

Energiagyűjtő rendszerek a logisztikában

Energy harvesting systems in logistics

NAGY Sándor¹ doktorandusz hallgató, Prof. Dr. TAMÁS Péter² intézetigazgató, egyetemi tanár

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Logisztikai intézet, Miskolc, 3515 Miskolc-Egyetemváros

1. sandor.nagy5@student.uni-miskolc.hu

2. peter.tamas@uni-miskolc.hu

Abstract

Energy efficiency is also playing an increasing role in logistics systems. But to join the global trend, it is essential to be familiar with existing technology. In this publication we describe the most common energy harvesting systems and their applications. We examine the solutions used in logistics systems and the areas where energy harvesting systems can be introduced and applied. We will examine future application possibilities that contribute to a more efficient use of energy.

Keywords: Energy harvesting, tracking systems, logistics, IoT, Industry 4.0

Kivonat

A logisztikai rendszerekben is egyre nagyobb szerepet kap az energiahatékonyság. Globális trendhez való csatlakozáshoz viszont elengedhetetlen a meglévő technológiák ismerete. Publikációnkban ismertetjük az elterjedt energigyűjtő rendszereket, alkalmazási területeiket. Megvizsgáljuk, hogy a logisztikai rendszerek milyen megoldásokat használnak, mely területen nyílik lehetőség energigyűjtő rendszerek bevezetésére és alkalmazására. Megvizsgáljuk milyen jövőbeli alkalmazási lehetőségek vannak, amelyek hozzájárulnak a hatékonyabb energiafelhasználásra.

Kulcsszavak: energigyűjtés, nyomonkövetési rendszerek, logisztika, IoT, Ipar 4.0

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az energiapazarlás és a globális felmelegedés elleni küzdelem az élet minden területén egyre nagyobb hangsúlyt kap. A logisztikai nyomonkövetési megoldások tekintetében is fontos, hogy az alkalmazott rendszerek energiafelhasználása minimális legyen. Ez nem csak az alacsony fogyasztású, környezetbarát megoldások alkalmazását jelenti, hanem az energiavesztések csökkentését is. Korunkban már nem elegendő a belsőégésű motorokat elektromosra cserélni, vagy elektromos áram előállítására napelemeket, szélenergiaátalakítók alkalmazni, fontos az egyébként nem hasznosított energiák összegyűjtése és hasznosítása is. Az energigyűjtés (energy harvesting) sokféle technológiának az összefoglaló megnevezése. Leginkább úgy lehet definiálni, hogy a rendszerek működése során keletkező energiavesztéseket a környezetbe távozás helyett hasznosítjuk és elektromos energiává alakítjuk [1].

Korunkban a vezetékes, nagy rendszereket egyre inkább felváltják a hordozható, viselhető eszközök, amelyek tápellátására egyre nagyobb számban alkalmaznak energigyűjtő technológiákat. Fő felhasználási területek lehetnek azok, ahol a vezetékes tápellátás nem oldható meg, vagy nehezen elérhető helyen kerültek beépítésre az érzékelők. Az energigyűjtő (energy harvesting) rendszerek részben erre megoldásként szolgálva gyűjtik be, és raktározzák el az energiát, amivel hosszabb működést, kisebb energiafelhasználást érhetünk el. A logisztikában is egyre elterjedtebb Ipar 4.0 megoldások megkövetelik a minél pontosabb és aktuálisabb információk gyűjtését a teljes logisztikai folyamat során. Ehhez viszont elengedhetetlen az IoT rendszerek használata, amelyek ugyan kis energiaigényű eszközök, de fontos a stabil, megbízható és hosszútávú működésük a hatékony információgyűjtéshez. Ebben a publikációban szeretnénk ismertetni a logisztika területén jelenleg használt energigyűjtő megoldásokat. Elemezzük és összehasonlítjuk a különböző megoldásokat, kitérve azok előnyeire és hátrányaira, továbbá betekintést adunk a jövőbeli fejlesztési lehetőségekbe is.

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. Általános irodalomkutatás

Az energiagyűjtő rendszerek logisztikában történő alkalmazásának vizsgálatához szisztematikus irodalomkutatást végeztünk a Scopus adatbázisából kiindulva. A kereséshez általánosan a 2010 óta megjelent publikációkra kerestünk. Az “energy AND harvesting AND logistics” keresésre 331 találatot adott vissza a kereső. Viszont a találatok többsége a “harvesting” keresőszó miatt zömében mezőgazdasági betakarítás témakörében íródott publikációkat tartalmazott. A pontosabb találatok érdekében a kulcsszavak alapján a “logistics” kulcsszót tartalmazó szűrésre már csak 68 találatot adott a Scopus, ám de itt is a mezőgazdasági vonatkozás a téma túlnyomó többsége. A talált cikkek részletes áttekintés után csupán két cikk felelt meg a kutatási elvárásainknak. Az első cikk a magasraktárakban alkalmazott automata anyagmozgató rendszerek regeneratív fékrendszer használatát ismerteti [2], míg a második az energiagyűjtő rendszerek használatát vizsgálja a gépek monitorozása és a logisztikai folyamatok tekintetében [3]. Mivel az általános keresés alapján a logisztika területén belül kevés releváns publikáció található, ezért a keresést az elterjedtebb energiagyűjtő megoldások oldaláról közelítettük meg. A következőkben az ezen típusokhoz kapcsolódó irodalomkutatás eredményeit ismertetjük.

2.2. Energiagyűjtő rendszerek irodalomkutatása

Először meg kellett határozni mely rendszereket tekintjük át. Az elterjedt megoldások közül csak azokat vizsgáltuk, amelyek a logisztika területén is relevánsak, így a területeket az alábbiak szerint határoztuk meg:

- Mozgás, vibráció és egyéb kinetikai
- Elektromágneses (RF)
- Hőmérséklet különbség
- Természeti erőforrások (napfény, szél, geotermikus) [4][5]

Az energiagyűjtő rendszerek közé sorolják a napfény, szél, víz és geotermikus energia begyűjtését is [5]. Ezen források nem tekinthetők a szorosabban vett energiagyűjtő rendszerek közé, így az irodalomkutatásban ezeket nem vizsgáltuk, azonban felhasználásukat a későbbiekben ismertetjük. Mechanikai mozgások alkalmazási területeihez az “energy AND harvesting AND motion AND logistic” keresőkifejezést használva mindössze 6 publikáció található a Scopus adatbázisában, ám itt is a “harvesting” kulcsszó miatt nem releváns találatokat is kaptunk, így az “energy harvesting” kulcsszó alapján szűkített keresés már csak a releváns publikációkat adta. Ugyanezen módszerrel kerestünk a többi terület esetén is a “motion” szó helyére a megfelelő keresőszót beírva. A találatok ismertetése és értékelése a következő fejezetben található meg. A találatokban szerepel egy munkavégzés során emberi mozgásból energiát nyerő megoldás [7], valamint az intelligens gyárakban alkalmazott energiagyűjtő rendszerekről, amelyek beépíthetők a vezetéknélküli érzékelőkbe [8].

3. ENERGIAGYŰJTŐ MEGOLDÁSOK ALKALMAZÁSA A LOGISZTIKÁBAN

Az energiagyűjtő rendszerek angol kifejezése az energy harvesting, amely jobban definiálja a megoldások lényegét. A hétköznapi és ipari rendszerek esetén is számottevő energia vész el, amely az energiagyűjtő rendszerekkel részben vagy egészében hasznos energiaként felhasználható. Az energia visszanyerő rendszerek, mint például az elektromos hajtásoknál a fékezéskor visszanyert energia is részben ide sorolható [5]. A logisztikában napjainkban egyre fontosabbá válik az energiahatékonyság. Ennek érdekében a logisztikai rendszerek, ellátási láncok is alkalmaznak energiagyűjtő rendszereket, környezetbarát megoldásokat. Szállítmányozás területén elterjedtek a biodízel, illetve elektromos meghajtást használó szállítójárművek valamint a regeneratív fékrendszerek [2][5]. Természetesen ezek a megoldások nem tekinthetők konkrétan energiagyűjtésnek, hiszen csak a környezetre gyakorolt káros hatásokat csökkentik. Ugyanígy a raktárak és gyártóegységek területén a tetőre, illetve a közelben telepített napelemek, szélturbinák segítik csökkenteni a külső energia felhasználását vagy teljes egészében képesek kiváltani. Az anyagmozgató eszközök tápellátására, töltésére mindenképpen elegendő energia nyerhető, bár a rendszerek teljesítménye nagyban függ az időjárástól, a napszaktól, az év közben napfény intenzitás változásától, így nem jelentenek megbízható, állandó erőforrást. Ez a teljesítmény ingadozás áthidalható akkumulátor csomagokkal, amik a napközben megtermelt energiát képesek tárolni későbbi felhasználásra. Ezen megoldások viszont nem tekinthetők konkrét energiagyűjtő rendszereknek.

3.1. Mozgás, vibráció és egyéb kinetikus energiák használata

A mechanikai mozgásokból származó energiák gyűjtésére számos megoldást alkalmaznak széleskörűen. A munkavégzés során az emberi mozgásból is nyerhető energia, ami az emeléseknél segíti a dolgozót [6]. A vibrációs mozgásokat főként piezoelektromos eszközökkel alakítják át energiává. A piezoelektromos rendszerek félvezető kristályokat tartalmaznak, amelyek nyomásváltozás hatására adnak le feszültséget. Emellett az elektrosztatikus elven működő megoldások is léteznek, amelyeknél az energiagyűjtésre a két vezető közti távolság vagy átfedés változása okozza a feszültségkülönbséget. Ezekből származó energia felhasználható vezeték nélküli érzékelők tápellátására is [7]. A nagyobb mozgásokat jellemzően mágneses térben mozgó tekercsekkel gyűjtik elektromágneses indukció elvén. Ebben az esetben a mágnes és a tekercs is lehet a mozgó elem, a lényeg a mágneses tér változása a vezető körül. A nagyobb mozgás miatt természetesen nagyobb a gyűjthető energia is [5].

3.2. Elektromágneses (RF) energiák felhasználása

Legújabb energiagyűjtő megoldások a különböző eszközökből származó rádióhullámokat hasznosítják. A rádióhullámokból kinyerhető energia jellemzően alacsony viszont állandó energiaforrás. A környezetben működő elektrotechnikai, hálózati eszközök által kisugárzott rádióhullámok antennák segítségével begyűjthetők és az alacsony fogyasztású IoT eszközök tápellátásának segítésére használhatók fel [8]. A rádióhullámokból nyerhető energia felhasználása jellemzően raktárakban és gyártócsarnokokban történik, zárt térben. A technológia sajátosságaiból adódóan viszont fontos az előzetes felmérés, hiszen a fémek és folyadékok nagy mértékben elnyelik a rádióhullámokat, így a terület eltérő pontjain eltérő a kinyerhető energia mértéke is. Arra is figyelni kell, hogy az energiagyűjtő rendszerek ne rontsák a kommunikációt, ami a felhasználni kívánt rádióhullámok segítségével történik.

3.3 Hőmérséklet különbség felhasználása

A hőkülönbség felhasználására a Seebeck effektus használható. A fizikai megvalósításhoz két eltérő szennyezetségű félvezetőből blokkokat alakítanak ki, speciális elrendezésben, így az elem két oldalán mérhető hőmérsékletkülönbség elektromos áramot generál [9]. Létezik a fordított felhasználási területük is az ún. Peltier elemek, amikor feszültség hatására hőkülönbség jelentkezik a két felület között, ezt használják hűtésre például elektronikai eszközökben is [10]. A Seebeck effektus mellett az újabb kutatásoknak köszönhetően megjelentek az eltérő elven működő hőmérséklet különbséget kiaknázó megoldások. Ezek egyike olyan anyagokon alapul, amelyek a szilárd – folyékony fázisváltás közben termelnek elektromos áramot [11].

3.4. Természeti erőforrások felhasználása

A fény alapú energiagyűjtés a közismert napelemek használatával valósul meg. A felhasználás történhet kültérben, ekkor főként a napfényből nyert energiát tudjuk felhasználni, míg a belső terekben a világítás és a beszűrődő fény adja az energia alapját. Értelemszerűen a belső terekben kisebb energia gyűjthető, de az egyre hatékonyabb alacsony fogyasztású elektronikáknak így is elegendő energia gyűjthető be, akár a folyamatos működéshez is. A belső fény hasznosítására polimerek és vízbázisú gél használatával jelentős energia nyerhető [12].

A szél és folyadékáramlás esetén az elv hasonló, valamilyen forgó vagy alternáló mozgást végző mechanikai eszközzel a mozgásból elektromágneses generátor segítségével állítunk elő hasznos energiát. Az egyik legelső energiagyűjtő rendszerek közé sorolhatók, hiszen már évszázadokkal ezelőtt is léteztek szél és vízimalmok. A modern szélturbinák által termelt elektromos áram felhasználható a logisztikai rendszerek tápellátására, vagy gyártósorok üzemeltetésére, de lokálisan telepíthető kis teljesítményű szélturbinák is segíthetnek az áramköltségek csökkentésében. Szállítmányozás területén a vasúti szállítás szenzorjainak tápellátását segítheti egy a sínek közelébe telepített turbina, ami az elhaladó vasúti szerelvények menetszeléből nyer energiát [13].

3.5. Technológiák összehasonlítása

A különböző megoldások és alkalmazási területeinek összehasonlítását az 1. táblázatban foglaltuk össze. Amint az látható az egyes technológiák eltérő előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek, így fontos az alkalmazásuk előtt felmérni az adott feladat lehetőségeit, hogy optimális megoldást választhassunk az energiagyűjtésre. A természeti erőforrásokból nyert energiák is összehasonlításra kerülnek, hiszen azokkal is

csökkenthető a szükséges hálózati energia felhasználása, bár nem tekinthetők energiagyűjtő megoldásoknak. A rezgésekből, kinetikai energiából, rádióhullámokból és hőmérséklet különbségből nyerhető energiák viszonylag konstans, kiszámítható és stabil forrásoknak tekinthetők. Az alkalmazás helyétől viszont mindhárom rendszer hatékonysága függ, hiszen nem mindegy, hogy egy kisteljesítményű motor rezgéseit használjuk fel, vagy egy nagyméretű prégépét. A kinyerhető teljesítmény függ az adott mozgás, rezgés amplitúdójától is, értelemszerűen minél nagyobb az amplitúdó, annál nagyobb a nyerhető energia is. A rádióhullámok felhasználásánál tekintettel kell lenni a kommunikációs rendszerek zavartalan működésére is, ami előzetes felmérést és tervezést igényel. A termoelektromos rendszereknél a kis teljesítmény lehet korlát, hiszen a logisztikai folyamatok során ritkán található olyan eset, amikor nagy hőkülönbség jelentkezik egy határfelületen.

1. táblázat Energiagyűjtő rendszerek összehasonlítása (saját szerkesztés)

Típus	Alkalmazás helye	Előnyök	Hátrányok
Rezgések, mozgások	Szállítószalagok, gyártógépek szenzorjainak tápellátása	Helyben keletkező energia, nem kell kábelezni	Korlátozott felhasználás és kis teljesítmény
Rádióhullámok (RF)	Raktárak, gyártóüzemek	Folyamatosan elérhető	Kis teljesítmény, kommunikáció zavarása, elnyelődés
Termoelektromos	gyártásban keletkező hulladékhő felhasználása érzékelők tápellátására	Állandó teljesítményt biztosít	Korlátozott az alkalmazási terület
Napelem, szélenergia	Raktárak, elektromos járművek töltése	Mindenhol elérhető	Teljesítménye időjárásfüggő

4. ENERGIAGYŰJTÉS A NYOMONKÖVETÉSI RENDSZEREKBEN

A logisztikai nyomonkövetési rendszerekben jelenleg két technológia igényel saját áramforrást. A félaktív RFID-k, valamint az RTLS rendszerek TAG-jei tartalmaznak áramforrást, a többi azonosító, nyomonkövetési megoldás külső tápellátás nélkül működik. Az áramforrás ezen eszközökben lehet egyszer használatos elem, illetve újratölthető akkumulátor, amelyek töltöttségét valamilyen módon jelzi az eszköz [14]. Viszont a lemerült TAG nem képes a funkcióját ellátni, és ha nem ismert az utolsó pozíciója, akkor annak megtalálása problémás lehet. Az akkumulátort tartalmazó eszközökben lehet releváns az energiagyűjtő rendszerek használata, amivel kitolható a működési idő. A szállítójárművekre, illetve dolgozókra helyezett TAG-ek kétféle energiagyűjtő megoldást használhatnak: a rezgésen, mozgáson alapuló, illetve a rádióhullámokat hasznosító rendszerek. Az Ipar 4.0 és a digitalizáció fejlődésével a pontosabb és hatékonyabb működéshez elengedhetetlen az intelligens eszközök használata, így ezek tápellátása is egyre nagyobb hangsúlyt kap. Az IoT rendszerek használatával igény merülhet fel intelligens szenzorok tápellátásának támogatására is az energiagyűjtő technológiák használatával. Az irodalomkutatás eredménye azt mutatja, hogy jelenleg ezen eszközök tápellátását nem, vagy csak nagyon ritkán segíti energiagyűjtő rendszer. Mivel az IoT eszközök jellemzően több energiát használnak fel, ezek alkalmazásánál fontos, hogy a korlátozott akkumulátor kapacitást ismerve, annak töltéséről az energiagyűjtő rendszerek használatával gondoskodjunk. A piacon már kaphatók kis méretű, kombinált eszközök is, amelyek egyszerre több forrásból (rezgés, fény és rádióhullámok) képesek energiát nyerni, így a hatékonyságuk is nagyobb, mint az egy forrást használó eszközök. [15]

Az energiagyűjtő rendszerek használata az Ipar 4.0 számára elengedhetetlen főleg, ha az egyre szigorodó környezetvédelmi szabályoknak meg kell felelni. Jelenleg nincs olyan módszertan, ami segítené a nyomonkövetési rendszerekben az energiagyűjtő megoldások használatát, ezért jövőbeli kutatásunkban megvizsgáljuk, hogy milyen feltételek és milyen elemzések szükségesek a megfelelő rendszer

kiválasztásához, annak milyen megoldásokat kell tartalmaznia és a bevezetéséhez milyen erőforrásokra, fejlesztésekre van szükség a logisztikai rendszerekben. Lényegében célunk egy olyan módszertan kidolgozása, amelynek alkalmazásával egy adott logisztikai rendszerhez kapcsolódóan az ideális nyomkövetési rendszer kialakításának és működésének koncepciója elkészíthető.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban egy részletes szakirodalmi elemzésen keresztül megvizsgáltuk, hogy milyen energiagyűjtő rendszerek relevánsak a logisztika területén, továbbá azt, hogy mely megoldások milyen előnyökkel és hátrányokkal járnak. Továbbá ismertetésre került néhány felhasználási terület és megoldás is. Kitekintettünk a tágabb értelemben vett energiagyűjtésre is a természeti erőforrások felhasználásának vizsgálatával. A nyomkövetési rendszerek terén a publikációk áttekintése során nem találtunk olyan kidolgozott módszertant, amely az energy harvesting rendszerek adta lehetőségeket figyelembe véve adna megoldást a nyomkövetési rendszerek optimalizált tervezésére, működtetésére.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A 2023-1.2.4-TÉT-2023-00027 számú projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból a Kulturális és Innovációs Minisztérium támogatásával, a 2023-1.2.4-TÉT támogatási rendszer keretében valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Hesam Nejati Sharif Aldin, Mostafa Razavi Ghods, Farnoush Nayeipour, Masoud Niazi Torshiz. Mertens A *comprehensive review of energy harvesting and routing strategies for IoT sensors sustainability and communication technology*. Sensors International, 2024, Volume 5, 100258, ISSN 2666-3511
- [2] Rizqi Z.U., Chou S.-Y., Khairunisa A. *Energy harvesting for automated storage and retrieval system with sustainable configuration of storage assignment and input/output point*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 192, art. no. 103781
- [3] Thomasius, R., Guttowski, S., Brockmann, C., Benecke, S., Kravcenko, E., Nachsel, R. & Niedermayer, M. *Drahtlose Sensorsysteme für die zustandsorientierte Instandhaltung und Logistik*. Technisches Messen, 2013, 80(2), 45-52.
- [4] Adnan H. *Energy harvesting: State-of-the-art*. Renewable Energy, 2011, Volume 36, Issue 10, Pages 2641-2654.
- [5] AKSU, Umut, HALICIOGLU, Recep. *A review study on energy harvesting systems for vehicles*. Tehnički glasnik, 2018, 12.4: 251-259.
- [6] Limin Ren, Yang Zhou, Xu Zhang, Hengchuan Zhang and Yisong Tan. *Active self-powered human motion assist system*. IOP Publishing, 2024, Smart Materials and Structures, Volume 33, Number 5
- [7] Kanoun, O.; Khriji, S.; Naifar, S.; Bradai, S.; Bouattour, G.; Bouhamed, A.; El Houssaini, D.; Viehweger, C. *Prospects of Wireless Energy-Aware Sensors for Smart Factories in the Industry 4.0 Era*. Electronics, 2021, 10, 2929.
- [8] Bairappaka S., Ghosh A., Halimi M., Roy B. *A Dual-Band Dual-Polarized Rectenna for Efficient RF Energy Harvesting in Battery-Less IoT Devices With Broad Power Range*. International Journal of Communication Systems, 2025, 38 (3), art. no. e6103
- [9] Hussam Jouhara, Alina Żabnieńska-Góra, Navid Khordehgah, Qusay Doraghi, Lujean Ahmad, Les Norman, Brian Axccl, Luiz Wrobel, Sheng Dai., *hermoelectric generator (TEG) technologies and applications*. International Journal of Thermofluids, 2021, Volume 9, 100063
- [10] Mecke R., Kußmann P. *Thermoelectric generator for energy production from renewable source*. Central Renewable Energy and Power Quality Journal, 2024, 22 (2), pp. 70 - 75
- [11] Chengbin Yu, Guoqiang Li. *Electrical energy harvesting by connected form stable phase change material composites*. Energy Conversion and Management, 2024, Volume 299, 117851
- [12] Domenici, S., Speranza, R., Bella, F., Lamberti, A. and Gatti, T. *A Sustainable Hydrogel-Based Dye-Sensitized Solar Cell Coupled to an Integrated Supercapacitor for Direct Indoor Light-Energy Storage*. Solar RRL, 2025, 2400838
- [13] Wenjing Sun, David J. Thompson, Daniil Yurchenko, Dong Zhao, Zhenhua Luo, Irfan Khan, *Energy harvesting technologies on high-speed railway infrastructure: Review and comparative analysis of the potential and practicality*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, Volume 74, 104187
- [14] Pulvermacher R. *Finding the right RFID tag: Selecting an RFID tag can be a daunting task, so how do you decide?* InTech, 2010, 57 (7-8)
- [15] *Millimeter Scale Energy Harvesting Based Sensors*, <https://www.mouser.com/pdfDocs/Cymbet-Millimeter-Scale-Energy-Harvesting-Sensors.pdf> (Utolsó letöltés: 2025.03.04.)