

# A NAP- ÉS A SZÉLENERGIA LAKOSSÁGI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEINEK MODELLEZÉSE ISKOLAI PROJEKTFELADATBAN

Beke Tamás  
Nagyasszonyunk Katolikus  
Általános Iskola és Gimnázium, Kalocsa

Iskolánk gimnazista tanulóival megvalósítottunk egy hosszabb projektfeladatot, amelyben az energiaforrások szerepét vizsgáltuk. Ebben a cikkben elsősorban a nap- és a szélenergia lakossági felhasználásának számítógépes modellezéséről és a hozzá kapcsolódó fizikai problémákról szeretnék beszámolni.

## Megújuló energiaforrások

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük az olyan energiaforrásokat, amelyek természeti folyamatok során folyamatosan rendelkezésre állnak vagy újratermelődnek [1]. Ide tartozik a nap-, a szél-, a vízenergia, a biomaszsa.<sup>1</sup> A megújuló energiaforrásokon belül a nap- és a szélenergia bolygónk felszínének nagy részén rendelkezésre állnak és általában gazdaságosan kinyerhetők. Ez jelenthet nagyüzemi vagy kisfelhasználói kitermelést.

Az iskolai projektben azon a véleményen voltunk, hogy a nap- és a szélenergia felhasználása lakossági szinten sok helyen megvalósítható lehetne. Akik családi házban (saját ingatlanban) laknak, azok a ház tetejét napelemekkel fedhetnék be, a kertben pedig lehetőség nyílna néhány kisebb szélgenerátor felállítására is. Az így termelt villamos energiát pedig részben közvetlenül felhasználhatnák az ott lakók, részben akkumulátorokban tárolhatnák.

Az írás az ELTE Fizika tanítása PhD program keretében készült. Köszönetem fejezem ki *Tél Tamás* professzor úrnak, a kutatási program vezetőjének és a témavezetőnek, *Bene Gyula* egyetemi docensnek, akik hasznos észrevételekkel segítettek a cikk megírásában. Köszönöm a projektben résztvevő tanulók munkáját.

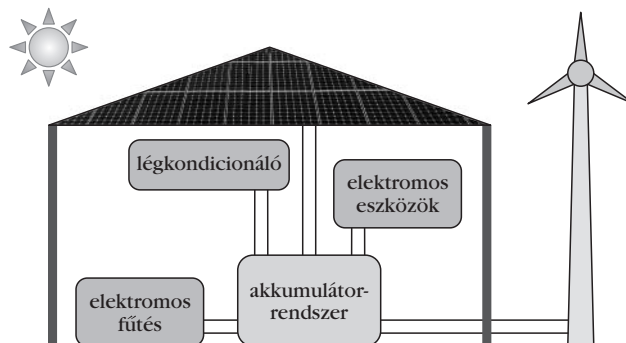
<sup>1</sup> Az árapály- és a geotermikus energiát is ide soroljuk.

A nap- és szélenergia hátrányaként szokták emlegetni, hogy az időszakos működés miatt talán éppen akkor termelnek villamos energiát, amikor nincs rá szükség; ezért a fölöslegesen megtermelt energiát tárolni kell, hogy akkor használhassuk fel, amikor nincs vagy nem elég az energiatermelés. Elméletileg több módszer is szóba jöhet: például akkumulátorok, vízvivattyús-tározós energiátárolás, vízbontás és a hidrogén eltárolása stb. A hatékony energiátárolás azonban nem egyszerű feladat.

## A házikó projekt

Ebben a részprojektben azt vizsgáltuk, hogy egy átlagos magyar háztartás energiaszükségletét fedezni tudnánk-e a nap- és a szélenergia segítségével. Valódi ökoház építésére nem volt pénzünk, helyette virtuáli-

*1. ábra.* A modellházikó: napelemek a tetőn, szélgenerátor az udvarban, az elektromos energiát akkumulátorokban tároljuk, a ház természetesen villamos fogyasztókat is tartalmaz.



san építettünk egy ilyen házikót napelemekkel, szél-generátorokkal és energiatároló akkumulátorokkal, valamint villamos fogyasztókkal (1. ábra). Azaz – a tanulókkal közösen – olyan számítógépes modellt készítettünk, amelyben a ház és környezetének fontosabb energetikai jellemzőit vizsgáltuk.

## Adatok gyűjtése

A projektben 30 tanuló és jómagam vettünk részt; összességében  $N = 31$  háztartás statisztikai adataival dolgoztunk. Elsőként kiszámoltuk, hogy mekkora egy átlagos háztartás. A projektben résztvevők adatai alapján  $n_a \approx 4$  fő adódott, illetve a házak (lakások) alapterületeinek átlaga  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  volt. (Ne feledjük, mi vidéken, családi házas környezetben élünk!)

## Energiafogyasztás

A projekt részeként a tanulók saját otthonukban figyelték a napi energiafogyasztásukat, illetve magam is feljegyeztem az otthon mért értékeket. Minden résztvevő minden nap azonos időpontban (esténként) leolvasta a villany- és a gázórák állását, illetve szobamérlegen megmérték, hogy aznap mennyi fát, szenet fűtöttek el (akik így – is – fűtenek). A tüzelőanyagok fűtőértékeit táblázatokból kerestük ki. Ezek alapján már mindenki kiszámolhatta az adott napi energiafelhasználását. A lakások és a környezet hőmérsékletét is feljegyeztük. Ez az adatgyűjtés segítette a tanulókat abban, hogy a hosszú távú munkavégzés fontosságát megértsék.

Az adatokat másnap összesítettük és kiszámítottuk, hogy az előző napon egy  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  alapterületű, átlagos méretű házban összességében átlagosan mennyi  $E_{\text{össznapiátlag}, i}$  energia fogyott (elektromos eszközök, fűtés, hűtés). Először mindenki kiszámította az adott napra a saját otthonában az 1 főre és az 1  $\text{m}^2$  alapterületre eső energiafogyasztást, majd ezeket az értékeket átlagoltuk; ezután megszoroztuk a házikóban lakók számával és a házikó alapterületével.

Az adatokat 2012. szeptember 30-tól (0. nap) kezdődően, 2014. szeptember 30-ig (730. nap) gyűjtöttük. Két évet vizsgáltunk, hogy két teljes fűtési szezon és két teljes fűtés nélküli szezon is reprezentálva legyen.

Az átlagolások alapján az  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  alapterületű átlagos házra (lakásra), amelyben  $n_a \approx 4$  fő lakik, naponta átlagban  $E_{\text{villamosnapiátlag}} \approx 10,02 \text{ kWh} \approx 36,08 \text{ MJ}$  villamos energiát használnak. A napi átlagos villamosenergia-fogyasztás tekintetében nem volt jelentős eltérés a fűtési szezon (körülbelül 37 MJ/nap), illetve az azon kívüli időszak (körülbelül 35 MJ/nap) között.<sup>2</sup> Az 1. táblázatban az átlagos háztartás napi átlagos energiaszükséglete látható a fűtési szezonban, illetve azon kívül.

A fűtési szezonban – gyakorlatilag október első felétől április közepéig – a vezetékes földgáz fogyasztása napi átlagban  $4,21 \text{ m}^3$  volt, ami  $E_{\text{gáznapiátlag}} = 143 \text{ MJ}$

<sup>2</sup> Az egyes napok és az egyes családok tekintetében természetesen jelentős fluktuációk adódtak.

a felhasznált energia forrása	átlagos energiafelhasználás (MJ)	
	fűtési szezonban	fűtési szezonon kívül
villany	37	35
gáz	143	40
fa	308	0
szén	21	0
összesen	509	75

Az értékek egészre kerekítettek.

energiát jelent.<sup>3</sup> Emellett a fűtési szezonban naponta átlagban körülbelül 20,5 kg fát is eltüzelünk a lakások fűtésére. A különböző elégetett fafajták fűtőértékeit súlyozottan vettük figyelembe, így a fűtési szezonban fa elégetéséből naponta átlagosan  $E_{\text{fanapiátlag}} = 308 \text{ MJ}$  energia származott. A tanulók közül szénnel alig néhányan (és ők is időszakosan) fűtöttek, körülbelül 1,4 kg szén fogyott napi átlagban, eszerint a fűtési szezonban szénből naponta körülbelül  $E_{\text{szénnapiatlag}} = 21 \text{ MJ}$  energia származott.

Felmerülhet a kétely, hogy a fűtési szezonban napi átlagban tényleg ilyen sok energiát fogyaszt egy átlagos háztartás? Sajnos igen. A projektben résztvevők közül többen hagyományos, körülbelül 100  $\text{m}^2$  alapterületű „kocka” családi házban laknak, és általában gázzal és fával vegyesen fűtenek. A hőszigeteléstől, nyílászáróktól, hőigénytől, kályhák, kandallók, kazánok típusától függően egy ilyen családi házban éves szinten fűtésre körülbelül 30-50 mázsa kemény tűzifát és mintegy 500-1000  $\text{m}^3$  földgázt használnak el. A száraz, kemény tűzifák (például akác, tölgy, bükk, gyertyán, kóris) fűtőértéke körülbelül 15-16 MJ/kg, azaz egy fűtési szezonban ebből körülbelül 45 000-80 000 MJ az energiafogyasztás. Ha ezt elosztjuk 185 nappal, akkor a tűzifa esetén mintegy 243-432 MJ/nap átlagos fogyasztást kapunk. A földgázból körülbelül 92-184 MJ/nap az átlagfogyasztás. Láthatjuk, hogy ezek összhangban vannak az általunk meghatározott átlagértékekkel.<sup>4</sup>

Összességében egy átlagos háztartás a fűtési szezonban naponta átlagosan körülbelül 509 MJ, a fűtési szezonon kívül pedig 75 MJ energiát használ fel. Az adott időszakban naponta átlagosan ennyi energiát kellene „megtermelnünk” ahhoz, hogy házikónk energetikailag fenntartható legyen. A helyzet ennél persze bonyolultabb, hiszen a felhasznált és a megtermelt energia is naponként változik. Az átlagérté-

<sup>3</sup> A vezetékes földgáz fűtőértéke 32-42 MJ/ $\text{m}^3$ , ez a gáz több paraméterétől is függ. Magyarországon a vezetékes földgáz fűtőértéke átlagosan körülbelül 34 MJ/ $\text{m}^3$ .

<sup>4</sup> Egy kisebb méretű, korszerűen szigetelt, társasházban lévő lakás esetén a fűtési energiafelhasználás ennek töredéke is lehet; főként, ha a szomszédok alulról-felülről és oldalról is melegítik az adott lakást. Egy szigetelés nélküli, nagyobb méretű, különálló ház esetében viszont a fűtési energiaköltségek nagyon jelentősek.

kek kiszámítását csak azért mutattam be, mert a vizsgálatok előtt a tanulóknak sejtelmük sem volt, hogy mennyi egy átlagos háztartás naponkénti energiafogyasztása.

A projektben a napi adatok alapján kiszámolhattuk a virtuális házikónk és a benne élő  $n_a \approx 4$  fős átlagos család előző napi összes átlagos energiafogyasztását, illetve kiszámolhattuk, hogy mennyi energiát tudunk volna az előző napon a virtuális napelemekkel és szélgenerátorokkal megtermelni.

Vizsgálataink alapján arra a megállapításra jutunk, hogy virtuális házikónk a fűtési szezonon kívül fenntartható módon működik, azaz a nap- és a szélenergia felhasználásával biztosítani lehet egy átlagos háztartás villamosenergia-szükségletét. Ne feledjük, hogy a fűtési szezonon kívül (körülbelül április közepétől október elejéig) általában elég sok a napsütéses órák száma, azaz a fotovoltaikus napelemeink szinte minden nap működhetnek.<sup>5</sup>

A számításaink szerint a fűtési szezonban a fűtéshez szükséges átlagos energiaigényt viszont ezzel a módszerrel nem tudnánk kielégíteni. A fűtési szezonban (körülbelül október elejétől április közepéig) a háztartás energiaigénye megnövekszik, ráadásul ilyenkor általában alacsonyabb a napsütéses órák száma, kevesebb villamos energiát lehet a fotovoltaikus napelemekkel megtermelni. Valamilyen kiegészítő megoldás szükséges. Egyfelől a ház szigetelését mindenképpen meg kell oldani, másfelől hőigényünket mérsékelhetjük, ha jobban felöltözünk, így a lakásban alacsonyabb lehet a hőmérséklet. Mondjuk, a ház belsejében 23 °C helyett elegendő lenne 20 °C-os hőmérséklet, és így nagyon sok energiát megtakaríthatunk.

## A számítógépes program

A tanulók mérései alapján az átlagolások után rendelkezésre álltak a szükséges napi adatok: a ház környezetének és a ház belsejének hőmérséklete, a napsütéses órák száma, a szél erőssége, időtartama.

Az előzőekben láttuk, hogy a fűtési energiaigény reálisan nem fedezhető a nap- és szélenergiából a fűtési szezonban. Ezért a program készítése során két megoldás közül választhattunk: vagy lemondunk a fűtésről, vagy olyan jó hőszigetelési paramétereket választunk a háznak, hogy ezáltal a fűtéshez szükséges energiaigény jelentősen csökkenjen, és akkora tárolókapacitású akkumulátorrendszert telepítünk, ami ennyi energia tárolására alkalmas. Az első megoldás egyszerűbb, ha például fával fűtünk. A másik megoldás bonyolultabb, ráadásul abban az értelemben sem reális, hogy télen a fűtésre sok energiát használunk. Mégis ezt választottuk azért, mert a házikó szigetelése tényleg jelentősen javítható: lehetnének akár 4 rétegű hőszigetelt ablakok és 15-20 cm vastag falszigetelések stb. és a virtuális akkumulátorok tárolókapacitása elméletben szabadon növelhető.

<sup>5</sup> A szélgenerátorok működése a szélről függ.

## A modell

A programban az egyszerűség kedvéért a házikót egy belsejében üreges – válaszfalak nélküli – téglatesttel modelleztük. A téglatest alaplapjának élhosszai  $a$  és  $b$ , magassága  $h$ , a ház falainak vastagsága egységesen  $d$ .

A programba mindig az előző napi adatokat írtuk be, így a valósághoz képest egy napos időeltolódással működött. Arra voltunk kíváncsiak, hogy az  $i$ -edik napon a virtuális házikóban mennyi energiát kell felhasználni ahhoz, hogy a ház  $T_{belsőátlag, i}$  átlagos belső hőmérsékletét olyan értéken tarthassuk, amit a tanulók átlagban mértek otthon, és a ház villamosenergia-igényét is megoldjuk.

Az egy napos időcsúszásra azért volt szükség, hogy az előző nap összesített helyi meteorológia adatok (például helyi napsütéses órák száma, helyi szélviszonyok) rendelkezésünkre álljanak. A hőmérséklet-adatokat a projektben résztvevő tanulók feljegyezték otthon, illetve napközben az iskolában, és a helyi meteorológiai állomás adatait is felhasználtuk. A különböző forrásokból származó adatokat összesítettük és átlagoltuk.

## Termelt energia

### Napeenergia

Egy napelem elektromos teljesítménye [2]:

$$P_{\text{napelem}}(t) = \eta_{\text{napelem}} A_{\text{napelem}} I(t),$$

ahol  $A_{\text{napelem}}$  a napelem területe;  $I(t)$  a napsugárzás átlagos felületi teljesítménysűrűsége a tetőnél. Az  $\eta_{\text{napelem}}$  a napelemek fotovoltaikus energiaátalakítását jellemző hatásfok. Az  $i$ -edik napon a napelemek által megtermelt  $E_{\text{napelem}, i}$  összes villamos energiát úgy kapjuk, hogy a működő napelemek  $N_{\text{napelem}}$  számát a napelem pillanatnyi teljesítményét és a működés rövid  $\Delta t$  időtartamát összeszorozzuk, majd ezeket a teljes nap folyamán összeadjuk.<sup>6</sup>

A virtuális házikó tetején helyezkednek el a napelemek. A működő napelemek száma:

$$0 \leq N_{\text{napelem}} \leq N_{\text{napelem max}} = \frac{A_{\text{tető}}}{A_{\text{napelem}}},$$

azaz modellünkben legfeljebb annyi napelemünk lehet, amennyi még elfér a tetőn.<sup>7</sup>

### Szélenergia

Egy szélgenerátor teljesítménye a szél sebességének harmadik hatványával arányos [3]:

$$P_{\text{szélgenerátor}}(t) = \eta_{\text{szélgenerátor}} \frac{\rho_{\text{levegő}}}{2} A_{\text{rotor}} v_{\text{szél}}^3(t),$$

<sup>6</sup> Vizsgálatainkban a  $\Delta t$  értéke 5 perc volt, mert a helyi meteorológiai állomás adatai 5 percenként frissültek.

<sup>7</sup> A valóságban akár a kertben is felállíthatnánk még külön napelemmodulokat, vagy a ház oldalára is szerelhetnénk néhányat.

ahol  $\rho_{\text{levegő}}$  a levegő sűrűsége,  $A_{\text{rotor}}$  a szélgenerátor rotorjának felszíne,  $v_{\text{szél}}$  a szél sebessége, az  $\eta_{\text{szélgenerátor}}$  a szélgenerátor energiaátalakítását jellemző hatásfok.<sup>8</sup>

Az  $i$ -edik napon a házikó mellett felállított szélgenerátorok által megtermelt  $E_{\text{szélgenerátor}, i}$  összes elektromos energiát úgy kapjuk, hogy a működő szélgenerátorok  $N_{\text{szélgenerátor}}$  számát, a szélgenerátorok pillanatnyi teljesítményét és a működés rövid  $\Delta t$  időtartamát összeszorozzuk, majd ezeket a teljes napra összesítjük.

A szélgenerátorok csak megfelelő szélesebbtartományban – körülbelül 1 m/s és 15 m/s között – működhetnek. Túl alacsony szélesebbtartományban nem működnek vagy nem gazdaságos a működtetésük, túl magas szélesebbtartományban nem biztonságosak, ezért csak a megfelelő tartományba eső értékeket vettük figyelembe.

### A ház és környezete közötti energiatranszport

A ház a szabad felszínén cserélhet energiát a környezettel. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a ház az alapja irányában nagyon jól hőszigetelt, azaz csak a tetején, illetve az oldalfalain adhat le vagy vehet fel energiát. Ezeket figyelembe véve a ház szabad felszíne:

$$A_{\text{szabad}} = ab + 2(a + b)b.$$

A szabad felszínnel arányos hőcsere egyfelől függ az adott napon mért külső hőmérséklet és az elérni kívánt belső hőmérséklet különbségétől, másrészt a ház szabad felszínének (tető + oldalfalak) hőátbocsátó képességétől. Ha a tető és a falak hőátbocsátó képessége jó, akkor rossz a hőszigetelésük: a hőátbocsátó képesség és a hőszigetelő képesség fordítottan arányosak. A ház szabad felszínén a hőátbocsátási teljesítmény [4]:

$$P_{\text{bőát}} = kA_{\text{szabad}}(T_{\text{külső}} - T_{\text{belső}}),$$

ahol  $P_{\text{bőát}}$  a ház és környezete közötti hőátbocsátási teljesítmény,  $T_{\text{belső}}$  a ház belső hőmérséklete,  $T_{\text{külső}}$  a ház környezetében mért hőmérséklet,  $k$  a ház szabad felszínének hőátbocsátási együtthatója, amely a programban megadott értéktartományban választható paraméter. Az  $i$ -edik napon a hőátbocsátás során a teljes  $E_{\text{bőát}, i}$  energiatranszportot megkapjuk, ha a pillanatnyi hőátbocsátási teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd az adott napra összesítjük.

A ház hőszigetelés útján is leadhat vagy felvehet energiát. A Stefan–Boltzmann-törvény szerint a sugárzási teljesítmény függ a test felszínének nagyságától, valamint a test, illetve a környezet abszolút hőmérsékletének negyedik hatványai különbségétől [5]:

$$P_{\text{bősug}} = \varepsilon \sigma A_{\text{szabad}}(T_{\text{külső}}^4 - T_{\text{belső}}^4),$$

<sup>8</sup> A hatásfok valójában függ a szél sebességétől is, de ezt az egyszerűség kedvéért elhanyagoltuk.

ahol  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  a Stefan–Boltzmann-együttható,  $\varepsilon$  az emissziós tényező, amely függ a ház szabad felszínének anyagától, szemcsézettségétől, színtől stb. Az  $i$ -edik napon a hőszigetelés során a teljes  $E_{\text{bősug}, i}$  energiatranszportot megkapjuk, ha a pillanatnyi hőszigetelési teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összeadjuk.

Ha  $E_{\text{bőát}, i} + E_{\text{bősug}, i} > 0$ , akkor a házikó az  $i$ -edik napon – a falakon és a tetőn keresztül – a környezetétől összességében energiát vesz fel, ha  $E_{\text{bőát}, i} + E_{\text{bősug}, i} < 0$ , akkor a házikó a szabad felszínén az adott napon összességében energiát ad le a környezetének.

### Fűtés

A modellben a fűtési szezonban az adott napon a kívánt belső hőmérséklet eléréséhez a házikót  $P_{\text{fűt}}$  elektromos teljesítményű villanykályhával fűtjük. Az  $i$ -edik napon a villanykályha működéséhez szükséges összes  $E_{\text{fűt}, i}$  energiát megkapjuk, ha a pillanatnyi fűtési teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összeadjuk.

A villanykályha által az  $i$ -edik napon leadott (hasznos) hő, amely a házikó belső energiáját növeli:

$$E_{\text{fűtbasznos}, i} = \eta_{\text{fűt}} E_{\text{fűt}, i},$$

ahol  $\eta_{\text{fűt}}$  a villanykályha fűtési hatásfoka.<sup>9</sup>

Ha a fűtési szezonban a megkívánt belső hőmérséklet kisebb az aktuális külső hőmérsékletnél, azaz  $T_{\text{belső}} < T_{\text{külső}}$  akkor a fűtésre nem kell energiát használnunk, mert a program szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi melegebb levegőt engedünk be kintől, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet – egy meleg őszi napon a valóságban sem kell a lakást külön fűteni.

### Hűtés

A nyári szezonban a lakás hűtésére felhasznált hűtési energiát – az előjelek figyelembe vételével – hasonló képletekkel számíthatjuk. A házikót  $P_{\text{hűt}}$  elektromos teljesítményű légkondicionálóval hűtjük. Az  $i$ -edik napon a légkondicionáló működéséhez szükséges  $E_{\text{hűt}, i}$  villamos energiát megkapjuk, ha a légkondicionáló berendezés pillanatnyi hűtési teljesítményeit és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük.

Az  $i$ -edik napon a légkondicionáló által elvont (hasznos) hő, amely a házikó belső energiáját csökkenti:

$$E_{\text{hűtbasznos}, i} = j_{\text{hűt}} E_{\text{hűt}, i},$$

ahol  $j_{\text{hűt}}$  a légkondicionáló hűtési jóságos foka. A modern légkondicionáló berendezések hűtési jóságos foka általában 3 körüli érték.

<sup>9</sup> Ellenállásfűtés esetén a teljes villamos energia hővé alakul. Némelyik szimulációnál 95%-os hatásfokkal számoltunk, mert például az elektromos fűtőberendezés ventilátorainak forgatásához is kell energia.

Ha a nyári szezonban a megkívánt belső hőmérséklet nagyobb az aktuális külső hőmérsékletnél, azaz  $T_{belső} > T_{külső}$ , akkor a hűtésre nem kell energiát felhasználnunk, mert a program szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi hidegebb levegőt engedünk be kintől, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet – egy hűvösebb nyári napon a valóságban sem kell a lakást külön hűteni.

A házikóban a villanykályha és a légkondicionáló kivételével a többi elektromos berendezés (például lámpák, televízió, háztartási gépek) által elfogyasztott villamos energiát külön számoltuk, az  $i$ -edik napon ezt  $E_{villamos, i}$ -vel jelöltük.

Modellünkben a különböző együtthatókat úgy választottuk, hogy értékük nagyjából reális legyen (például az egyes hatásokokat internetes katalógusokból kerestük ki); a szabad paramétereket úgy próbáltuk illeszteni, hogy a lehető legjobban visszaadják a tanulói mérésekből számított átlagértékeket.

## Tárolt energia

### Házikó

A ház falaiban és a bent lévő levegőben belső energiaként „tárolódik” a házikó energiájának jelentős része. A bent lévő levegő belső energiája függ a levegő  $\rho_{levegő}$  sűrűségétől,  $V_{levegő}$  térfogatától és  $c_{levegő}$  izochor fajhőjétől.<sup>10</sup> A ház falainak<sup>11</sup> belső energiája függ a fal  $\rho_{fal}$  sűrűségétől és  $V_{fal}$  térfogatától, azaz a falak tömegétől, illetve a  $c_{fal}$  fajhőjétől. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a falak külső oldalán a hőmérséklet  $T_{külső, i}$ , a falak belső oldalán a hőmérséklet  $T_{belső, i}$  és a hőmérséklet egyenletesen változik a falakban. Felírhatjuk a ház átlagos belső energiáját az  $i$ -edik napon:

$$E_{belső, i} = \rho_{levegő} V_{levegő} c_{levegő} T_{belső, i} + \rho_{fal} V_{fal} c_{fal} \frac{T_{belső, i} + T_{külső, i}}{2}.$$

### Akkumulátorok

A napelemek és a szélgenerátorok által megtermelt villamos energia egy részét az akkumulátorokban tárolhatjuk. Az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes villamos energiát  $E_{akku, i}$ -vel jelöljük. Az akkumulátorokban felhalmozott energia nem lehet negatív, illetve nem haladhatja meg az akkumulátorrendszer maximális tárolókapacitását:

$$0 \leq E_{akku, i} \leq E_{akku, max}.$$

A programban a virtuális akkumulátorok szerepe nagyon fontos. Az akkumulátorok  $E_{akku, max}$  energiátároló összkapacitása változtatható paraméter volt, nagyrészt ennek nagysága szabta meg, hogy a házikó energetikailag fenntartható módon működik-e.

<sup>10</sup> A levegő sűrűsége függ a hőmérsékletétől és a nyomásától.

<sup>11</sup> Csak külső falai vannak házikónknak, belső elválsztófalak nem szerepelnek a modellben.

A valóságban az akkumulátoros energiátárolással maximum a háztartás elektromos energiaszükségletét lehetne biztosítani (tavasztól őszig), a fűtést nem. A programban viszont szabadon adhattunk értéket a virtuális akkumulátor-rendszer maximális tárolókapacitásának, így végig sikerült fenntartani a virtuális házikó energetikai működését.

## Simuláció

A rendelkezésre álló adatok alapján a programmal szimulálhattuk, hogy házikónknak az adott napon fenntartható-e a kívánt hőmérséklet, van-e elegendő villamos energiánk az egyéb fogyasztók működtetéséhez is. Természetesen előfordult, hogy egy adott napon nem termeltük meg az aznapra szükséges energiát, de ez nem okoz problémát, ha az akkumulátorokból pótolni tudjuk a hiányzó mennyiséget. Máskor viszont több energiát termeltünk, mint amennyit aznap elfogyasztottunk, így a felesleggel a virtuális akkumulátorokat tölthetjük, de a rendszer maximális tárolókapacitását nem léphettük túl.

Ha az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok által megtermelt összes energia és az előző napról az akkumulátorokban megmaradt energia összege nagyobb vagy egyenlő az aznapi teljes villamosenergia-fogyasztással, akkor virtuális házikónk az  $i$ -edik napon energetikai szempontból fenntartható módon működik.

### Fűtési szezon

A fűtési szezonban az  $i$ -edik napon a ház belső energiája a villanykályhával történő fűtés és a környezettel való hőcsere miatt változik:

$$E_{belső, i} = E_{belső, i-1} + \eta_{fűt} E_{fűt, i} + E_{bőát, i} + E_{bősug, i}.$$

Az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a villanykályhák fogyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát. Ha az adott napon marad felesleges elektromos energiánk, akkor ezt az akkumulátorokban tároljuk, azaz a téli szezonban az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia:

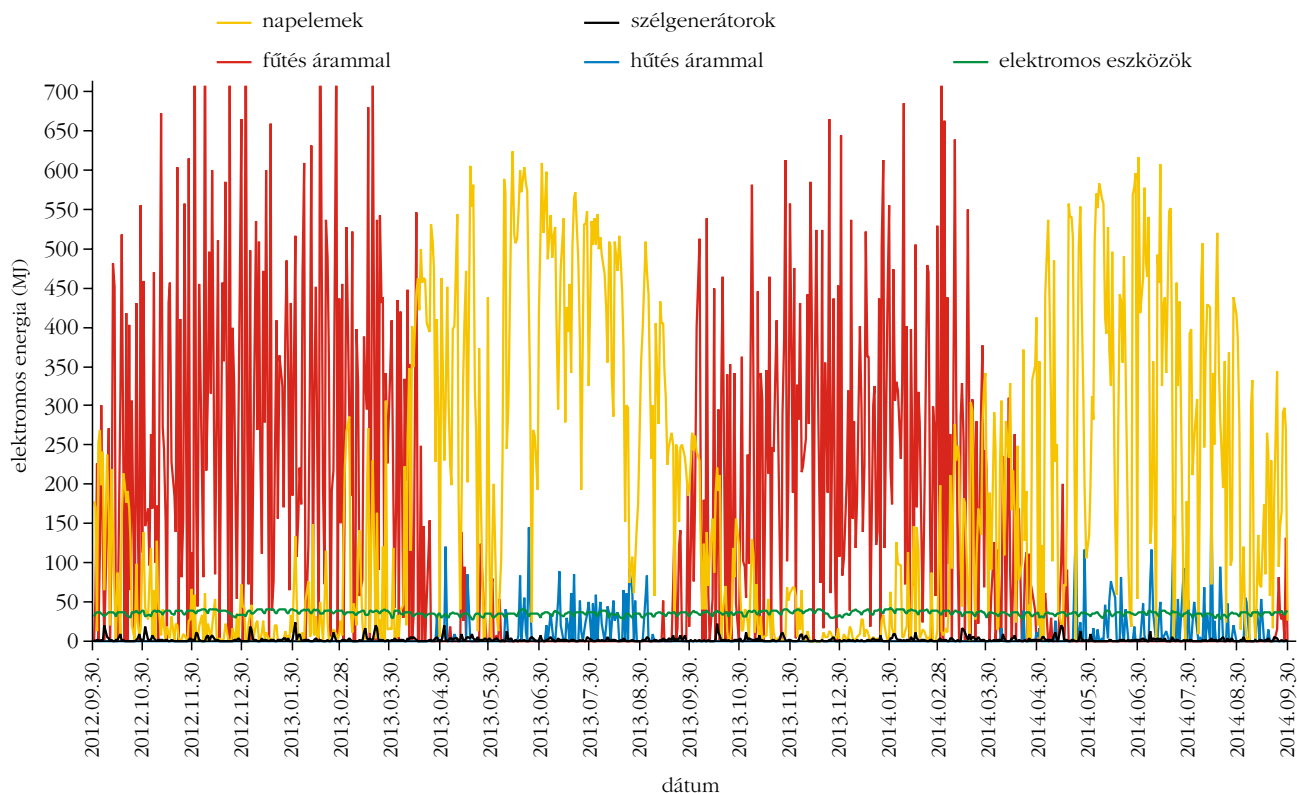
$$E_{akku, i} = E_{akku, i-1} + E_{napelem, i} + E_{szélgenerátor, i} - E_{fűt, i} - E_{villamos, i}.$$

### Hűtési szezon

A nyári szezonban a ház belső energiája a légkondicionálás és a környezettel való hőcsere miatt változik az  $i$ -edik napon:

$$E_{belső, i} = E_{belső, i-1} - j_{hűt} E_{hűt, i} + E_{bőát, i} + E_{bősug, i}.$$

Az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a légkondicionáló fo-



2. ábra. A ház elektromos berendezései által két év alatt elfogyasztott, illetve termelt villamos energia a szimuláció – adatait lásd a szövegben – alapján.

gyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát. Ha az adott napon marad felesleges villamos energiánk, akkor ezt az akkumulátorokban tároljuk, azaz a nyári szezonban az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia:

$$E_{akku, i} = E_{akku, i-1} + E_{napelem, i} + E_{szélgenerátor, i} - E_{bűt, i} - E_{villamos, i}$$

Az előbbi egyenletek modellházikónkat energetikai szempontból leírják. Kérdés, hogy reális adatokkal – tanulók méréseiből eredő átlagértékekkel, illetve katalógusokban található adatokkal – számolva fenntartható-e a házikó működése a 2 éves vizsgált időszakban.

### Kiindulási paraméterek

A szimuláció szempontjából fontosak a kiindulási paraméterek. Ha a projekt elején az akkumulátorok lemerültek lettek volna és napokig nem süt a nap, nem fúj a szél, akkor a házikónk nem tudott volna működni. Ezért teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük a szimulációt. Természetesen így is leállhat a házikó működése, ha hosszú ideig nincs energiautánpótlás – például túl sokáig nem süt ki a nap, vagy nem fúj a szél, vagy nagyon hideg a tél stb.

A 2. ábrán egy konkrét szimuláció eredményeit láthatjuk. Ennél a szimulációnál a téglatest alakú modellházunk élhosszai  $a = 10$  m,  $b = 10$  m,  $h = 3$  m és falvastagsága  $d = 0,4$  m. A falak  $k$  hőátbocsátási

együtthatója  $0,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , a falak  $\varepsilon$  emissziós tényezője  $0,12$ . A szimulációban 4 szélgenerátorral számoltunk. A szélgenerátor energiaátalakítását jellemző  $\eta_{szélgenerátor}$  hatásfok  $30\%$ , a rotor  $A_{rotor}$  felszíne  $4 \text{ m}^2$ . A napelemek energiaátalakítását jellemző  $\eta_{napelem}$  hatásfok  $15\%$ , egy napelem  $A_{napelem}$  felszíne  $1 \text{ m}^2$  – ekkor a működő napelemek maximális száma  $100$  lehet. Az elektromos fűtés  $\eta_{fűt}$  hatásfoka  $95\%$ , a légkondicionáló  $j_{bűt}$  jóságai tényezője  $3$ . A levegő  $\rho_{levegő}$  sűrűsége körülbelül  $1,2 \text{ kgm}^{-3}$  (függ a levegő paramétereitől), a levegő  $c_{levegő}$  (izochor) fajhője  $712 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , a fal  $\rho_{fal}$  átlagsűrűsége  $1500 \text{ kgm}^{-3}$ , a fal anyagának  $c_{fal}$  átlagos fajhője  $880 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Láthatjuk, hogy az energiatermelés szempontjából a napelemek a jelentősek, a 4 szélgenerátor energiatermelése ehhez képest elenyésző, az ábra aljánál alig látszik, annyira kicsi. Elméletben a házikó mellett több szélgenerátort is felállíthatunk, ekkor az összesített energiatermelésük már jelentősebb lehet.

A háztartás elektromos eszközeinek energiafogyasztása nagyjából állandónak tekinthető a teljes időszakban. A légkondicionáló berendezést csak a nyári szezonban, időnként kell működtetni. A legtöbb energia a modellházikó villanykályhákkal történő fűtésére megy el a fűtési szezonban.

A két év alatt a projektben résztvevő tanulók házaiban a fosszilis energiaforrások (földgáz, fa, szén) eltüzeléséből a két fűtési szezonban, napi átlagban  $472$  MJ összes energiafogyasztás adódott háztartásonként. A hagyományos vegyes tüzelésű kályhák, kazánok, illetve gázkazánok hatásfoka (típustól függően) körül-

belül 25-35%. Ezek alapján a fűtési szezonokban napi átlagban a ház tényleges fűtésére fordított hasznos hő nagyjából 118 MJ/nap és 165 MJ/nap között lehet.

A szimulációban a fűtési szezonokban a modellház elektromos fűtésére naponta átlagosan 138,7 MJ energiát használtunk. Az elektromos fűtés hatásfokát 95%-nak vettük, így a modellház tényleges fűtésére fordított hasznos hő körülbelül 146 MJ/nap lehet. Láthatjuk, hogy ez jó összhangban van a fosszilis energiaforrásokból származó hasznos átlagos fűtési energiaértékekkel.

Ebben a szimulációban az akkumulátor-rendszer összkapacitására minimum 47 729 MJ értéket kellett választanunk, mert a ház folytonos energetikai működését csak így lehetett végig biztosítani. A szimulációt teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük. A téli szezonban termeltünk ugyan valamennyi villamos energiát, de nagyrészt az akkumulátorokról táplált villanykályhák segítségével tudtuk a ház fűtését megoldani. A tél végére az akkumulátorok szinte teljesen lemerültek. A tavasz és a nyár folyamán a felesleges villamos energiával az akkumulátorokat feltöltöttük, és a következő ősztől kezdve nagyjából hasonló módon ismétlődött a folyamat. A szimulációban a virtuális akkumulátor-rendszerünk minimálisan szükséges tárolókapacitására olyan nagy érték adódott, ami megerősíti azt a korábbi feltevésünket, hogy a téli fűtéshez szükséges villamos energia a valóságban így nem tárolható.

Ha reálisabban gondolkodunk és a ház villamos fűtéséről lemondunk (például fával fűtünk – az is megújuló energia), akkor a szimuláció szerint (minimum) 2096 MJ akkumulátor-összkapacitás elegendő a ház működtetéséhez. Ebbe beletartoznak a különböző elektromos berendezések, még a légkondicionáló is.<sup>12</sup>

Érdemes azt is megvizsgálni, hogy milyen összegű beruházásra lenne szükség egy ilyen ház energetikai fenntarthatóságához.

- A napelemrendszer kiépítése nagyjából 3-6 millió Ft lenne (a napelemeket várhatóan körülbelül 25-30 évente ki kell cserélni).
- Nézzük meg, hány darab akkumulátorra lenne szükségünk, és mennyibe kerülne ez a módszer! Az egyszerűség kedvéért a bonyolult technikai részletektől tekintsünk el, elegendő, ha megbecsüljük a költsé-

<sup>12</sup> Ez is jelentős energiátárolási kapacitást jelent, de a valóságban esetleg kivitelezhető, bár nagyon sokba kerülne.

geket. A gépkocsiban használatos, 12 V-os, jó minőségű, savas ólomakkumulátor (amelynek ára mintegy 25 000 Ft) körülbelül 2,5 MJ elektromos energiát képes tárolni. A 2100 MJ energia tárolásához tehát 840 darab ólomakkumulátorra lenne szükségünk, ezek ára körülbelül 21 millió Ft (1 J tárolása 1 Ft-ba kerül). Az elektromos és a hibrid üzemű gépkocsikban használatos lítiumion akkumulátorokból kevesebbre lenne szükségünk, viszont a rendszer kiépítésének ára még ennél is jóval magasabb lenne. Láthatjuk, hogy a költségek is nagyon magasak és ennyi akkumulátor tárolása, kezelése is nagyon nehéz feladat lenne.

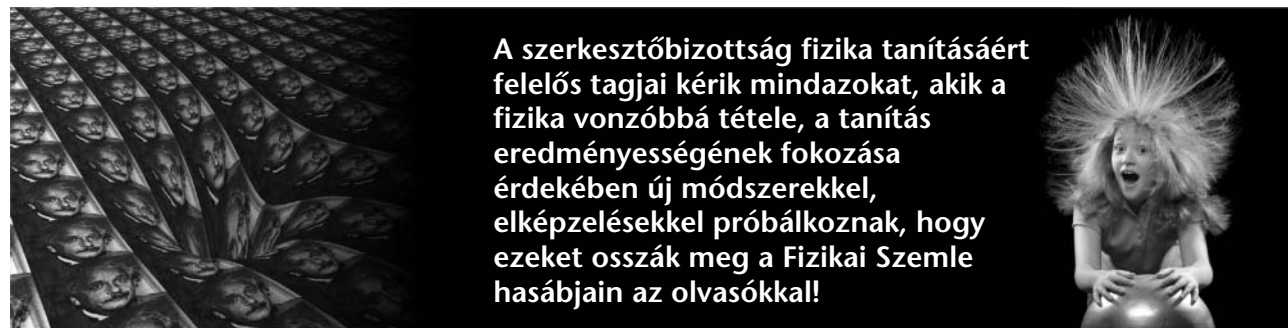
Az akkumulátorok nem környezetbarát eszközök, és élettartamuk sem végtelen. Milyen hulladékok származnak ezekből? Milyen mértékben lehet az anyagokat újrahasznosítani? Ezek fontos kérdések lehetnek, ha ilyen házak nagy számban elterjednének. A projektben ilyen összefüggésekről is esett szó, de ez már túlmutat a cikk lehetőségein.

## Összegzés

Iskolánk tanulóival áttekintettük a megújuló energiaforrások közül a nap- és a szélenergia felhasználásának lakossági módszereit, azok előnyeit és hátrányait. A cikkben bemutattam egy középiskolai szinten is megérthető modellt, amely egy napelemekkel és szélgenerátorral működő különálló ház energetikai leírására szolgál. A projektben előkerülő ismeretek egy része szerepel a középiskolai tananyagban, de voltak benne olyanok is, amelyek a fizika tananyagot hasznosan kiegészítették. A projektfeladat során sikerült a tanulóink fizika szaktárgyi tudását bővíteni és emellett informatikai ismereteik is gyarapodtak, illetve környezettudatos gondolkodásmódjuk is fejlődött.

## Irodalom

1. Láng István (szerk.): *Környezetvédelmi lexikon*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993.
2. M. Blasono, F. Dell'Anno, R. De Luca, G. Torre: A simple mathematical description of an off-grid hybrid solar-wind power generating system. *Eur. J. Phys.* 34 (2013) 763–771.
3. R. De Luca, P. Desideri: Wind energy: an application of Bernoulli's theorem generalized to isentropic flow of ideal gases. *Eur. J. Phys.* 34 (2013) 189–197.
4. Budó Á.: *Kísérleti fizika I.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.
5. Budó Á.: *Kísérleti fizika III.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.



**A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!**