakuló elektromos és mágneses tér vagy a kvázi-TEM módus, ahogy azt a 1a. ábra mutatja. A szimulációs eredményeknél elérhetőek a tápvonal távvezeték paraméterei is a frekvencia függvényében. Itt jól bemutatható az egyes paraméterek frekvenciafüggése (lásd 1b. ábra).



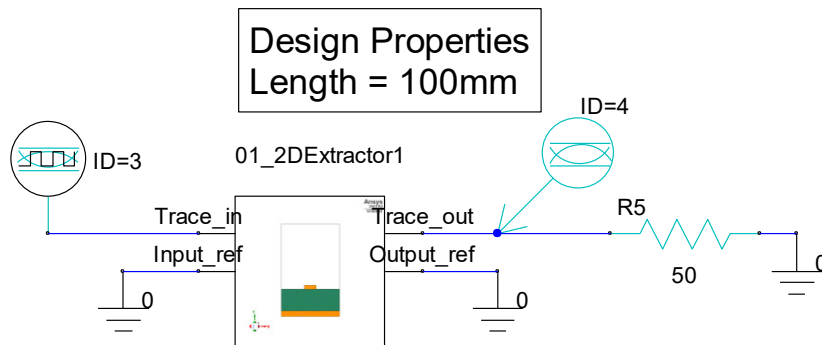
a) Az elektromos térerősség vektorok és a mágneses ekvipotenciális vonalak.



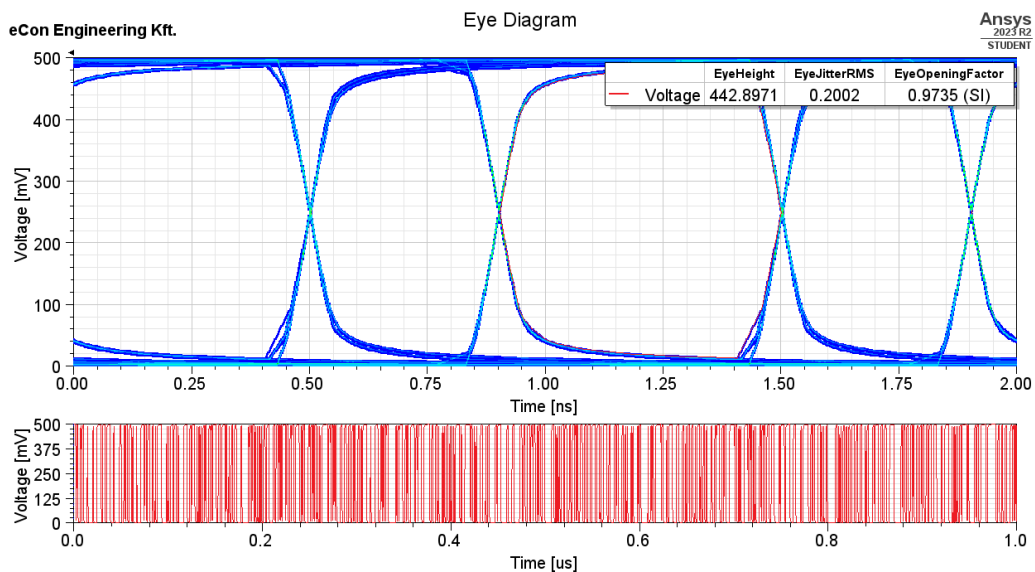
b) A távvezeték paraméterek frekvenciafüggése.
17. ábra: A vizsgált mikroszalag vonalra kapott eredmények.

Ezeket túl az elrendezés méreteinek változtatása (pl. tápvonal szélessége) révén bemutatható annak hatása a tápvonal paramétereire, de akár a felületi érdesség és a maratási kompenzáció (etch factor) hatásai is könnyen szemléltethetőek.

Az áramkörnél, ahol alkalmazzuk a mikroszalag tápvonalat, nagyon fontos vizsgálni a jel minőségét. Ebben ad segítséget a szemdiagram, ami könnyen előállítható a 2DExtractor-ral kiszámolt eredmények felhasználásával. A szemdiagram előállításához használt áramkört a 2a. ábra mutatja, amíg magát a szemdiagramot a 2b. ábrán láthatjuk. A kapott eredményeken ugyanúgy tudunk méréseket végezni, mint egy oszcilloszkópon, vagy használhatjuk a beépített függvényeket is adott paraméterek meghatározására.



a) Áramkör a szemdiagram vizsgálatához.



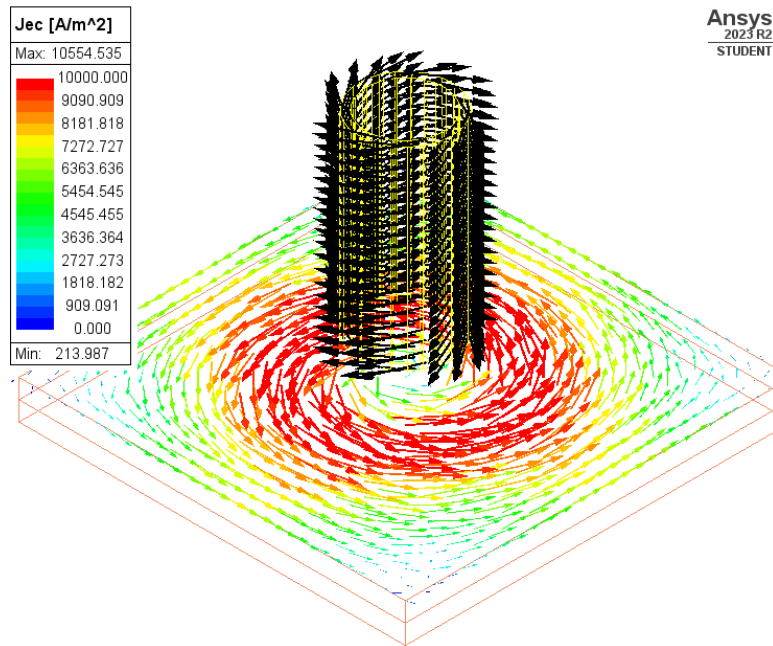
b) A kapott szemdiagram és néhány paramétere.
2. ábra: A szemdiagram 1 GHz-es jel esetében.

Az előzőekben bemutatott és hozzá hasonló, néhány vezetőlíniás elrendezések révén nagyon sok olyan jelenség, mint az áthallás, a nem kívánt elektromágneses sugárzás oka és annak kiküszöbölése is bemutatható a hallgatók számára, amivel egy gyakorló mérnök akár napi szinten találkozik.

A második példa a váltakozó mágneses tér miatt kialakuló örvényáram modellezése Ansys Maxwell-ben. A Faraday-féle indukciótörvény alapvető fontosságú összefüggés [7]

$$U_i = \oint_L \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}, \quad (1)$$

ahol U_i az indukált feszültség [V], \mathbf{E}_i az indukált elektromos térerősség [V/m] és \mathbf{B} a mágneses fluxussűrűség [T]. Ennek megértése alapvető fontosságú a villamosmérnöki gyakorlatban. Az (1). összefüggésben szereplő negatív előjel Lenz törvényét fejezi ki. Ez könnyen belátható a 3. ábrán a jobbszavár-szabály használatával, a tekercs áramának és a lemezben kialakuló örvényáram irányának ismeretében, vagyis az örvényáram tere csökkenti az indukáló teret.



3. ábra: A tekercs áramának és a lemezben kialakuló örvényáram vektorai.

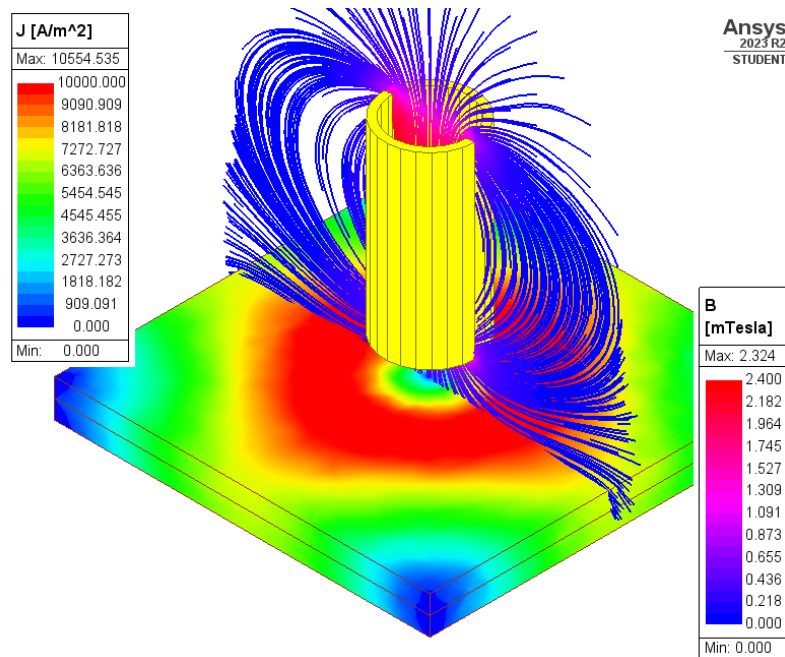
Az elmélet megértése mellett van gyakorlatiasabb jelentősége is a vizsgált elrendezésnek (lásd. 4. ábra), ami a roncsolásmentes repedésvizsgálat egyszerűsített modelljének is tekinthető. Szimulációval jól szemléltethető, hogy milyen változást okoz az örvényáramban a különböző méretű és alakú felületen lévő repedés vagy testen belüli zárvány. A 4a. ábra a hibamentes lemezben kialakuló örvényáramot mutatja, ami összehasonlítható a 4b. ábrán látható árameloszlással, ahol a bevágás miatt az örvényáram útja módosul. Az eredmények pedig megmutatják milyen módon és milyen pontossággal lehet ezzel a módszerrel a különböző hibákat kimutatni az elektromosan vezető anyagoknál.

Ehhez a példához hasonlóan az elektromágnes szimulációval jól bemutatható a különféle kapacitív vagy induktív szenzorok működésének alapelve.

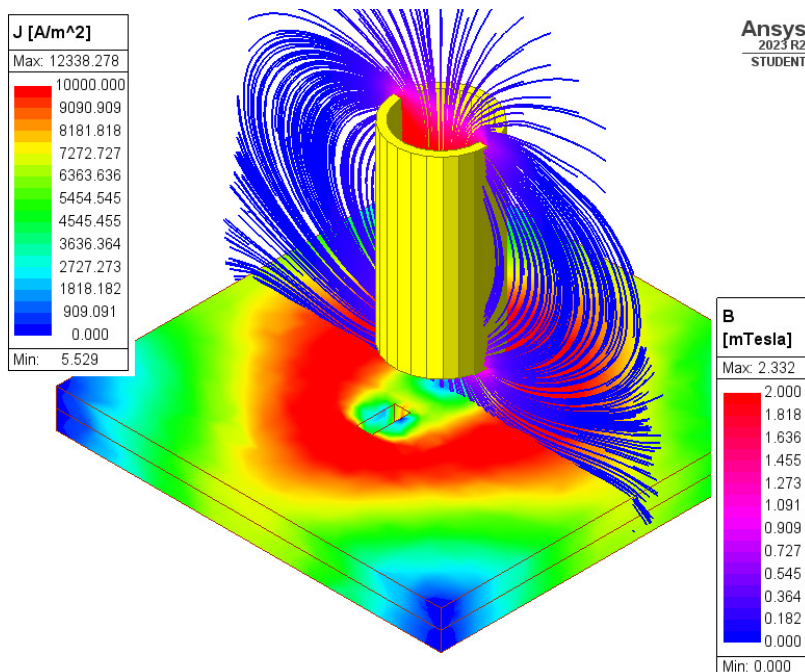
4. KÖVEZTKÉZTETÉSEK

Az elmúlt évtizedekben a mérnökképzésekkel szemben támasztott elvárások és a hallgatók igényei is drámaian megváltoztak. A legtöbb mérnökképzés, mint a villamosmérnöki az absztrakt fogalmak a két- és háromdimenziós jelenségek miatt alkalmas a számítógépes szimuláció oktatást segítő eszközként történő alkalmazására. A térszámítási technikákat felhasználó oktatás képes megfelelni napjaink elvárásainak, ezáltal javítva az oktatás minőségét, csökkentve a hallgatói lemorzsolódást.

A tanulmány két példán keresztül bemutatja a számítógépes szimuláció lehetőségeit az oktatásban, amik elősegítik a jelenségek vizualizációját és növelhetik, fenntartják a hallgatók érdeklődését. De fontos hangsúlyozni, hogy a számítógépes szimuláció az oktatásban nem tekinthető önálló oktatási formának, mivel nem helyettesítheti a hagyományos tantermi oktatást, de sokkal könnyebbé és gyorsabbá teheti a tananyag elsajátítását.



a) Az örvényáram és a mágneses fluxussűrűség a hibátlan lemeznél.



b) Az örvényáram és a mágneses fluxussűrűség a bevágott lemeznél.

4. ábra: Örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálat.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] TÖRPCSIK, M., SZÜCS, K., KEHL, D.: *How Generations Think: Research on Generation Z*. Acta Universitatis Sapientiae, Communicatio. 1, pp. 23-45, 2014.
- [2] PRENSKY, M.: *From Digital Natives to Digital Wisdom: Hopeful Essays for 21st Century Learning*. Corwin Press, 2012.
- [3] ONELAB – Open Numerical Engineering LABoratory, <https://onelab.info/> (megtekintés dátuma: 2023. 11. 30.)
- [4] PETSc – Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation, <https://petsc.org/release/> (megtekintés dátuma: 2023. 11. 30.)
- [5] Ansys Electronics Desktop Student, <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student> (megtekintés dátuma: 2023. 11. 30.)
- [6] THIERAUF, S. C.: *High-Speed Circuit Board Signal Integrity*. Artech House, Inc., 2004.
- [7] SIMONYI K., ZOMBORY L.: *Elméleti Villamosságtan*. Műszaki Könyvkiadó, 2000.

A FELTÖREKVŐ NAPELEM CELLÁK HATÁSFOKÁNAK LEGFRISSEBB AKKREDITÁLT EREDMÉNYEI

THE LATEST ACCREDITED RESULTS OF THE EFFICIENCY OF EMERGING SOLAR CELLS

MATUSZ-KALÁSZ Dávid

egyetemi tanársegéd, elkmkd@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: A tanulmány a feltörekvő fotovoltaikus (PV) cellák legfrissebb független kutatóintézetek által is ellenőrzött kutatási eredményeit kívánja összefoglalni. Az eredmények áttekintéséhez a NREL (The National Renewable Energy Laboratory, Amerikai Egyesült Államok) „Best Research-Cell Efficiency Chart” című grafikonja adta az inspirációt, valamint egyben biztos kiindulópontot jelentett. A feltörekvő napelem cellák csoportjában számos típus megtalálható, mint például a perovszkit, az szerves és nem szilíciumalapú szervetlen cellák. A tanulmányban bemutatásra kerülnek legsikeresebb próbadarabok, azok működése és a fejlesztésükben élenjáró kutatóintézetek.

Kulcsszavak: feltörekvő napelem, hatásfok, új technológiák

Abstract: The study aims to summarize the latest research results of emerging photovoltaic (PV) cells verified by independent research institutes. The "Best Research-Cell Efficiency Chart" from NREL (The National Renewable Energy Laboratory, USA) was the inspiration and a reliable starting point for the overview of the results. The emerging group of solar cells includes many types, such as perovskite, organic, and non-silicon-based non-organic cells. The study presents the most successful prototypes, their operation and the leading research institutes in their development.

Keywords: Emerging PV, Efficiency, New Technologies

1. BEVEZETÉS

A fény hatására villamos paramétereiket megváltoztató anyagok kutatása már az 1800-as évek végén elkezdődött a szelén alapanyagú aranyréteggel bevont napelemekkel. A 20. század elején többek között kísérleti úton is bebizonyították a fotoelektromos hatást, majd W. Schottky és C. W. Wagner közösen bevezették a p- és n-típusú félvezető fogalmát. 1941-ben R. S. Ohl, a Bell Telephone Labs elektrokémikus munkatársa jelentette be szilícium fényelem találmányát. Az 1950-es és 1960-as években számos szabadalmat nyújtottak be germánium (Ge), szilícium (Si), kadmium-szulfid (CdS), kadmium-szelén (CdSe) és gallium-arzenid (GaAs) alapú fényelemekre vonatkozóan.

A rövid történelmi bevezető után essen szó a feltörekvő napelemek (angolul: emerging PV) csoportjáról, ami olyan megoldásokat vonultat fel, amelyek kutatása az utóbbi 10-20 évben kezdődött meg. A feltörekvő napelemek csoportja rendkívül változatos, számos anyag (organikus polimerek, perovszkit, keszterit) és technológia (többreteg, vékonyréteg, festékérzékenyített) kutatását jelenti.

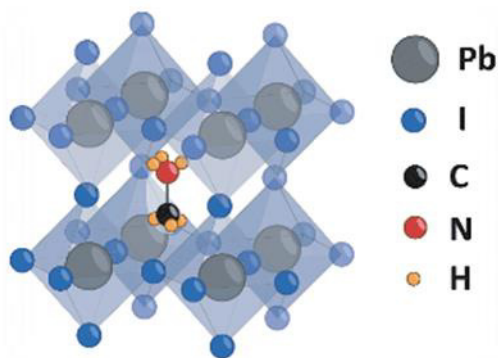
A feltörekvő napelem típusok csoportját az első táblázat foglalja össze aszerint, hogy mely kutatóintézetek rendelkeznek a legnagyobb igazolt hatásfokkal működő prototípussal egy adott kategóriában [1, 2].

1. táblázat: Feltörekvő (emerging) PV lista, a feltörekvő napelem cellák csoportja [2].

| Magyar név | Angol név | Rövidítés | Kutató |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|-----------|-----------|
| perovszkit-szilícium tandem | Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell (monolithic) | PSTSC | LONGi |
| perovszkit | Perovskite Solar Cell | PSC | NU és UoT |
| perovszkit-CIGS tandem | Perovskite/CIGS Tandem Solar Cell (monolithic) | P/CIGS | HZB |
| organikus | Organic Solar Cell | OSC | SJTU |
| kvantumpont | Quantum Dot Solar Cell | QDSC | UNIST |
| keszterit | Kesterite Solar Cell | CZTSSe | IoP/CAS |
| organikus tandem | Organic Tandem Solar Cell | OTSC | ICCAS |
| festékképzékenyített | Dye-Sensitized Solar Cell | DSSC | EPFL |

2. A PEROVSZKIT ÉS PEROVSZKIT TANDEM ALAPÚ NAPELEM CELLÁK

A hagyományos, szilíciumból készült napelemeknek nem túl nagy az energiaátalakítási hatásfokuk, és ehhez képest elég környezetszennyező az előállításuk. Pár éve azonban egy új trend jelent meg a tudományos életben, a perovszkit szerkezetű anyagokból készült napelemek kutatási területe, amelyeknek hatékonyabbak, olcsóbb és környezetkímélőbb a gyártásuk. A perovszkit egy félig átlátszó és rugalmas anyag, olyan kristályos réteget alkot, amely ezerszer vékonyabb, mint a hagyományos szilícium. A perovszkit szerkezet olyan ásvány kristályszerkezete, ami a következő általános képlettel írható le: $^{XII}A^{2+}VI B^{4+}X^{2-}_3$, vagyis ahol a halogénion (X) a szabályos (köbös) kristályrendszerben oldal-centráltnál helyzetben van. A legígéretesebbnek tartott anyag a metil-ammonium ólom-trihalogenid, általános képlete: $CH_3NH_3PbX_3$, ahol az X halogén ion lehet, pl. I^- , Br^- , vagy Cl^- , ahol a tiltott sáv szélessége 2,3 eV és 1,57 eV között van, attól függően, hogy melyik a halogénid ion. A perovszkitos napelemek hatékonysága valamivel jobb, mint a jelenleg használt hagyományos változatoké. Az aktuális 26,1%-os rekordhatásfok érték a Northwestern és a Torontói Egyetem közös munkájának eredménye 2023-ban. A rekord érték 2013-ban még csak 14,1 % volt. Az első halogénid-perovszkit alapú napelemet 2009-ben mutatták be 3,8%-os hatásfokkal. Függetlenül a prototípus akkori alacsony hatásfokától felkeltette az érdeklődést és a kutatásokat egy olcsóbb nem szilícium alapú fotovoltaikus cella megalkotása ösztönözte [1, 3].



1. ábra: A perovszkitos szerkezetű $CH_3NH_3PbI_3$ kristály [2].

A szilícium-perovszkit tandem (PSTSC) kategóriában a kínai napelemgyártó és fejlesztő cég a Longi mutatta be 33,9 százalékos energiaátalakítási hatásfokot elérő prototípusát. Ez a rekordhatékonyság érték most először lépte túl a Shockley-Quieser (S-Q) elméleti hatékonysági határát, amely 33,7% [4].

Amennyiben nem szilíciummal, hanem egy másik anyaggal és egyben technológiával, a réz-indium-gallium-diszeleniddel (P/CIGS) kombináljuk, 24,2 százalékos hatásfok az aktuális csúcserték (HZB, Helmholtz-Zentrum Berlin). Jelenleg a perovszkit alapú napelem panelek fejlesztése terén a kutatók előtt álló legnagyobb feladat már nem az energiaátalakítási hatásfok további növelése, hanem a gyártási technológia piacképesé tétele. Az aktuális várakozások szerint már jövőre piacra kerülhetnek a perovszkitos napelemek [5].

3. AZ ORGANIKUS POLIMER APALÚ NAPELEM CELLÁK

Az elmúlt évek másik sikertörténete a szerves napelemek fejlődése. A szerves, vagy más néven organikus napelemek a legfiatalabb napelemek. Kifejlesztésük az elmúlt két évtizedben kezdődött, ugyanis Alan Heeger 2000-ben kémiai Nobel-díjat kapott a félvezető polimerek felfedezéséért.

Az organikus napelem technológiák valójában két fő irányt jelentenek:

- a félvezető organikus polimerek,
- és a festékérzékenyített cellák (dye-sensitised cells, DSSC).

A félvezető polimerek mesterségesen előállítottak, amelyek a vékonyrétegű napelemekhez hasonlóan félvezető tulajdonsággal rendelkeznek, így napelem előállítására alkalmasak. A szerves félvezetők különleges előnyei pl.: oldatban feldolgozhatóságuk, könnyű súlyuk, megfizethetőségük, rugalmasságuk, félig átlátszóságuk és nagyméretű tekerceselésre való alkalmasságuk miatt a szerves napelemek, vagy más néven OPV-k előnyösek a fotovoltaiikus felhasználásra. A szerves napelemek kutatói azzal számolnak, hogy ezek a cellák életciklusuk végén gyorsan lebomlanak, kisebb környezetterhelést jelentenek majd. A hatásfokuk sokat fejlődött a kezdeti 1-3 százalékhöz képest 5-6 százalékra, míg élettartamuk 3-5 évről 7-8 évre emelkedett. 2023-ban a Shanghai Jiao Tong Egyetem kutatói által készített cella elérte a 19,2 %-os hatékonyságot [6].

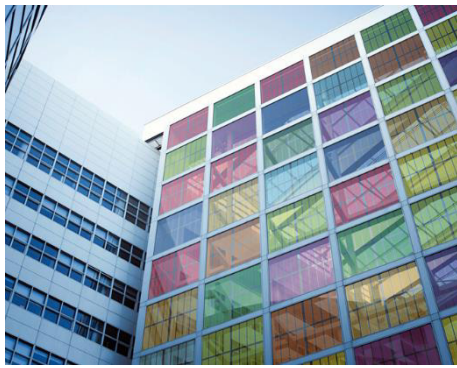
A legfejlettebb tandem architektúra nagyon ígéretesek a könnyű, olcsó szerves napelemek alapanyaga ként, szerves donor és akceptor anyagok kombinálásával. Az új, alacsony sávzélességű a közeli infravörös (NIR) sugárzás fotoaktív anyagok kifejlesztésével az elmúlt tíz évben jelentős előrelépés történt. Az alacsony sávú donor és a nem-fullerén akceptor anyagok széles sávú, a NIR tartományra kiterjesztett napfényfedettséggel általában szorosabban szuperponált elektronpályákat, könnyebb π elektron delokalizációt, nagyobb dielektromos állandót, erősebb dipólusmomentumot és alacsonyabb gerjesztett kötési energiát mutatnak, mint a széles sávú szerves fotovoltaiikus anyagok. E tulajdonságuk miatt az alacsony sávzélességű fotovoltaiikus anyagok - beleértve az homogén és tandem architektúrákat is jelentős szerepet játszanak a nagy teljesítményű szerves napelemekben [7].

A donor és az akceptor anyagok súlyarányának optimalizálása, az ultraalacsony sávűanyagok hozzáadása harmadik komponensként a NIR fényhasznosítás hatékonyságának növelése érdekében, valamint az aktív réteg vastagságának változtatása a töltésfelhalmozás és a fotongyűjtés közötti egyensúly megteremtése érdekében mind az aktív réteg tervezésének kreatív megközelítései közé sorolhatók. Az áttetsző felső elektróda széles körű optimalizáláson ment keresztül, amelynek célja az aktív rétegekkel való jobb kompatibilitás, a látható fénytartományban kiegyensúlyozott vezetőképesség és áteresztőképesség, valamint az infravörös közeli (NIR)- vagy ultraibolya fénytartományban megnövelt visszaverő képesség volt. Az eszköztanika szempontjából szelektív transzmissziót és reflexiót valósítottak meg a fényáteresztés ha-

tékonyágának és az átlagos transzmisszióknak az egyidejű javítása érdekében a szerves fényérzékeny réteg mellé felvitt, fényvisszaverődés-gátló bevonat, optikai mikroüreg és dielektrikum-fém-dielektrikum (DMD) struktúra segítségével [7]. Az organikus tandem kategória esetében „Institute of Semiconductors–Chinese Academy of Sciences” mutatta be rekordhatékonyágú prototípusát még 2019-ben, akkor a csúcserték 14,2% volt [8].

Jelenleg az építészetben való kísérleti alkalmazásuk tűnik a legkézenfekvőbb megoldásnak, mivel:

- beesési szögre és déli tájolástól való eltérésre kevésbé érzékenyek,
- számos, akár egyenetlen felületű hordozóanyag-típusra felvihetők,
- színezhethők, mintázhatók igény szerint (2. a ábra),
- fényáteresztők, üvegfelületek pótlására alkalmasak (2. b ábra),
- nagy felületek lefedésére alkalmasak.



(a)



(b)

2. ábra. (a) A DSC szerves napelem ablakként történő felhasználása és (b) üvegház borításaként történő felhasználása.

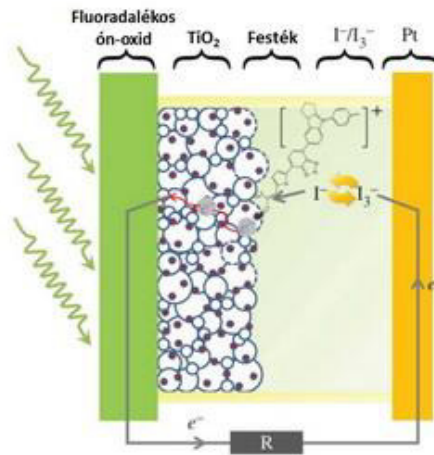
4. A FESTÉKÉRZÉKENYÍTETT SZERVES NAPELEM CELLÁK (DSSC)

Az organikus polimerekkel szemben a DSSC-technológia sokkal inkább a természetes fotoszintézist utánozza, csak a zöld klorofil helyett jellemzően vöröses festékréteg nyeli el a fotonokat és generál elektromos feszültséget, és itt a víz bontása helyett egy fémrétegben (jellemzően ruténiumban, vagy titán-dioxidban) mozgatja meg az elektronokat, azaz hoz létre elektromos töltést. Ahogy a 3. ábra is mutatja, a folyamatot a I- - I3- ionok redox reakciója zárja [1, 9].

A tervek szerint kis költséggel lesz előállítható és viszonylag jó, bár az 1. táblázatban felsorolt feltörekvő PV listából a legkisebb hatásfokú eszközök. Működésük egy a fényérzékenyített anód és egy elektrolit között kialakított fotó-elektrokémiai rendszeren alapul. Főként német nyelvterületen, de az angol szakirodalomban is szokás Grätzel cellának is nevezni, mivel az első korszerű változatot Grätzel és O'Ragen fejlesztette ki 1991-ben [9].

A szokásos nyomtatási technológiákkal előállíthatók, rugalmasak és átlátszóak. A felhasznált alapanyagok nagy része olcsó, de olyan anyagok, mint a platina és a ruténium jelenleg nem küszöbölhetők ki és a folyékony elektrolit korlátozza az összes időjárási körülmény közötti használatot. Egyszerű felépítésük, alacsony anyagköltségeik, az áttetszőségük és a mechanikai rugalmasság terén mutatkozó előnyeik miatt a DSSC-k nagy potenciállal rendelkeznek, mint

fotovoltaikus eszközök. A cellák stabilitása és az alacsony fotoelektromos konverziós hatások a DSSC-k kereskedelmi forgalomba hozatalának legfőbb akadályai. A DSSC-k esetében az elméletileg elérhető maximális energiaátalakítási hatásfokot 32%-ban számították ki; az eddig dokumentált legnagyobb hatásfok 2020-ból származik, „École Polytechnique Fédérale de Lausanne” munkatársainak köszönhetően. Ez az érték azonban csak 13%. Kiterjedt próbálkozásokat tesznek a DSSC hatékonyságának növelésére az irányadó paraméterek kutatásával. Számos kísérletet tettek egy ellenelektroda létrehozására, egy széles tiltott sávú félvezető módosítására, hogy az munkaelektrodként szolgáljon, valamint a festék redoxpárjának és abszorbanciájának optimalizálására [1, 7].

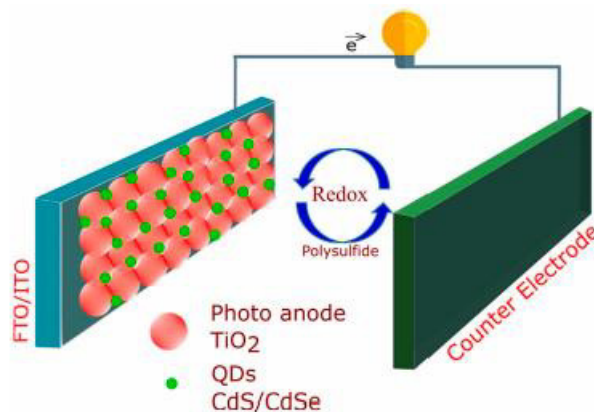


3. ábra: A DSSC napelem cellák felépítése és működése [9].

5. A KESZTERIT ALAPÚ ÉS KVANTUMPONT NAPELEM CELLÁK

A keszterit, leggyakrabban $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTSSe), alapú napelem cellák kutatása 2009-ben ért el először komoly eredményt, akkor a hivatalos csúcserték 9,7% volt (IBM), azonban a rekord 2023-ban már 14,9% lett Institute of Physics, Chinese Academy of Science kutatóinak köszönhetően [2]. A szakértők keszteritből álló cellákkal kezdtek el kísérletezni, ez egy olyan természetes ásvány, amely fotonelnyelőként viselkedik. A szelenizációs folyamat során elkerülhetetlenül másodlagos fázisok sorozata keletkezik, ami befolyásolja a pufferréteg és az abszorber közötti csatlakozást, és csökkenti a kitöltési tényezőt (FF). Emellett az $\text{Sn}(\text{S}, \text{Se})$ -t gyakran használják a szelenizáció folyamata közbeni Sn veszteség visszaszorítására, a felesleges $\text{Sn}(\text{S},\text{Se})$ lecsapódhat az abszorber felületén, amikor lehűlt. Az abszorber mélyszintű hibái kationos (Ag, Cd, Ge) adalékkal hatékonyan passziválhatók. A kadmium-szulfidból álló pufferréteg felvitele javítja a teljesítményt, de a vegyület előállítása igen szennyező. Később koreai kutatók cink-ón-oxidból hoztak létre puffert, amely sokkal kevésbé káros, mint a hagyományos plusz réteg. A keszterit és a puffer között az elektronok áramlását is sikerült feljavítaniuk, így növelve tovább a teljesítményt [10].

A kvantumpont cellák esetében a sokkal dinamikusabb volt a fejlődés, mert 2010 óta 4,4%-ról 18,1%-ra nőtt a hitelesített rekordhatékonyság értéke, ami az Ulsan National Institute of Science and Technology munkatársainak köszönhető [2]. A kvantumpont napelem (QDSC) egy olyan napelem-konstrukció, amely kvantumpontokat használ fotovoltikus anyagként. A kvantumpont (QD) egy néhány nanométer átmérőjű félvezető nanorészecske, jellemzően 2-10 nm, amelyek elektromos és optikai jellemzői különbözik a nagyobb részecskékétől. A kvantumpontok sávrésekkel rendelkeznek, amelyek méretük változtatásával az energiaszintek széles tartományában állíthatók. Ez a tulajdonság vonzóvá teszi a kvantumpont cellákat [1].



4. ábra: A kvantum pont napelem cellák felépítése és működése [9].

6. A FELTÖREKVŐ NAPELEMÉK KUTATÁSÁBÓL SZÁRMAZÓ LEGFRISEBB EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A 2. táblázat tartalmazza minden vizsgált kategóriában a legjobb hitelesített napelem cellák eredményeit. A kategóriák a hatásfok szerint lettek csökkenő sorrendben sorba rendezve, valamint tartalmazza a hitelesítés dátumát, az üresjárási feszültség értékét ($U_{\text{ü}}$), a rövidzárási áram-sűrűséget (J_{RZ}), a kitöltési tényezőt (FF) és a kísérleti cella méretét (A, felület) [2]. Egyértelműen látszik, hogy a perovszkit szerkezetű anyagokat alkalmazó technológiák élen járnak a feltörekvő napelem cellák csoportjában. A nagyjából 20-30 éves múlttal rendelkező organikus napelemek kicsit lemaradásban vannak a nem-organikus anyagokkal szemben, míg a legdinamikusabb fejlődést az elmúlt 10 évben a kvantum pontcellákat kutató intézmények produkálták.

2. táblázat: A feltörekvő PV lista, az elért maximális hatásfok szerint csökkenő sorrendben

| Típus | Dátum | Hatásfok | $U_{\text{ü}}$ | J_{RZ} | FF | A |
|----------------------|---------|----------|----------------|-----------------------|------|--------------------|
| | [év-hó] | [%] | [V] | [mA/cm ²] | [%] | [cm ²] |
| perovszkit-szilícium | 2023-10 | 33,9 | 1,966 | 20,76 | 83 | 1 |
| perovszkit | 2023-08 | 26,1 | 1,174 | 26,13 | 85,2 | 0,0493 |
| perovszkit-CIGS | 2020-02 | 24,2 | 1,768 | - | 72,9 | 1,045 |
| organikus | 2023-04 | 19,2 | 0,9135 | 26,61 | 79 | 0,0326 |
| kvantum pont | 2020-10 | 18,1 | 1,14 | 75,8 | - | 0,12 |
| keszterit | 2023-05 | 14,9 | 0,5554 | 36,93 | 72,5 | 0,2694 |
| organikus tandem | 2019-07 | 14,2 | 1,5812 | - | - | 0,048 |
| festékérzékenyített | 2020-12 | 13 | 1,04 | - | 80,4 | 0,116 |

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SHAH, N.; SHAH, A.A.; LEUNG, P.K.; KHAN, S.; SUN, K.; ZHU, X.; LIAO, Q. *A Review of Third Generation Solar Cells, Processes*, 11. kötet, 1852, 2023, <https://doi.org/10.3390/pr11061852>
- [2] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (megtekintés dátuma: 2023. december 11.)
- [3] MARQUES LAMEIRINHAS, R.A.; TORRES, J.P.N.; DE MELO CUNHA, J.P. *A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications*, Energies, 15. kötet, 1823, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15051823>
- [4] <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells/> (megtekintés dátuma: 2023. december 11.)
- [5] <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.2c00274> (megtekintés dátuma: 2023. december 11.)
- [6] Zhu, L., Zhang, M., Xu, J.; Li, C.; Yan, J.; Zhou, G.; Zhong, W.; Hao, T.; Song, J.; Xue, X.; Zhou, Z.; Zeng, R.; Zhu, H.; Chen, C.; MacKenzie, R.C.I.; Zou, Y.; Nelson, J.; Zhang, Y.; Sun Y.; Liu F. *Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology*, Nature Materials, 21. kötet, pp. 656–663, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01244-y>
- [7] PASTUSZAK, J.; WĘGIEREK, P. *Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development*, Materials, 15. kötet, 5542, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15165542>
- [8] JIA, Z.; MA, Q.; CHEN, Z.; MENG, L.; JAIN, N.; ANGUNAWELA, I.; QIN, S.; KONG, X.; LI, X.; YANG, Y.M.; ZHU, H.; ADE, H.; GAO, F.; LI, Y. *Near-infrared absorbing acceptor with suppressed triplet exciton generation enabling high performance tandem organic solar cells*, Nature Communications, 14. kötet, 1236, 2023, doi: 10.1038/s41467-023-36917-y
- [9] https://www.vilaglex.hu/Fizika/Html/DSSC_.htm (megtekintés dátuma: 2023. december 11.)
- [10] ZHAO, Y.; ZHAO, J.; CHEN, X.; CATHELINAUD, M.; CHEN, S.; MA, H.; FAN, P.; ZHANG, X.; SU, Z.; LIANG, G. *Suppressing surface and bulk effect enables high efficiency solution-processed kesterite solar cells*, Chemical Engineering Journal, 479. kötet, 147739, 2024, doi.org/10.1016/j.cej.2023.147739

ÉPÜLETREZGÉSEK MÉRÉSE LÉZER INTERFEROMETRIKUS MÓD- SZERREL

MEASUREMENT OF BUILDING VIBRATION WITH LASER INTERFERO- METRICAL METHOD

PALLA Gyula

tanszéki mérnök, gyula.palla@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc-Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-142

Kivonat: Ebben a mérési sorozatban épületrezgések mérésével foglalkoztam lézer-doppler interferometriás módszerrel. Próbáltam ideális mechanikai leválasztást találni az épületről a mérőrendszerre terjedő zaj kiszűrésére. Többféle elrendezést állítottam össze és ezek mért adatait vizsgáltam. Irodalomkutatást végeztem az épületek rezgéseinek jellegzetes frekvenciáiról és ezeket összehasonlítottam a saját mérési eredményeimmel. Próbáltam minél részletesebben felbontani a kimért frekvenciaspektrumot és meghatározni bizonyos frekvenciákon megjelenő rezgések okait, valamint, hogy a különböző okok milyen jellegzetes mintázatokat hoznak létre a spektrumban.

Kulcsszavak: lézer Doppler rezgésmérés, épületrezgések, épületek sajátfrekvenciái

Abstract: In this series of measurements, I measured building vibrations using the laser Doppler interferometry method. I tried to find an ideal mechanical isolation to filter the noise propagating from the building to the measuring system. I set up several arrangements and analysed their measured data. I conducted a literature search on the typical frequencies of building vibrations and compared them with my own measurement results. I tried to resolve the measured frequency spectrum in as much detail as possible and to determine the causes of vibrations at certain frequencies and how different causes create distinctive patterns in the spectrum.

Keywords: laser Doppler vibration measurement, building vibrations, natural frequencies of buildings

1. BEVEZETÉS

Az első és legfontosabb ok, ami miatt mérnünk kell a rezgéseket, hogy a rezgések szerkezeti károkat okozhatnak, és potenciálisan veszélyes állapotokat eredményezhetnek [1]–[3], különösen olyan kritikus szerkezetek esetében, mint a hidak, tornyok és gátak tervezése, figyelembe kell venni azok rezgésekre való érzékenységet [4].

Az épületek bizonyos alacsony frekvenciákra fokozottan érzékenyek, ez teszi különösen nagy kihívássá a földrengésbiztos épületek tervezését földrengésveszélyes területeken [5] [6]. A rezgések mérésével azonosíthatjuk ezeket a frekvenciákat és a gyenge pontokat a szerkezetben, korrekciós intézkedéseket hozhatunk a biztonság megőrzése érdekében.

A rezgések miatt a gépek és berendezések működésének hatékonysága csökkenhet, vagy idő előtt meghibásodhatnak [3] [7]–[10], talán az ipari termelés során ez az elsődleges, de a gyártási folyamatok számos egyéb pontján is felhasználható a rezgésmérés.

A rezgések negatív hatással lehetnek az élő környezetre is: a mechanikus rezgések például zavarhatják az élővilágot, megzavarhatják az ökoszisztémákat [11] [12]. A rezgések mérésével lépéseket tehetünk az előírások betartatására, a negatív környezeti hatások csökkentésére.

Az épületrezgéseket a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetének Fizikai Intézeti Tanszékén a II. számú laboratóriumban (A/2 épület 3. emelet 10. ajtó) mértem lézer interferometrikus módszerrel (továbbiakban: LDV).

2. MÉRÉSI MÓDSZER

Az LDV mérés nagy pontossága miatt a különösen zavarérzékeny rezgésmérések kategóriájába tartozik, ezért egy mérés megtervezése során nagy hangsúlyt kell fektetni a zavarvédelem kialakítására. Az LDV mérések folyamán mindig probléma épületrezgések mérésének esetén, hogy a mért rezgések ráterjednek a mérőeszközre, és megzavarják a mérést. Ennek hatásai a mért eredményekre az általam összeállított mérések adatsoraiban láthatóak voltak.

Az épületrezgéseket általában az épületen belül mérjük, tehát a mérőeszköz valamilyen alátámasztáson vagy felfüggesztésen keresztül mindig a rezgő rendszer részét képezi. Ha az épületen kívülről végezzük a mérést, akkor is ráterjednek a talajon keresztül az épület rezgései a mérőműszerre és elfedik a mérni kívánt eredményeket [13]. Ezért a talaj rezgéseitől való mechanikai leválasztást kell alkalmazni.

Az LDV-mérés optimális megtervezéséhez a következő tényezőket kell figyelembe venni:

Alapvető fontosságú, hogy az LDV-rendszert stabil és rezgésmentes környezetben helyezzük el. Bármilyen külső forrásból származó zavar vagy rezgés zajt vihet be a mérésekbe, ami rontja a pontosságot. Ideális esetben, ha ez megoldható, az LDV-t rezgésszigetelt asztalra vagy olyan helyiségbe kell helyezni, ahol a külső rezgések minimálisra csökkenthetőek.

Az LDV lézersugarat pontosan a célterületre kell irányítani. A pontos mérésekhez a lézersugarat a tárgy felületére merőlegesen kell igazítani. A merőlegestől való bármilyen eltérés hibákat okozhat a mérésekben, ami befolyásolja az eredmények megbízhatóságát.

Az LDV rendszer és a céltárgy közötti távolságot gondosan be kell állítani. A megfelelő távolság megválasztásával a mérési folt mérete szabályozható, ami lehetővé teszi a kis vagy lokalizált területek pontosabb elemzését.

A jelminőség javítása érdekében az optikai beállítást is optimalizálni kell, mely magában foglalja a lézerteljesítmény, a modulációs frekvencia és a detektor beállítását. A lézerteljesítményt megfelelő szinten kell beállítani, hogy elegendő jelerősséget biztosítson anélkül, hogy a detektor telítődne. A megfelelő reflexió érdekében a fal felületére javasolt például fényvisszaverő fólia ragasztása. A modulációs frekvenciát a várható rezgési frekvenciatartomány alapján kell kiválasztani, biztosítva a tárgy mozgásának pontos követését.

Az LDV rendszert minden mérés előtt kalibrálni kell a pontos eredmények garantálása érdekében. A kalibrálás során egy ismert tulajdonságokkal rendelkező referencia céltárgyat kell mérni a mérési jelek és a tényleges elmozdulási vagy sebességértékek közötti kapcsolat megállapítása érdekében.

Az LDV-mérések tervezésekor elengedhetetlen a biztonsági óvintézkedések figyelembevétele. A lézersugarak károsak lehetnek a szemre, ezért megfelelő árnyékolásról, védőszemüvegről és figyelmeztető címkékről kell gondoskodni. Ezenkívül óvintézkedéseket kell tenni az esetleges visszaverődések vagy diffrakciók elkerülése érdekében.

A következő feladat a mérési paraméterek meghatározása. El kell dönteni, hogy milyen rezgési paramétereket szeretnénk mérni, például gyorsulást, sebességet vagy elmozdulást. Figyelembe kell venni az alkalmazás szempontjából releváns frekvenciatartományt és amplitúdó szinteket. Ezek után be kell állítani a mérésadatgyűjtő kártyát, kiválasztani a mintavételezési frekvenciát és beállítani a mérési tartományt, valamint egyéb beállításokat elvégezni, amennyiben ezek szükségesek.

A mérési pont kiválasztása, annak eldöntése, hogy hol szeretném mérni a rezgéseket, legalább olyan fontos, mint az azt megelőző lépések. A pont lehet egy szerkezet meghatározott pontja, gépek közelében vagy bármely más kívánt helyen. Az én mérésemnél ez a labor falának egy kiválasztott pontja volt.

Meg kell tervezni a mérés időtartalmát. Lehet egyszeri mérés, folyamatos megfigyelés vagy időszakos mérés. Az időtartam a mérés céljától és a vizsgált rendszer dinamikájától függ.

A méréshez kiválasztott műszer egy Polytech LDV-100 Portable Digital Vibrometer. Maga a mérőeszköz egy analóg jelet állít elő, amit 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával dolgozok fel. Ebből egy LabView program megrajzolja az épület rezgésének idő-sebesség grafikonját. A mérésadatgyűjtő kártya helyes beállítása kritikus a mérés elvégzése szempontjából. Az általam használt mérésadatgyűjtőkártya típusa: USB 631 OEM.

Ez egy hosszabb mérési folyamat során kezelhetetlen mennyiségű adatot eredményezne, ezért ez az adatsor csak bizonyos esetekben került mentésre.

A LabView program úgy van megírva, hogy abban az esetben menti el az idő-sebesség adatsorokat, ha két feltétel teljesül:

- az adatsorban található maximális frekvencia kisebb, mint 3,1 Hz és
- a rezgés amplitúdója nagyobb, mint 0,01 mm/sec

Ez azért szükséges, mert ettől nagyobb frekvenciájú és amplitúdójú rezgések, már például az ajtónyitás során is keletkeznek és emiatt sok felesleges adat kerül mentésre, amelyet a későbbiekben nehezen lehetne elválasztani a ténylegesen mérni kívánt jelektől. A fenti feltételek teljesülése esetén 10 másodpercen keresztül a program egy külön táblázatban gyűjti össze az idő-sebesség adatokat. A program FFT segítségével folyamatosan készíti a frekvencia-sebesség adatsorokat és ezeket átlagolja a mérés teljes idejére. Ebből készíthetők el az Átlagos FFT-diagramok.

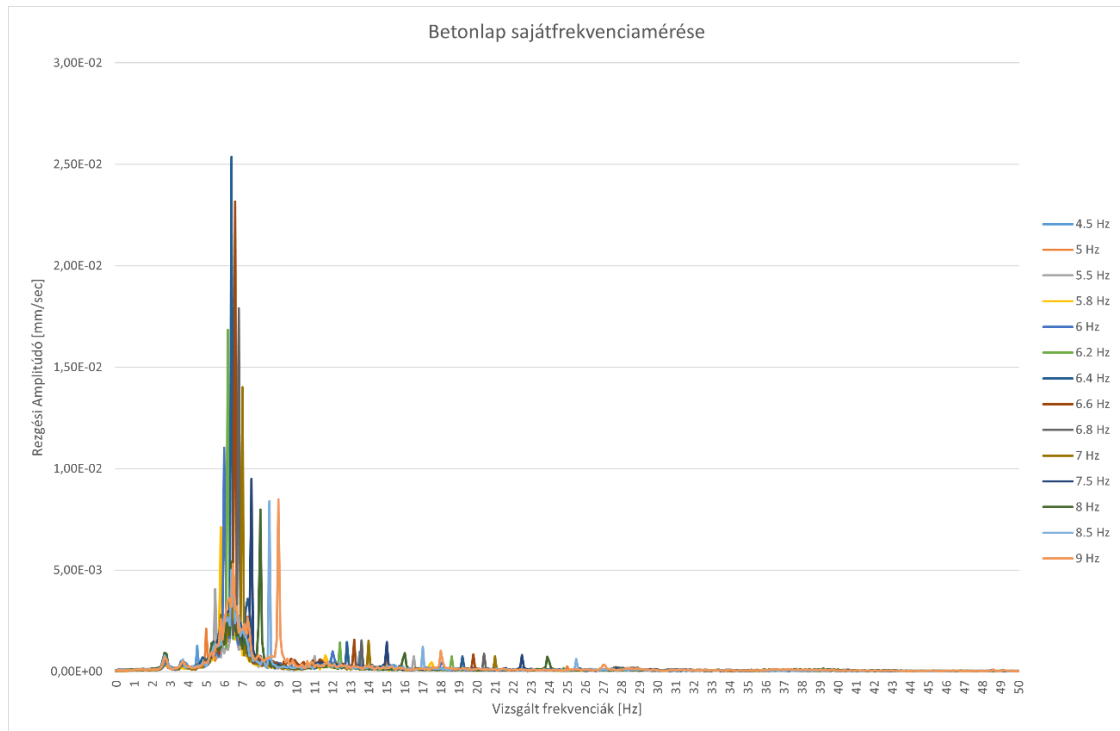
A mérések részletesebb megértéséhez, a tervezéshez felhasználtam a Matiss Malahs: Design of a Low Cost Laser Vibrometer System [14] című tézisét és Enrico Primo Tomasini, Paolo Castellini: Laser Doppler Vibrometry A Multimedia Guide to Its Features and Usage [15] című könyvét.

Az LDV épületrezgés mérés ideális mérési távolsága olyan tényezőktől függően változhat, mint az LDV érzékenysége és a mérendő rezgés jellege. Általánosságban azonban ajánlott az LDV-t olyan távolságban elhelyezni, ahol a sugárított mérete (átmérője) elég kicsi a kívánt rezgésjel pontos méréséhez, ugyanakkor elég messze van ahhoz, hogy elkerülje a közeli tárgyak vagy szerkezetek okozta interferenciát. Az LDV épületrezgés méréshez megfelelő mérési távolság jellemzően néhány métertől néhány tíz méterig terjed. Szükséges lehet különböző távolságokkal kísérletezni, hogy megtaláljuk az adott mérési követelményekhez optimális feltételeket és jelminőséget. Emellett fontos még figyelembe venni, hogy az LDV-t a gyártó által megadott ajánlott távolsághatárokon belül használjuk.

3. MÉRÉSEK ÉS EREDMÉNYEK

Mechanikai leválasztásként méréseimhez betonlapot használtam. A mért jelek mechanikai rezgésszűrésének szempontjából fontos a betonlap sajátfrekvenciája, mert ezen a frekvencián erősíti fel legjobban az épülettől a talajon keresztül átvett rezgéseket. A betonlap sajátfrekvenciája benne van abban a tartományban, amelyben a mérni kívánt rezgések. Ez azt jelenti, ha a betonlapot önmagában leteszem a talajra és a mérőműszert rárakom, a kapott eredményekből rajzolt grafikonon 6,4 Hz-en egy erős amplitúdó maximum jelenik meg, ami a betonlap saját rezgése. A betonlap megfelelő alátámasztásokkal kombinálva viszont kiválóan alkalmas az épületről az eszközre terjedő mechanikai rezgések csökkentésére, főleg a vizsgálni kívánt frekvenciatartományban.

A betonlap sajátfrekvenciájának megméréséből (1. ábrán) látható, hogy a betonlapot különböző frekvenciákon gerjesztve 6,4 Hz-nél kiugróan nagy amplitúdójú rezgéseket mérhetünk összehasonlítva a többi frekvenciával, ezért ez a betonlap sajátfrekvenciája. Többször megismételve a mérést hasonló eredményekre jutottam. A grafikonról az is kiolvasható, hogy a 6,4 Hz-es rezonanciafrekvencia közelében lévő komponenseket jobban erősíti. Ez a kísérleti módszer alkalmas az általam vizsgált rendszer sajátfrekvenciájának meghatározására és lényegesen egyszerűbb, mint a matematikai modell elkészítése.



1. ábra: Betonlap sajátfrekvencia mérésének grafikonja (saját szerkesztés)

A mérések elvégzése során egyre láthatóbbá vált a mechanikai rezgésszűrő rendszer tömegfüggése. A betonlap tömege nagy hatással volt a mért eredményekre. Általánosan minél nagyobb volt a tömeg, annál szebben elkülönültek az épületek saját rezgései az átlagos FFT diagramokon, viszont a betonlap sajátfrekvenciája, ami 6,4 Hz, egyre nagyobb zajt vitt be a rendszerbe.

Hogy ezt igazolni tudjam, megmértem a rendszer tömegfüggését 3 elrendezésben. A betonlapok súlya nem tökéletesen egyezik meg, de közel azonos és a vizsgálat szempontjából azonosnak tekinthető (~15 kg). Így vizsgáltam a rezonanciafrekvencia felerősödését a mért jelben egyszeres, kétszeres és háromszoros betontömeg esetén.

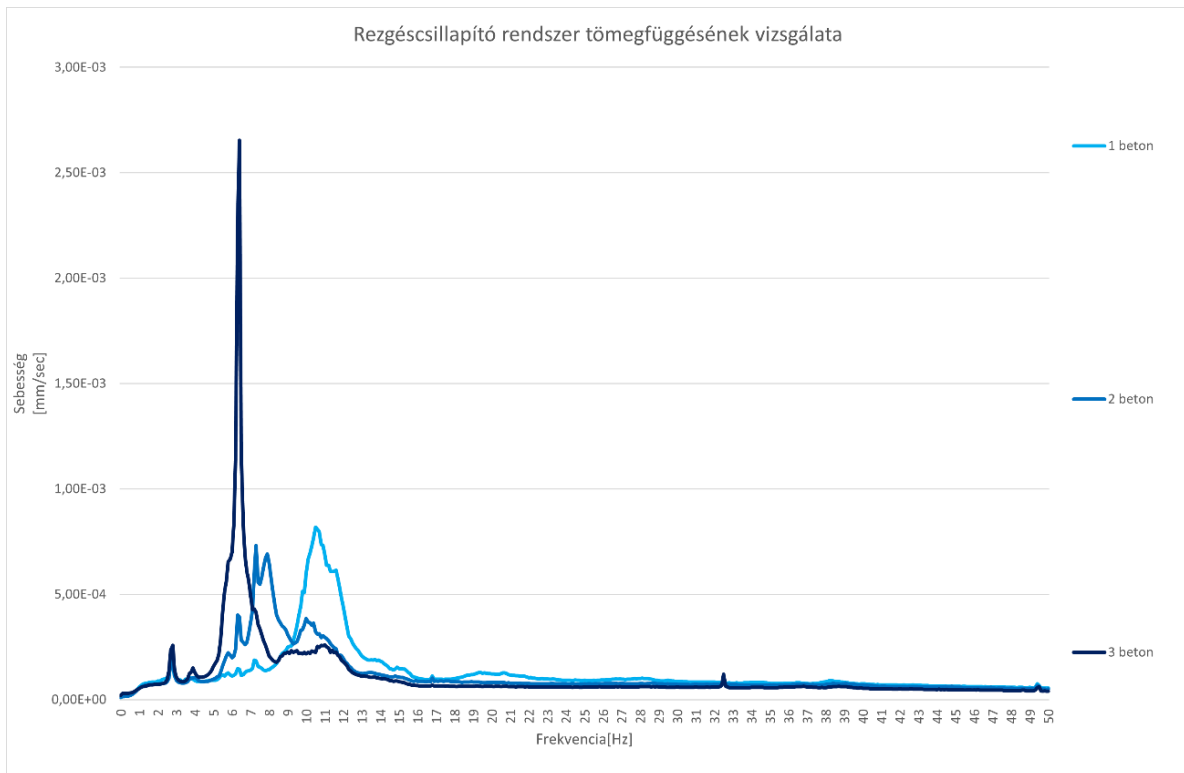
A kísérleti elrendezés 4 db egyforma nyomásra felfújt gumipárnából és egyforma betonlapokból állt. Minden mérést 24 órán keresztül végeztem hétvégi napokon, hogy az épület használatából eredő zajt a minimálisra tudjam csökkenteni.



2. ábra: A mechanikai rezgéselvezető rendszer tömegfüggésének vizsgálata
Mérési összeállítás

Csak a betonlapok számát változtattam a mérések során, minden más paramétert igyekeztem változatlanul hagyni.

A grafikonokon látható, hogy a betonlapok számának növelésével az egyes órák FFT átlagára számított átlag egyre inkább a 6,4 Hz frekvencia felé tolódik, ami a betonlap kimért sajátfrekvenciája. A három elrendezés átlagait a 3. ábra hasonlítja össze.



3. ábra: Rezgéscsillapító rendszer tömegfüggésének vizsgálata (saját szerkesztés)

A mérések adatsorainak átlagos FFT diagramjai alapján egyértelműen levonható az a következtetés, hogy minél nagyobb a gumipárnákra helyezett betonlap tömege, annál több zajt visz be a sajátfrekvenciáján a rendszerbe. Mivel ezeken a frekvenciákon a betonlap rezgései erősebbek, mint az épület rezgései, ezért a mérőműszer erősebben rezeg, mint a vizsgált épület. A tömeg növelése mindenképpen megfontolandó az épületrezgések mérésénél a nem kívánt zajok kiszűrésére. A betonlap jelenléte alacsony frekvenciatartományokon egyértelműen javította a mérési eredményeket.

Minden mérési folyamat általános jellemzője, hogy a mért eredményeknek részét képezik olyan környezeti hatások is, amelyeket a mérésnek nem célja vizsgálni, sőt ezek jelenléte kifejezetten káros a mérési folyamat szempontjából, mivel elfedik a vizsgálni kívánt jelenséget. Ezeket összefoglaló néven a méréstechnikában zajnak vagy zavarnak nevezzük, és csökkentésük minden mérés célja.

A 4. ábrán láthatóak a mérőeszköz különböző elrendezései. Méréseim során gumipárnákat, különböző méretű betonlapokat és napraforgómaggal több, különböző magasságban feltöltött tálcát használtam az épületről a mérőrendszerre terjedő mechanikai rezgések kiszűrésére. A cél mindig az volt, hogy az épület mérni kívánt karakterisztikus sajátfrekvenciáit (1. táblázat) tudjam mérni.



4. ábra: Padlóra, gumipárnákra- és betonlapra, 5 cm-vagy 16 cm napraforgómagra és betonlapra helyezett mérőeszköz

Ha a mérőműszert leteszem mindenfajta mechanikai leválasztás nélkül a talajra, az tökéletesen együtt rezeg a mérni kívánt épülettel, tehát nem mér semmit. Ez abból látható már a mérés megkezdésekor, hogy a mért adatsorok FFT diagramja kisimul. Minél jobb a mechanikai leválasztás, annál jobban megjelennek az épületek jellemző sajátfrekvenciái (1. táblázat) a spektrumban.

Egy másik lehetséges hiba a mérőműszer alá helyezett betonlap sajátfrekvenciájából adódik. Minél nagyobb a betonlap tömege, annál jobban felerősíti az épületről az eszközre terjedő 6,4 Hz körüli frekvenciákat

Az 5. ábrán látható szigetelő gumipárnák megfelelő nyomásbeállítása fontos, amennyiben használni szeretnénk őket a mérések során.



5. ábra: Gumipárnák nyomásának beállítása a rendszer földtől való mechanikai szigetelésére

Különböző vastagságú napraforgómag rétegre és betonlapra helyeztem a mérőeszközt (4. ábra) és napokig vizsgáltam, hogy a mechanikai szigetelés függvényében hogyan változnak a mérési eredmények. A betonlap mérete adott volt, és ezzel összemérhető napraforgómag rétegvastagságokat választottam.

Különböző rezgésszigetelő rendszerek alkalmazásával végeztem el összehasonlítható méréseket. Az épületrezgés mérés a nem reprodukálható mérések csoportjába tartozik. Sok ki nem zárható külső tényezőtől függ a mért eredmény. Ezért, hogy a mérések összehasonlíthatóak legyenek, érdemes hasonló kezdeti feltételek mellett végezni őket, vagy statisztikai módszereket használni a torzítások csökkentésére. Ennél a méréssorozatnál minden mérést nyári időszakban, hétköznap és 24 órán keresztül végeztem, és próbáltam odafigyelni az időjárási viszonyokra is. A mért eredményeket mindig Excel táblázatban átlagoltam és a napi átlagokat hasonlítottam össze, hogy csökkentsem az épület használatából és az időjárás változásaiból adódó napszakos eltérések hatásait a mért eredményekre.

4. AZ ÉPÜLETEK SAJÁTFREKVENCIÁJA

Az épületek rezgéseinek jellemző frekvenciái számos tényezőtől, például az építmény típusától, méretétől, építőanyagától és kialakításától függően változhatnak.

Az épületek rezgéseiben megfigyelhető néhány gyakori jellemző frekvencia:

- A szerkezeti rezonanciafrekvenciák (1. táblázat)

Ezek azok a frekvenciák, amelyeken az épületszerkezet a sajátfrekvenciáinak köszönhetően maximális amplitúdóval hajlamos rezegni. Ezeket az épület tömege, merevsége és csillapítási jellemzői határozzák meg.

- Az időjárás által kiváltott rezgések

Az épületek a szélterhelés által okozott rezgéseket mutathatnak, különösen a magas vagy karcsú szerkezetek esetében. E rezgések frekvenciái a szélesebségtől, a széliránytól, az épület alakjától és aerodinamikai tulajdonságaitól függenek. A másik könnyen mérhető időjárási körülmény kiváltotta rezgéstípus az eső okozta nagyfrekvenciás rezgések.

- A szeizmikus frekvenciák

Földrengés során az épületek különböző frekvenciájú rezgéseket tapasztalhatnak a szeizmikus hullámok jellemzőitől függően. Ezek a frekvenciák hosszú periódusú, közepes periódusú és rövid periódusú rezgések kategóriájába sorolhatók.

- A gépek által kiváltott rezgések

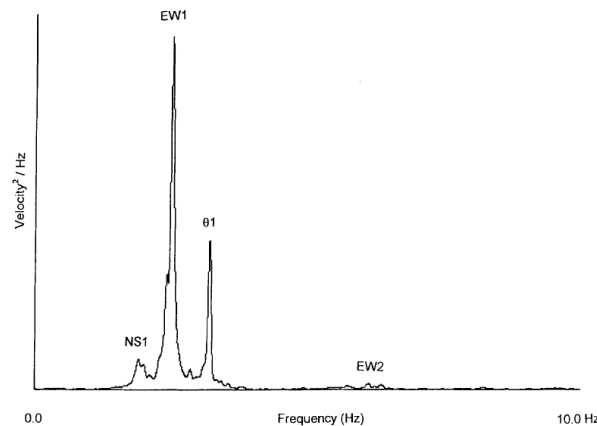
A mechanikus berendezésekkel, például generátorokkal, liftekkel rendelkező épületekben az ilyen gépek működése okozhat rezgéseket. A méréseim során a műhelyben lévő köszörű bekapcsolásának hatását vizsgáltam a mért eredményekre. E rezgések frekvenciája jellemzően a gépek fordulatszámával függ össze.

- Az emberi tevékenységek

Az épületen belül a járás, az ugrálás vagy a nehéz tárgyak mozgatása által keltett rezgések frekvenciája az ember számára érzékelhető tartományba eshet. Ezek a frekvenciák általában alacsonyok, és függhetnek a tevékenység jellegétől és intenzitásától.

Fontos megjegyezni, hogy a 6. ábrán lévő jellemző frekvenciák általános megfigyelések, és a konkrét frekvenciák különböző épületek esetében eltérőek lehetnek. Továbbá, a rezgések nagysága és az épületre gyakorolt hatásuk olyan tényezőktől függ, mint a rezgések amplitúdója, időtartama és az épület csillapítása.

Az 1. táblázatot csak példaként vettem ki a földrenges.hu egyik cikkéből, azért, hogy a szerkezet sajátfrekvenciára gyakorolt hatását szemléltetni tudjam. Természetesen az épület sajátfrekvenciáját minden esetben egyedileg több pontból mérve és az adatokat összevetve kell meghatározni. A táblázatok csak nagyságrendi támpontokat adhatnak a mérnöki tervezés során.



6. ábra: Az épületek jellegzetes sajátfrekvenciái [18]

1. táblázat: Épületek jellemző sajátfrekvenciái [19]

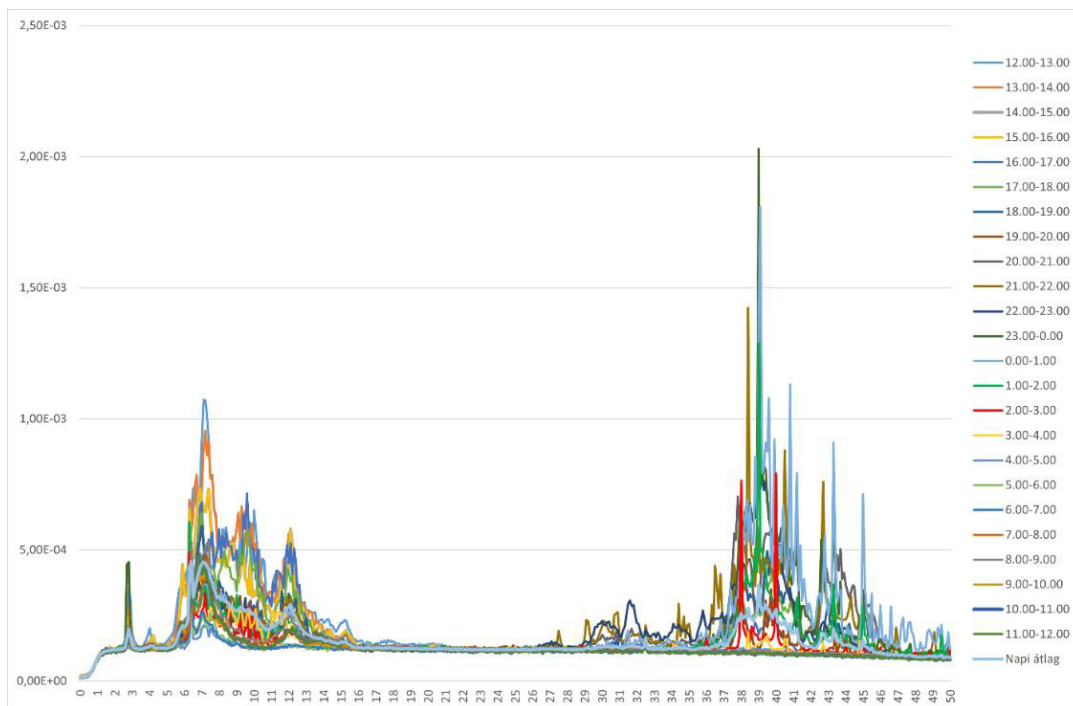
| Építmény típusa | Tipikus saját-periódus/frekvencia |
|---------------------------|-----------------------------------|
| egyszerű tartószerkezetek | 0,1 s / 10 Hz |
| 2 szintes épületek | 0,2 s / 5 Hz |
| 5 szintes épületek | 0,5 s / 2 Hz |
| 10-20 szintes épületek | 1-2 s / 0,5-1 Hz |
| felhőkarcolók, függőhidak | 2-6 s / 0,16-0,5 Hz |

4.1. AZ ÉPÜLETEN BELÜL MÉRT FREKVENCIÁK

A Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetének Fizikai Intézeti Tanszékén a II. számú laboratóriumban (A/2 épület 3. emelet 10. ajtó) mértem a rezgéseket a következő mérési beállításokkal rezgésmentes asztalról:

- 10.000 Hz mintavételi frekvencia
- 10 szekundumos mérési időtartam
- 5.000 Hz-ig terjedő maximális frekvencia a Fourier-spektrumon
- 0,1 Hz felbontás

A mérések során a 7. ábrán lévő Fourier spektrumot kaptam.



7. ábra: 2023.09.25. 12-12 órás mérés épületrezgés mérés (saját szerkesztés)

Mivel a mérőrendszert elsősorban az épületrezgések vizsgálatára állítottam össze ezért került bele egy 1-50 Hz-ig terjedő sáváteresztő szűrő, melyre a csúcserkékek keresése miatt volt szükség. Egyrészt „0 Hz”-nél és 3993 Hz-nél jelentkező csúcs zavarta meg a mérést, amelyek nem

köthetők az épület rezgéséhez. Bár a későbbiekben kiderült, hogy 50 Hz-es felső határ is szükségtelenül magas, de mivel hátrányosan nem befolyásolta a mérésemet így a későbbiekben sem változtattam meg.

Az 1-50 Hz-ig terjedő szakasz felbontása a következő:

- **2,7-2,8 Hz** az épület saját rezgése, amit alátámaszt egyrészt a szakirodalom, miszerint egy 4 emeletes épület saját rezgése ebbe a tartományba esik, másrészt a közelmúltban mért egyes hazai, illetve külföldi földrengések során ez a frekvencia ugrott meg leginkább, és ez csengett le leglassabban, mindazok ellenére, hogy ezt a tartományt nem tudták gerjeszteni az Intézetben a korábbi próbálkozások során.
- **6,3-6,5 Hz** a rezgésmentes asztal rezonancia frekvenciája, ennek rezonancia görbét vizsgáltam korábbi mérések során. Ez függ például a légrugók nyomásától is, de akár a környezeti hőmérséklet vagy a légnyomás is befolyásolhatja. Ehhez további szenzorok és mérések lennének szükségesek.
- **6,6-13 Hz** frekvencián több csúcs is található, ezek az egész napi átlagnál nem igazán vehetők ki a grafikonból, de a reggeli, illetve a délutáni időszakban felerősödnek, illetve az éjszakai/hajnali méréseknél jelentősen lecsillapodnak vagy akár teljesen el is tűnnek. Ezeket valószínűleg az épületben történő aktivitás, illetve a körülötte jelentkező forgalom váltja ki. A hétfégi méréseknél hasonlóan az éjszakaihoz, ezek a frekvenciák alacsonyabb amplitúdóval vannak jelen, mint a hétköznapokon, a munkaidő elején, illetve végén.
- **15-30 Hz** terjedő tartományban, első sorban a lokálisan gerjeszthető frekvenciák jelennek meg (ha vannak), mint például, a labor előtti folyosón történő emberi tevékenység (lépkedés).
- **30-50 Hz** között (illetve afelett) az egyes szerkezeti elemek gerjesztett rezgése jelenhet meg, pl. erős eső (zápor, zivatar) során 30-40 Hz közötti csúcsok jelennek meg a grafikonban, melyek a födémről az épület falára és a mérési pontra áttérjedő rezgések. Másik példa a Miskolci Egyetemen tartott szabadtéri zenei rendezvények. Ezek közül az egyik legjelentősebb a MEN, amelynek nagy hangerejű éjszakai koncertjei során, a mély hangok megrezgetik az épület egyes elemeit, ezek a csúcsok a 30-50 Hz között jelentkeztek.
- **45-50 Hz** között alkalmanként megjelenő csúcsok. Ezek nem egész nap meglévő rezgések és nem található bennük sem napi, sem heti, vagy havi ismétlődés vagy rendszer. A mérési pont alatti szinten lévő szintek valamelyikén indul be valamilyen olyan gép, aminek periodikus mozgást végző része van.

Hasonló csúcs jelenik 25 Hz-nél is, ha az Intézet műhelyében be van kapcsolva a nagy köszörűgép. Ha a kis köszörű működik, akkor 50 Hz-nél jelenik meg a csúcs. Nem kizárt, hogy a nagynál felezve van az áttétel és ezért fele a sebessége is. Kikapcsolás után lassulás közben lehet látni, ahogy ezek a csúcsok alacsonyabb frekvenciára, kerülnek, tehát más-más gép más-más frekvencián jelenhet meg.

Amikor ezt a mérést végeztem egy 19 Hz frekvencia csúcs is többször előjött nagy amplitúdóval, amit nem tudtam azonosítani, de az átlagolásnál is szépen látszott. Ezeknek a tartományoknak nyilván van átfedésük, illetve tolódhatnak is, vannak olyan részek is, amiket a mai napig sem tudtam pontosabban beazonosítani vagy valamilyen jelenséghez kötni.

A 21. ábrán a mérés közben a LabView felületén látható FFT diagramok vannak képernyőképként kimentve a köszörű eltérő működési állapotai között. A piros nyilak a köszörű működése közben kialakuló csúcsokat mutatják. Ezekből is szépen látszik, hogy az épületben működő nagyteljesítményű gépek mennyire befolyásolják az épületek rezgéseit.



8. ábra: A Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetében található kis és nagy köszörű, mint mérhető rezgésforrás



9. ábra: Kis-és nagy köszörű sajátfrekvenciájának megjelenése az épület rezgésein és ennek ábrázolása az átlagos FFT diagrammon (saját szerkesztés)

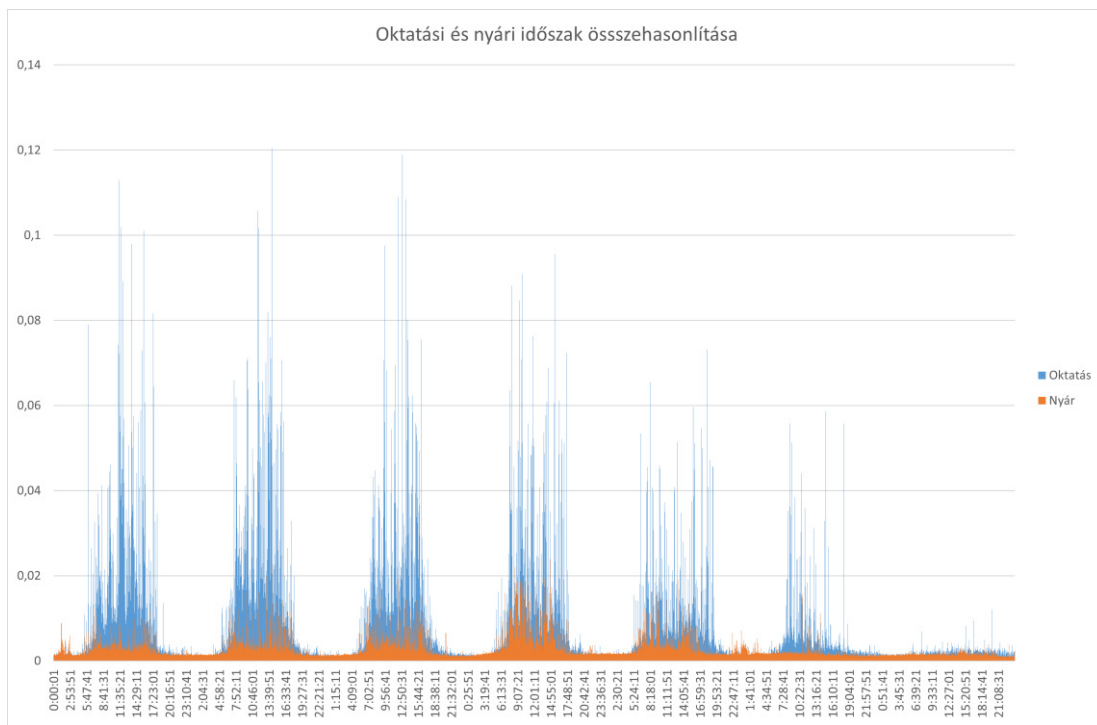
A LabView felületén látható három grafikon fentről lefelé a következő:

- Sebeség FFT: Az x-tengelyen a frekvencia van ábrázolva Hz-ben, az y-tengelyen az elmozdulás sebessége, az amplitúdó mm/sec-ban.
- Átlagos FFT: Az x-tengelyen a frekvencia van ábrázolva Hz-ben, az y-tengelyen az elmozdulás sebessége, az amplitúdó mm/sec-ban.

- **Sebesség-Idő Diagram:** Az x-tengelyen az idő van ábrázolva 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával, az y-tengelyen az elmozdulás sebessége, az amplitúdó mm/sec-ban.

4.2. AZ EMBERI TEVÉKENYSÉGEK HATÁSA AZ ÉPÜLETEK REZGÉSEIRE

Az emberi tevékenység hatásait nagyon jól szemlélteti a következő grafikon (10. ábra), amely adatsora a Miskolci Egyetem Épületében lett mérve és az oktatási és nyári időszakban mért épületrezgéseket hasonlítja össze. Az emberi tevékenység hatása nyilvánvalóan látszik az amplitúdó maximumokon.

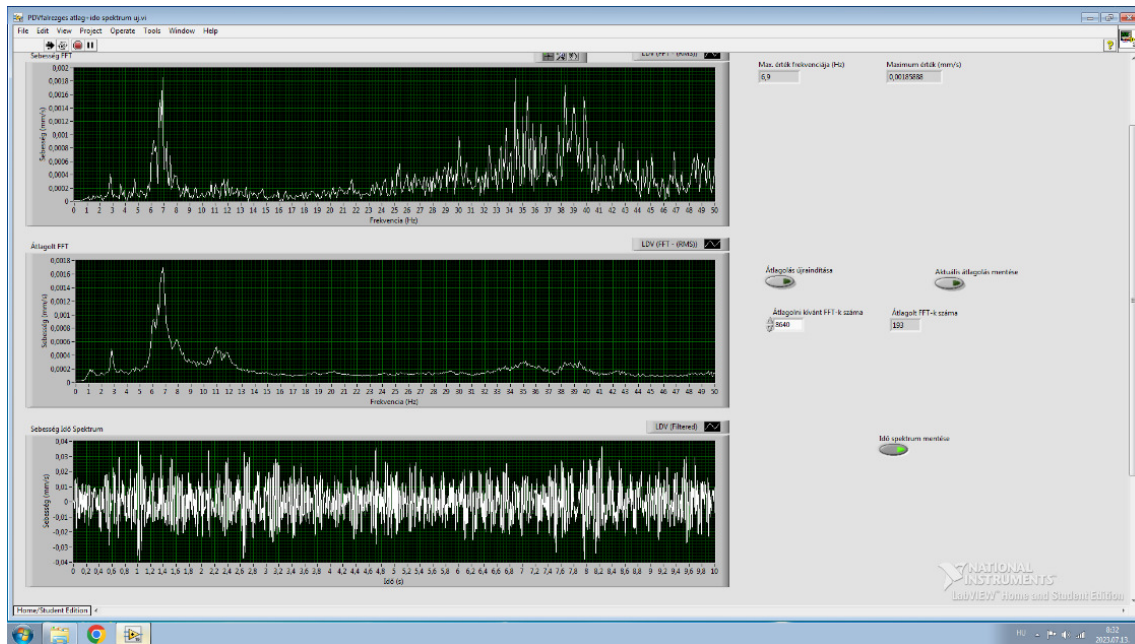


10. ábra: Oktatási és nyári időszak összehasonlítás (saját szerkesztés)

Minél többet használják az épületet, annál erősebbé válnak a rezgések és ez napszakok (reggel-dél-este) és időszakok (oktatási és-nyári időszak) szerint is jól megfigyelhető mintázatokat hoz létre az adatsorokban.

4.3. AZ ESŐ HATÁSA AZ ÉPÜLETEK REZGÉSEIRE

Esős időben végzett mérés eredménye a 11. ábra. Látszik, hogy eső hatására mennyire megnőnek a magas frekvenciás komponensek a jelben. Ezek közvetlenül nem károsak az épületekre, de a sebesség FFT diagramon egyértelműen látszik a hatásuk. Az időjárási viszonyokat mindig figyelembe kell venni az épületrezgések vizsgálatánál.



11. ábra: Az eső hatása az épületrezgésekre (saját szerkesztés)

4.4. A SZEIZMIKUS AKTIVITÁS HATÁSA AZ ÉPÜLETREZGÉSEKRE

A szeizmométereket általában földrengések vagy más természeti események által okozott talajrezgések mérésére használják. Használhatók szerkezetek, például épületek vagy hidak rezgéseinek mérésére is. Fordítva is igaz, az épületrezgések mérése kiválóan alkalmas a közelben lévő szeizmikus aktivitás vizsgálatára is.

A közelmúltban több nagyobb erejű földrengés történt, amelyek epicentruma Magyarországhoz közel volt, és ezek láthatóak voltak a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetének laborjában végzett épületrezgésmérések grafikonjain is, ahol ebben az irányban is folynak kutatások.

Az épületrezgések vizsgálata információkat szolgáltathat földrengésekről is. Ezek hatása sokszor hozzáadott információként jelentkezik az épületrezgések mérése során, mivel a földrengéseknek nagyon jellegzetes, az épületrezgésektől láthatóan elkülönülő frekvenciaspektroma van. A katasztrófavédelem honlapján elérhetőek a közelmúltban Magyarországon mérhető földrengések adatai.

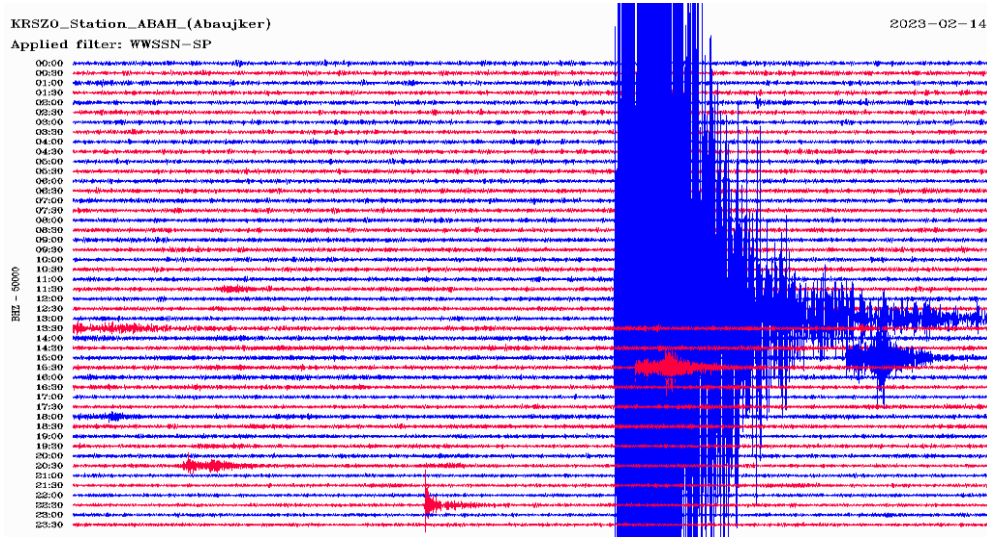
*„Ismét földrengés volt a romániai Zsilvásárhely közelében
2023.02.14. 15:00*

Magyarország délkeleti részén a lakosság is érezte az 5,6-os erősségű földmozgást.

A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumának tájékoztatása szerint újabb földrengés történt délután Romániában, Zsilvásárhely közelében, az országhatártól megközelítőleg kétszáz kilométerre délkeletre. A földmozgás erőssége 5,6-es volt a Richter-skálán, epicentruma közel volt a hétfői, 5-ös erősségű földrengéséhez. A földmozgást Magyarország délkeleti részén a lakosság is érezte, a szeizmológiai observatórium erről Békéscsabáról és Szegedről is kapott jelzést. Ugyanakkor károkról eddig nem érkezett bejelentés a katasztrófavédelemhez.

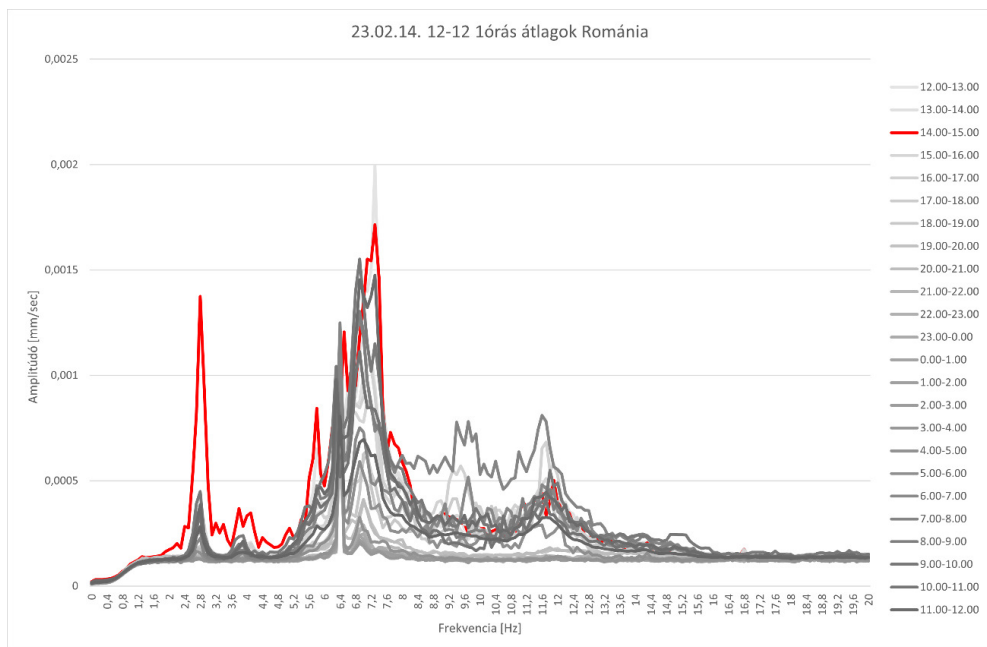
Értesítési terület: Országos”[16]

A 12a ábra grafikonján jól látható, hogy 12:00-13:00 között olyan erős kilengések keletkeztek a szeizmométerek grafikonjain és ugyan ezek voltak megfigyelhetőek a Miskolci Egyetem A/2-es épületének rezgésein is. A 13a ábrán lévő piros vonal 14:00-15:00 óra között nagy erejű elmozdulást mutat 2.8 Hz frekvencián, amely a földrengések egyik tipikus sajátfrekvenciája.



12a ábra: 2023.02.14. Szeizmikus Aktivitás Abaujkéri-mérőállomás [20]

A 13a ábrán lévő piros vonal, amelynek egyik csúcsa az alacsony frekvenciatartományban van 2,8 Hz-nél, a 2023.02.14.-i Romániai földrengés során volt észlelhető a Miskolci Egyetem A/2-es épületének rezgésein.



13a ábra: 23.02.14. 12-12 1 órás átlagok Románia 5.6 (saját szerkesztés)

Földrengés esetén a talajmozgás rezgést okozhat az épületben. Ez jelentős károkhoz vezethet, a rosszul megépített vagy sérülékeny szerkezetek össze is omlhatnak.

Az emberi és szeizmikus tevékenység sokféleképpen és különböző intenzitással képes rezgéseket generálni az épületekben. E rezgések lehetséges hatásainak kezelése fontos szempont az épületek tervezése és építése során, különösen azokban az esetekben, amikor az épület biztonsága és szerkezeti integritása veszélybe kerülhet.

Az egyik földrengést saját mérésem során sikerült rögzítenem. A mért adatok órára bontott Átlagos FFT diagramja a 13.2. ábra. A 20-21 óra között mért értékeken látszik a 2,7 Hz-nél csúcsot mutató amplitúdó maximum, amely a Szlovákiai földrengés következménye.

„Földrengés volt Szlovákiában

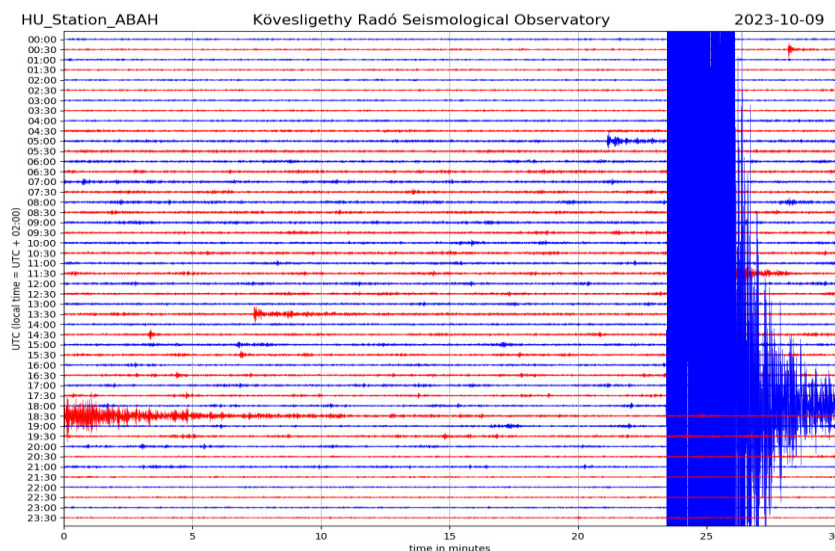
2023.10.09. 20:59

Egyéb esemény

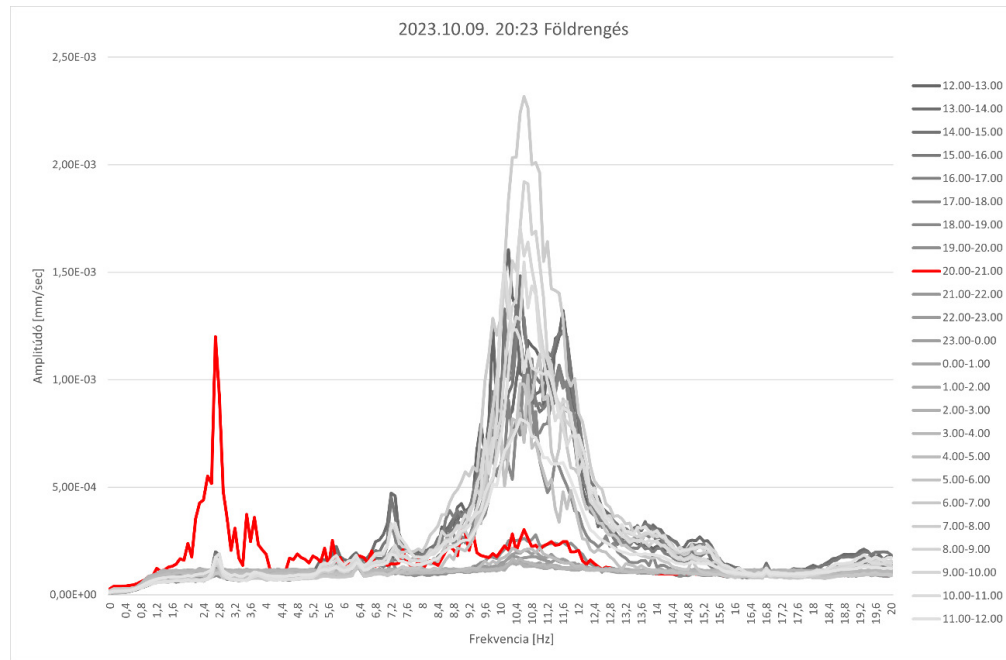
5,2-es magnitúdójú földmozgást regisztráltak Kassától mintegy hatvan kilométerre.

A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriumának közleménye szerint október 9-én, helyi idő szerint 20:23 perckor 5,2-es magnitúdójú földrengés keletkezett Szlovákiában, Kassától mintegy hatvan kilométerre. A földmozgást több magyarországi településen is érezték, de károkról eddig nem érkezett bejelentés a katasztrófavédelemhez.

Értesítési terület: Országos” [17]



12b. ábra: 2023.10.09. Szeizmikus Aktivitás Abaujkéri-mérőállomás [20]



13b ábra: 23.10.09. 20:23 12-12 Földrengés (saját szerkesztés)

Földrengéseket vizsgálni nehéz, mivel sztochasztikus események, és viszonylag ritkán fordulnak elő. A mérőkártya beállításai miatt a rendszer mindig regisztrálja, ha szeizmikus tevékenységet észlel, és külön adatsorba menti ki annak amplitúdó értékeit 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával.

5. KÖVETKEZTETÉS

Az épületrezgések mérésére az LDV, mint módszer kiválóan alkalmas. A mért adatok feldolgozásával rengeteg információt lehet kinyerni az épület állapotáról, kihasználtságáról, az épületben működő erősáramú gépek működési állapotáról vagy akár az épületre ható szeizmikus aktivitásról is. Ezek a jelenségek mind vizsgálhatóak a mért és számított adatok vizualizációjával.

A kimért karakterisztikus frekvenciák jól szeparálhatóak voltak és ezek mind megegyeztek a szakirodalomban leírt várható értékekkel.

Az elvégzett mérésekből és azok kiértékeléséből következtetni lehet arra, hogy az épületrezgések méréséhez a megfelelően beállított 4 gumipárnán elhelyezett betontömb volt a legalkalmasabb, mert az ezen végzett mérésekben különült el legláthatóbb módon az épület sajátfrekvenciája a frekvenciaspektrum többi, az épületekre nem karakterisztikus komponensétől. A betonlap alkalmas mechanikai leválasztásra, de figyelembe kell venni a hatását a mérési eredményekre és külön meg kell mérni a rezonanciafrekvenciáját, valamint a tömegfüggés hatását a mérési eredményekre.

A méréssorozatok során két olyan földrengést is sikerült regisztrálni, amelyek epicentruma Magyarországhoz közel volt.

A pontosság fokozása érdekében mindig érdemes több óra, ha lehetséges, akár egy teljes nap óráinak átlagát figyelembe venni, hogy a napszakos eltérésekből adódó ingadozások kiátlagolódnak. Érdemes hasonló napokat választani, hogy összehasonlítható eredményeket kapjunk. Az időjárás, a szeizmikus aktivitás, a kiválasztott nap (hétköznap vagy munkanap) mind eltérő eredményeket mutat.

A rezgések karakterisztikáját figyelve sok következtetést lehet levonni az épületek tulajdonságairól, állapotáról, kihasználtságáról, a működő épületgépészeti elemek működési állapotáról, de az ezek által keltett rezgések sokszor egymásra szuperponálódnak, ezért további információk szükségesek az adatok értelmezéséhez.

Érdekesége volt a méréseknek, hogy utólag nagyon sok esemény visszakövethető a regisztrált spektrumokból, meg lehet mondani, mikor esett az eső, volt-e földrengés vagy nyitódott-e az intézet mágneszáras nagy üvegajtaja a mérés során. Ha konkrétan egy adott jelalakot, például az ajtónyitások számát és idejét szeretnénk vizsgálni, ezt könnyedén beállíthatjuk a mérőkártyán a mentési feltételek megfelelő megválasztásával.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] K. VOGIATZIS AND H. MOUZAKIS, “Ground-borne noise and vibration transmitted from subway networks to multi-storey reinforced concrete buildings” *Transport*, vol. 33, no. 2, pp. 446–453, 2018, doi: 10.3846/16484142.2017.1347895.
- [2] C. K. H., L. K. W., and B. T., “Building Response due to Subway Train Traffic” *J. Geotech. Eng.*, vol. 121, no. 11, pp. 747–754, Nov. 1995, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:11(747).
- [3] J. HESTER, S. PRABHU, S. ATAMTURKTUR, AND J. SORBER, “Remote and Wireless Long-term Vibration Monitoring of Historic Monuments” *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 3302–3307, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.09.416.
- [4] K. GHAEDI, Z. IBRAHIM, H. ADELI, AND A. JAVANMARDI, “Invited review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures” *J. Vibroengineering*, vol. 19, no. 5, pp. 3564–3580, 2017, doi: 10.21595/jve.2017.18900.
- [5] C. JULIÁN, H.-B. HUGO, AND R.-F. ASTRID, “Analysis of the Earthquake-Resistant Design Approach for Buildings in Mexico” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 15, no. 1, pp. 151–162, Jan. 2014, doi: 10.1016/s1405-7743(15)30013-5.
- [6] J. LANCASTER, *Engineering catastrophes: Causes and effects of major accidents*. Elsevier, 2005.
- [7] O. AVCI, O. ABDELJABER, S. KIRANYAZ, M. HUSSEIN, M. GABBOUJ, AND D. J. INMAN, “A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 147, p. 107077, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.YMSSP.2020.107077.
- [8] “Measuring the Effects of Vibration on Buildings | Dewesoft.” [Online]. Available: <https://dewesoft.com/blog/measuring-the-effects-of-vibration-on-buildings>. (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)
- [9] M. LAW, P. GUPTA, AND S. MUKHOPADHYAY, “Modal analysis of machine tools using visual vibrometry and output-only methods,” *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 357–360, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.043.
- [10] K. P. ANANDAN AND O. B. OZDOGANLAR, “An LDV-based methodology for measuring axial and radial error motions when using miniature ultra-high-speed (UHS) micromachining spindles” *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 172–186, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.001.
- [11] “ISO 2631-2:2003 - Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/23012.html> (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)
- [12] “ISO 2631-5:2018 - Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/50905.html#lifecycle>. (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)

- [13] B. J. HALKON AND S. J. ROTHBERG, “Taking laser Doppler vibrometry off the tripod: correction of measurements affected by instrument vibration” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 91, pp. 16–23, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.11.006.
- [14] MATISS MALAHS, “Design of a Low Cost Laser Vibrometer System,” *Eng. Phys.*, no. March, p. 53, 2015.
- [15] E. P. TOMASINI AND P. CASTELLINI, EDS., *Laser Doppler Vibrometry*. Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, DE, 2020.
- [16] “Ismét földrengés volt a romániai Zsilvásárhely közelében.” [Online]. Available: <https://www.katasztrofavedelem.hu/modules/vesz/esemeny/56214>. (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)
- [17] “Földrengés volt Szlovákiában” 2023. [Online]. Available: <https://www.katasztrofavedelem.hu/modules/vesz/esemeny/62337>. 23 (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)
- [18] A.J. BOUGARD AND B.R. ELLIS: *Laser measurement of building vibration and displacement/ Fig.2*, Centre for Structural Engineering., Building Research Establishment, Bucknalls Lane, Garston, Watford, Hertfordshire WD2 7JR, UK
- [19] http://www.foldrenges.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=20:foldrengesek-hatasa-epueletekre&catid=19&Itemid=23 (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)
- [20] <https://www.fdsn.org/networks/detail/HU/> (megtekintés dátuma: 2023.11.23.)