



Nap- és szélenergiák helyileg optimális megválasztását segítő számítógépes program

Beck J., Klencsár Z.

Matematika és Fizika Tanszék, Kaposvári Egyetem, 7400 Kaposvár, Guba S. u. 40.

ÖSSZEFOGLALÁS

A nap- és szélenergia magyarországi hasznosításának gazdaságossága egyrészt a gazdasági környezet, másrészt a természeti adottságok függvénye. A természeti adottságok közül napenergia kiaknázása esetén a globálsugárzás évi összege, szélenergia kiaknázása esetén pedig elsősorban a szélesebesség éves átlaga befolyásolja az adott energiaforrás kiaknázásának gazdaságosságát. Utóbbi jellemzők azonban függenek a földrajzi helyzettől, s ezért Magyarország különböző területein jelentősen eltérhet ugyanazon naperőmű vagy szélenergiák beruházás gazdaságosságának mértéke. E földrajzi helyzettől is függő gazdaságosság megbecslésére Delphi 7.0 fejlesztői környezet alkalmazásával Windows XP operációs rendszer alatt futó számítógépes programot dolgoztunk ki. A program egy gazdasági modellt, és többek közt Magyarország globálsugárzás- és széltérképe alapján készíti el a felhasználó által megadott nap- vagy szélenergiák beruházás gazdaságosságának térképét Magyarországra vonatkozóan. (Kulcsszavak: megújuló energiák, napenergia, szélenergia)

ABSTRACT

Computer program for estimating the efficiency of solar- and wind power plant investments

J. Beck, Z. Klencsár

University of Kaposvár, Department of Mathematics and Physics, H-7400 Kaposvár, Guba S. 40.,

The efficiency of the exploitation of renewable energy sources like solar radiation and wind energy depends on economic factors as well as on the availability of the corresponding natural resource. The efficiency of a solar power plant investment will naturally depend on the local value of global insolation, whereas the efficiency of a wind farm investment depends first of all on the yearly average of wind speed measured at the height of the wind turbine's hub. Therefore, the efficiency of a solar- or wind power plant will in general also depend on the power plant's geographical location. In order to estimate the investment efficiency of solar- and wind power plant investments as a function of geographical location as well as various technical parameters and economic factors, we have worked out a corresponding economic model, and — by using Delphi 7.0 environment under Windows XP OS — developed a computer program that is able to calculate and visualize the investment efficiency map of various solar- and wind power plant investments. We have applied the program for the case of Hungary by using the maps displaying the yearly global insolation and the wind speed at 70 m above ground level for the area of Hungary.

(Keywords: renewable energies, solar energy, wind energy)

BEVEZETÉS

Magyarország az Európai Unióval kötött csatlakozási szerződésben vállalta, hogy 2010-re összes energiatermelésének 7,2%-át megújuló energiaforrások kiaknázása útján állítja elő. E vállalásnak azonban mindeddig csupán mintegy a felét (2003-ig ~ 3,5%-ot) sikerült teljesíteni (*Giber és mtsai*, 2005) Jelen munkában kizárólag a szél és a napsugárzás villamos energetikai hasznosítására koncentrálnak.

Magyarország napsugárzási adottságai kedvezőek, hiszen a rendelkezésre álló napenergia potenciál a jelenlegi teljes energiafelhasználásunk mintegy 400-szorosa. A napenergia hasznosításának előmozdítása érdekében kiírt pályázatok (lásd pl. *NEP*, 2007) hatására az elmúlt három évben hazánkban mintegy 500 napkollektoros rendszer épült, melyek többsége használati melegvíz előállítására szolgál. Jelentős teljesítményt szolgáltató naperőmű Magyarországon jelenleg csak egy működik: villamosenergetikai és oktatási célú hasznosításra a Szent István Egyetem gödöllői kampuszán telepített egy 10 kW-os napelemes erőművet.

Magyarországon a földfelszíntől mért 10 méteres magasságban az átlagos szélesebbesség jellemző értéke 2,5-3,5 m/s, 75 méter magasságban azonban már elérheti az 5,5 m/s-ot is. Hazánkban jelenleg tizenhét szélerőmű termel elektromos áramot, melyek teljesítménye 200 kW-tól 1,8 MW-ig terjed (*Giber és mtsai*, 2005)

A szél és a napsugárzás villamosenergetikai kiaknázásának gazdaságosságát nagymértékben befolyásolják földrajzi helyzettől függő természeti adottságok (pl. napsugárzás felületi teljesítménye, szélesebbesség), így a különböző megújuló energiaforrások más és más földrajzi területen jelenthetnek gazdaságos alternatívát a villamosenergia-termelés szempontjából. A természeti adottságok és a helyi gazdasági környezet paramétereinek ismeretében határozható meg, hogy az adott területen mely megújuló energiaforrás kiaknázása a legcélszerűbb.

Jelen munka célja egy olyan számítógépes program kidolgozása volt, amely a földrajzi helyzettől függő természeti adottságok, és a gazdasági környezet releváns paraméterei alapján képes megbecsülni a napenergia és a szélenergia helyi, villamosenergetikai célú kiaknázásának gazdaságosságát, valamint képes a földrajzi helyzettől függő paraméterek és számítási eredmények eloszlásának térképszerű grafikus megjelenítésére.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Annak érdekében, hogy a naperőmű és a szélerőmű telepítésének gazdaságosságát Magyarország bármely pontjára vonatkozóan meg tudjuk becsülni, olyan Windows XP operációs rendszeren futó számítógépes programot készítettünk Borland Delphi 7 alkalmazásfejlesztő környezet felhasználásával, ami képes az alább felsorolt térképek adatainak feldolgozására.

A napenergia-hasznosítás gazdaságosságának kiszámításához felhasználtuk a Magyarországon mérhető globálsugárzás¹ éves összegének várható értékét a földrajzi helyzet függvényében ábrázoló térképet, amit az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapjáról (*MET*, 2007) töltöttünk le. A napelemek által elfoglalt területek mezőgazdasági termelésből való kivonásának köszönhető jövedelemkiesést Magyarország föld-

¹ A globálsugárzás a Napból érkező közvetlen sugárzás és az égbolt minden részéről érkező szórt sugárzás összege (*MET*, 2007).

minőség-térképe alapján becsültük, melyet a Gödöllői Agrártudományi Egyetemen készítettek 1997-ben (GAE, 1997; Dely, 2006).

A szélenergia-hasznosítás gazdaságosságának kiszámításához a Magyarország területén a felszín felett 70 méter magasságban mérhető szélesebbesség éves átlagát ábrázoló térképet használtuk fel, melyet az Energia Központ Kht. Könyvtárából szereztünk be.

Az elektronikus formában rendelkezésre álló térképeket a Kaposvári Egyetem Matematika és Fizika Tanszékén készített MapIt nevű programmal alakítottuk át olyan szöveges fájlkká, melyek a képpontok színe mellett már tartalmazzák a pontok földrajzi szélesség és földrajzi hosszúság koordinátáit is.

EREDMÉNY ÉS ÉRTÉKELÉS

A gazdaságosságot befolyásoló főbb tényezők

Mind a napelemes erőművek, mind pedig a szélerőművek esetében a beruházás gazdaságosságát a felmerülő költségek és a megtermelt villamos energiából származó haszon határozzák meg. A beruházás megvalósulásával lényegében egyidőben felmerülő költségek az ún. beruházási költség kategóriába, a későbbiekben évenként felmerülő költségek pedig az ún. üzemelési költség kategóriába sorolhatók.

A beruházási költséget ($K_{b,\Sigma}$) a saját tőke (P_s), a kapott állami támogatás (P_t) és a szükség szerint felvett hitel (P_h) összege adja. Az évi üzemelési költséghez ($K_{ü,\Sigma}$) az erőmű méretétől (pl. napelemek és akkumulátorok számától) függő (pl. karbantartással kapcsolatos), és attól független állandó (pl. bér jellegű) évi költségek járulhatnak hozzá. A várható infláció ismeretében megbecsülhető a felvett hitel után fizetendő összes hitelkamatnak a hitelfelvétel időpontjára számított értéke ($K_{THM,\Sigma}$), mely így lényegében a beruházási költséggel azonos módon befolyásolja a gazdaságosságra vonatkozó számításokat.

A beruházás gazdaságosságának jellemzésére egyaránt alkalmas a beruházás megtérülési ideje (T_m), és az 1 kWh villamos energiának a beruházás teljes élettartamára vetített előállítási költsége ($K_{1\text{ kWh}}$). Lényeges különbség a kettő között, hogy míg az előbbi függ az éves jövedelemtől (P_j), az utóbbi független attól. Jövedelem egyrészt származhat abból, hogy a megtermelt energia közvetlenül felhasználható részét nem kell a szolgáltatótól megvásárolni, másrészt abból, hogy a megtermelt villamos energia fel nem használt részét a szolgáltató felé értékesíteni lehet. További számszerűsíthető jövedelem származhat pl. a CO₂ kereskedelemben való részvételből, valamint a beruházás következtében megjelenő esetleges helyi infrastrukturális fejlődésből.

A gazdaságosság reális megítéléséhez figyelembe kell venni azt is, hogy a beruházás területének mezőgazdasági művelés alól való kivonása következtében elesünk attól a jövedelemtől, ami a földterület mezőgazdasági hasznosítása esetén keletkezne. Ez az ún. termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesés lényegében olyan veszteség (P_v), ami a beruházás éves nyereségét csökkenti. Ez a veszteség elsősorban a termőtalaj minőségétől függ, mely utóbbi azonban szintén a földrajzi helyzet függvénye.

Naperőmű beruházás gazdaságosságának számítása

A naperőmű beruházás gazdaságosságának értékeléséhez először meg kell állapítanunk az adott napelemtípus segítségével 1 m²-es területen egy év alatt termelhető energia mennyiségét. Ha a kiválasztott napelemtípus hatásfoka (Farkas, 2003) η_n , a kapcsolódó

elektronikus rendszer hatásfoka pedig η_r , akkor az 1 m^2 felületű napelem által egy év alatt termelt villamos energia

$$E_{1\text{év},1\text{m}^2} = \eta_r \eta_n E_{1\text{év},1\text{m}^2}^* , \quad (1)$$

ahol $E_{1\text{év},1\text{m}^2}^*$ a globálsugárzás éves összege a telepítés helyén.

Ha az egy év alatt termelt villamos energia önkormányzat által elvárt mennyisége $E_{1\text{év}}^*$, akkor a napelemek által elfoglalt terület a beruházás helyén egy év alatt 1 m^2 -en nyerhető energia, és az egy napelem által elfoglalt A_n terület ismeretében számítható ki:

$$A_\Sigma = A_n \left[\frac{E_{1\text{év}}^*}{A_n E_{1\text{év},1\text{m}^2}} \right]^\uparrow , \quad (2)$$

ahol – figyelembe véve, hogy csak egész napelemet lehet vásárolni – $[x]^\uparrow$ az x számhoz legközelebb eső, nálánál nem kisebb egész számot jelöli. A kerekítés miatt az 1 év alatt ténylegesen megtermelt energia nagysága

$$E_{1\text{év}} = A_\Sigma E_{1\text{év},1\text{m}^2} . \quad (3)$$

A napelemek és akkumulátorok számának és egységárának ismeretében ezután meghatározható a beruházás költsége:

$$K_{b,\Sigma} = \frac{N_n K_{n,1} + N_a K_{a,1}}{1 - X_{b,e}} , \quad (4)$$

ahol $X_{b,e}$ az ún járulékos költséghányad, ami megadja, hogy a beruházási költségen belül mekkora részarányt képviselnek a napelemek és az akkumulátorok vételárán felüli költségek.

Ezt követően a hitel és az állami támogatás beruházási költségen belüli arányának (rendre X_h és X_t) ismeretében meghatározható a beruházási költségben szereplő hitel (P_h) és a vissza nem térítendő támogatás (P_t) mértéke:

$$P_h = X_h K_{b,\Sigma} , \quad (5)$$

$$P_t = X_t K_{b,\Sigma} . \quad (6)$$

Az 1 kWh energia értékesítési árának ($B_{1\text{kWh}}$) felhasználásával, valamint az egy év alatt termelt energia mennyiségével meghatározható az éves árbevétel mértéke:

$$B_\Sigma = E_{1\text{év}} B_{1\text{kWh}} . \quad (7)$$

Az évi üzemelési költség egyik eleme a szükséges akkumulátorcserék teljes élettartamra vetített költségének egy évre jutó része ($K_{\text{ü,acs}}$):

$$K_{\text{ü,acs}} = \frac{([T/T_a]^\uparrow - 1) N_a K_{a,1}}{T} , \quad (8)$$

ahol T a beruházás teljes élettartama, T_a pedig az akkumulátorok élettartama. Az évi teljes üzemelési költség ($K_{\text{ü},\Sigma}$) ezután a napelemek számának, az egy napelemre jutó éves üzemelési költségnek ($K_{\text{ü},n}$), az akkumulátorok számának és az egy akkumulátorra jutó éves üzemelési költségnek ($K_{\text{ü},a}$), a napelemek és akkumulátorok számától független

egyéb üzemelési költségeknek ($K_{\bar{u},e}$), valamint az akkumulátorcserék egy évre jutó költségének a segítségével számítható:

$$K_{\bar{u},\Sigma} = N_n K_{\bar{u},n} + N_a K_{\bar{u},a} + K_{\bar{u},e} + K_{\bar{u},acs} \quad (9)$$

Az egy év alatt elérhető jövedelem (P_j) kiszámításához szükség van még a termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesésre (P_v) amit az egy négyzetméterre jutó jövedelemkiesés ($P_{v,1m^2}$) és a beruházás teljes területének szorzataként számíthatunk ki:

$$P_v = A_\Sigma P_{v,1m^2} \quad (10)$$

Az egy négyzetméterre jutó jövedelemkiesést az 1 tonna búza értékesítéséből adódó jövedelem (P_{1t}) és az adott terület 1 m²-én várható – tonnában mért – termésátlag (Q_{1m^2})

határozza meg:

$$P_{v,1m^2} = Q_{1m^2} P_{1t} \quad (11)$$

Az adott terület 1 m²-én várható termésátlag viszont a termőrétegvastagság függvénye, mely függvényt a számítások során az 1. ábrának megfelelően választottuk meg.

1. ábra.

A termőrétegvastagság és az 1 m²-en várható termésátlag összefüggése, ahogy az a programban alkalmazásra került.

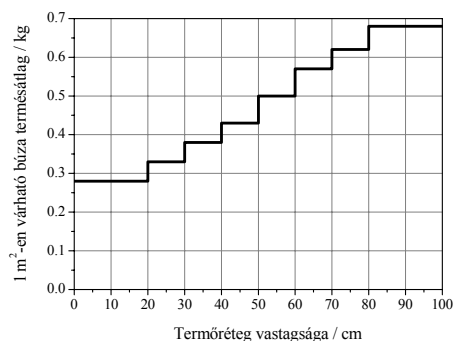


Figure 1: The dependence of average yield of wheat (expected on an area of 1 m²) on the soil depth, as it is used in the program.

Average yield of wheat kg(1) Soil depth cm(2)

Az egy év alatt elérhető jövedelmet a (7) kifejezéssel adott B_Σ összes bevétel, a (9) kifejezéssel adott $K_{\bar{u},\Sigma}$ éves üzemelési költség és a (10) kifejezéssel adott P_v jövedelemkiesés határozza meg:

$$P_j = B_\Sigma - K_{\bar{u},\Sigma} - P_v \quad (12)$$

A T_m megtérülési idő a $K_{b,\Sigma}$ beruházási költség, a P_t támogatás, a kumulált hitelkamat, valamint a P_j éves jövedelem függvénye:

$$T_m = \frac{K_{b,\Sigma} + K_{THM,\Sigma} - P_t}{P_j} \quad (13)$$

A másik gazdaságosságot jellemző célfüggvény, azaz az 1 kWh energia teljes élettartamra vetített előállítási költsége (K_{1kWh}), a beruházás teljes élettartama alatt termelt energia ($E_T = E_{1év}T$), az összes üzemelési és a beruházási költség, valamint a kumulált hitelkamat felhasználásával számítható ki:

$$K_{1kWh} = \frac{K_{ü,\Sigma}T + K_{b,\Sigma} + K_{THM,\Sigma}}{E_T} \quad (14)$$

Szélerőmű beruházás gazdaságosságának számítása

A szélerőmű beruházás gazdaságosságának értékeléséhez meg kell állapítanunk a szélgéppel az adott területen szolgáltatott teljesítmény éves átlagát. A szélesebbesség nagyságának eloszlása közelítőleg az

$$f(v) = \frac{\pi v}{2v_a^2} e^{-\frac{\pi v^2}{4v_a^2}} \quad (15)$$

valószínűségi sűrűség-függvénnyel írható le (Patay, 2003), ahol $v_a \equiv \langle v \rangle$ a szélesebbesség – fenti eloszlásnak megfelelő – várható értéke, amit a gyakorlatban a szélesebbesség időbeli átlagértékével becsülhetünk. A szélerőmű számára rendelkezésre álló, felületegységre jutó széltejesítmény várható értéke (Patay, 2003)

$$\langle p_{1m^2}(v) \rangle = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho_{\text{levegő}} \frac{\pi v^4}{2v_a^2} e^{-\frac{\pi v^2}{4v_a^2}} dv, \quad (16)$$

ami megfelelő átalakítás útján

$$\langle p_{1m^2}(v) \rangle = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right)^3 \rho_{\text{levegő}} v_a^3 \int_0^{\infty} t^4 e^{-t^2} dt = \frac{3}{\pi} \rho_{\text{levegő}} v_a^3 \quad (17)$$

alakra hozható. Figyelembe véve, hogy a szélerőművek maximális hatásfoka $\eta_{\max} = 16/27$ (Patay, 2003), fentiek alapján egy A rotorfelületű szélgép átlagos teljesítményének felső határa

$$\langle p_A \rangle_{\max} = \frac{16}{9\pi} \rho_{\text{levegő}} A v_a^3 \quad (18)$$

Vízszintes tengelyű, d rotorátmérőjű szélgépet feltételezve a fenti kifejezés

$$\langle p_d \rangle_{\max} = \frac{4}{9} \rho_{\text{levegő}} d^2 v_a^3 \quad (19)$$

alakra hozható, mely szerint a szélgépek átlagos teljesítményének felső határa erőteljesen növekszik mind a rotorátmérőnek, mind pedig az átlagos szélesebbességnek a növekedésével.

A szélgépek azonban csak akkor termelnek energiát, ha a szélesebbesség értéke a szélgépre jellemző v_{\min} indulási sebesség és v_{\max} leállási sebesség értékek közé esik. A (16) kifejezésből kiindulva, egy d rotorátmérőjű szélgép tényleges átlagteljesítménye tehát

$$\langle p_d \rangle = \eta_r \eta_{sz} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{1}{2} \rho_{\text{levegő}} \frac{d^2 \pi}{4} \frac{\pi v^4}{2v_a^2} e^{-\frac{\pi v^2}{4v_a^2}} dv, \quad (20)$$

ami megfelelő átalakítás útján a

$$\langle p_d \rangle = \eta_r \eta_{sz} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho_{\text{levegő}} d^2 v_a^3 \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t^4 e^{-t^2} dt \quad (21)$$

alakra hozható, ahol $\eta_{sz} \leq 16/27$ a szélgép, η_r pedig a kapcsolódó elektronikus rendszer hatásfoka, továbbá

$$t_{\min} = \frac{\sqrt{\pi} v_{\min}}{2 v_a} \quad \text{és} \quad t_{\max} = \frac{\sqrt{\pi} v_{\max}}{2 v_a}. \quad (22)$$

A fentiek alapján felírhatjuk a szélgép által 1 év alatt termelt összes energia várható értékét:

$$E_{1\text{év},1\text{szélgép}} = 1\text{év} \times \langle p_d \rangle = (365 \times 24\text{h}) \times \eta_r \eta_{sz} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho_{\text{levegő}} d^2 v_a^3 \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t^4 e^{-t^2} dt \quad (23)$$

Ha a $\rho_{\text{levegő}}$ sűrűséget kg/m^3 , a d rotorátmérőt méter, a v_a átlagsebességet pedig m/s egységben mérjük, akkor a fenti kifejezés $E_{1\text{év},1\text{szélgép}}$ értékét Wh (wattóra) egységben szolgáltatja. Ha A_{sz} -el jelöljük az egy szélgépre jutó földterület nagyságát, akkor az $E_{1\text{év},1\text{m}^2}$ (az 1 év alatt megtermelt energia 1m^2 -nyi földterületre jutó része) mennyiséget *formálisan* a szélerőművek esetére is definiálhatjuk:

$$E_{1\text{év},1\text{m}^2} = \frac{E_{1\text{év},1\text{szélgép}}}{A_{sz}}. \quad (24)$$

E formális definíció azzal az előnnyel jár, hogy segítségével a szélerőmű beruházás gazdaságosságát pontosan ugyanúgy a (2-14) egyenletek alapján számíthatjuk ki, mint a napelemes erőművek esetében, feltéve, hogy minden olyan mennyiséget (N_n , A_n , $K_{n,1}$, $K_{u,n}$), ami ott napelemekre vonatkozott, szélgépekre vonatkoztatunk (N_{sz} - szélgépek száma, A_{sz} - egy szélgépre jutó földterület, $K_{sz,1}$ - szélgép egységára, $K_{u,sz}$ - egy szélgépre jutó éves üzemelési költség). Mivel azonban a szélerőművek lényegében nem korlátozzák telepítési területük mezőgazdasági hasznosítását, a szélerőmű beruházás esetében az egy négyzetméterre jutó termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesés zérus:

$$P_{v,1\text{m}^2} = 0.$$

A (23) kifejezés kiértékeléséhez ismernünk kell a szélesebbesség v_a átlagértékét, amit a rendelkezésünkre álló térkép csak 70 m-es magasságra vonatkozóan adott meg. Ha a szélgép h magassága 70 métertől eltér, akkor a szélgép magasságában az átlagos szélesebbesség értékét a

$$v_a(h) = v_a(70\text{m}) \times \sqrt{\frac{h}{70\text{m}}} \quad (25)$$

kifejezéssel becsülhetjük (Patay, 2003), ahol $v_a(h)$ és $v_a(70\text{m})$ rendre a szélesebbesség h magasságban illetve 70 méteren mérhető átlaga.

Megemlítjük, hogy a (23) kifejezésben szereplő integrál eredménye nem állítható elő zárt alakban, ezért azt v_a , v_{\min} és v_{\max} ismeretében numerikusan kell kiszámítani.

A megtérülési idő alsó határa

A (4) kifejezéssel adott $K_{b,\Sigma}$ beruházási költségnek, a (6) kifejezéssel adott P_t támogatásnak, és a (9) kifejezéssel adott $K_{ü,\Sigma}$ üzemelési költségnek a T_m megtérülési idő (13) kifejezésébe való behelyettesítésével kapjuk, hogy

$$T_m = \frac{(1 - X_t) \frac{N_n K_{n,1} + N_a K_{a,1}}{1 - X_{b,e}} + K_{THM,\Sigma}}{E_{1\text{év}} B_{1\text{kWh}} - (N_a K_{ü,a} + N_n K_{ü,n} + K_{ü,e} + \frac{([T/T_a]^\uparrow - 1) N_a K_{a,1}}{T}) - P_v}, \quad (26)$$

ahol figyelembe vettük a B_Σ összes bevételre vonatkozó (7), az akkumulátorcserékkel kapcsolatos $K_{ü,acs}$ üzemelési költségre vonatkozó (8), és a P_j éves jövedelemre vonatkozó (12) kifejezéseket is. Felmerül a kérdés, hogy adott $B_{1\text{kWh}}$ egységár, $K_{n,1}$, $K_{a,1}$, $K_{ü,n}$, $K_{ü,a}$, $K_{ü,e}$ költségadatok, és X_t , $X_{b,e}$ arányok mellett vajon mekkora a megtérülési idő alsó határa ($T_{m,\min}$)?

Ha a beruházás éves mérlege nyereséget mutat (azaz ha a fenti kifejezés nevezője pozitív), akkor a megtérülési idő csökkenthető az 1 év alatt termelt $E_{1\text{év}}$ energia növelésével. Ennek megfelelően a megtérülési idő – a valóságban megközelíthető, de el nem érhető – alsó határát a

$$T_{m,\min} = \lim_{E_{1\text{év}} \rightarrow \infty} T_m \quad (27)$$

egyenlőség alapján számíthatjuk ki. Az egyszerűség kedvéért a következőkben a megtérülési idő alsó határát 0% hitel ($K_{THM,\Sigma} = 0$) és zérus termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesés ($P_v = 0$) feltételezésével számítjuk ki.

A (26) kifejezés jobb oldalának (27)-be történő behelyettesítésével, és a fenti feltételek figyelembevételével kapjuk, hogy

$$T_{m,\min} = \lim_{E_{1\text{év}} \rightarrow \infty} \frac{\frac{1 - X_t}{1 - X_{b,e}} N_n K_{n,1} + \frac{1 - X_t}{1 - X_{b,e}} N_a K_{a,1}}{(E_{1\text{év}} B_{1\text{kWh}} - N_n K_{ü,n}) - (N_a K_{ü,a} + K_{ü,e} + \frac{([T/T_a]^\uparrow - 1) N_a K_{a,1}}{T})}, \quad (28)$$

ahol mind a számlálóban, mind pedig a nevezőben különválasztottuk az $E_{1\text{év}}$ mennyiségtől függő, és attól független tagokat. A (3) összefüggés figyelembevételével a fenti kifejezés jobb oldala

$$\lim_{E_{1\text{év}} \rightarrow \infty} \frac{\frac{1 - X_t}{1 - X_{b,e}} \frac{E_{1\text{év}} K_{n,1}}{A_n E_{1\text{év},1\text{m}^2}} + \frac{1 - X_t}{1 - X_{b,e}} N_a K_{a,1}}{(E_{1\text{év}} B_{1\text{kWh}} - \frac{E_{1\text{év}} K_{ü,n}}{A_n E_{1\text{év},1\text{m}^2}}) - (N_a K_{ü,a} + K_{ü,e} + \frac{([T/T_a]^\uparrow - 1) N_a K_{a,1}}{T})}, \quad (29)$$

alakra hozható. A határérték képzése ezután a

$$T_{m,\min} = \frac{\frac{1 - X_t}{1 - X_{b,e}} K_{n,1}}{A_n E_{1\text{év},1\text{m}^2} B_{1\text{kWh}} - K_{ü,n}} \quad (30)$$

végeredményre vezet: a számlálóban lényegében az egy napelemre jutó beruházási költség (a napelem vételára és a kapcsolódó egyéb járulékos beruházási költségek összege) támogatás által nem fedezett része, a nevezőben pedig az egy napelem által 1 év alatt termelt energiából származó bevétel és az egy napelemre jutó éves üzemelési költség különbsége áll.

A fenti kifejezés szélerőművekre érvényes alakját a $K_{n,1} \rightarrow K_{sz,1}$, $A_n \rightarrow A_{sz}$ és $K_{ü,n} \rightarrow K_{ü,sz}$ helyettesítésekkel kaphatjuk meg.

1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének alsó határa

A (14) kifejezés alapján kiszámíthatjuk az 1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének alsó határát ($K_{1kWh,min}$) is. Zérus termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesés ($P_v = 0$) és 0% hitel ($K_{THM,\Sigma} = 0$) feltételezésével a következő eredményre jutunk:

$$K_{1kWh,min} = \lim_{E_{1év} \rightarrow \infty} K_{1kWh} = \frac{K_{ü,n}T + \frac{K_{n,1}}{1 - X_{b,e}}}{A_n E_{1év,1m^2} T} \quad (31)$$

ahol T a beruházás élettartama.

Fenti kifejezés szélerőművekre érvényes alakja:

$$K_{1kWh,min} = \lim_{E_{1év} \rightarrow \infty} K_{1kWh} = \frac{K_{ü,sz}T + \frac{K_{sz,1}}{1 - X_{b,e}}}{E_{1év,1szélgép} T} \quad (32)$$

Földrajzi helyzettől függő adatok megjelenítése

A bittérképek a globálsugárzás éves összege, a szélesebesség átlaga vagy más egyéb tulajdonság szempontjából – véges felbontásuk miatt – szükségszerűen mindig csak pontonként képesek valamely földrajzi terület jellemzésére. A különálló pontokból felépülő térképeket bizonyos méret fölé nagyítva a térképpontok egymástól eltávolodnak, és kitöltetlen, üres helyeket hagynak szabadon maguk között. Ilyen esetekben a megjelenítés a kívánatosnál sokkal kevésbé informatív az adott terület tulajdonságait illetően. Ezt a problémát a kidolgozott programban a következőképpen oldottuk meg.

Annak érdekében, hogy a térképek ábrázolásához rendelkezésre álló véges sok adat felhasználásával tetszőleges nagyítás mellett kellően informatív megjelenítést érjünk el, egy olyan eljárást dolgoztunk ki, ami a pontokból álló térképet poligonokból álló térképpé alakítja át oly módon, hogy az egymással oldalaik mentén érintkező poligonok a térkép területének egy hézagmentes lefedését adják. A 4. ábrának megfelelően a poligonok a pontok alkalmasan megválasztott környezeteként állíthatók elő, s ennek megfelelően minden poligon színét a benne foglalt képpont színével vettük azonosnak. Ha ezek után az eredeti képpontok helyett a nekik megfelelő poligonokat ábrázoljuk, akkor tetszőleges nagyítás mellett informatív megjelenítést kapunk.

A poligonokból álló térkép (ún. *poligontérkép*) térképpontokból (ún. *nyers térképből*) történő előállításának elvét a 2. ábra szemlélteti. A poligontérkép előállításának főbb lépései a következők:

- Egy taláalomra kiválasztott kiindulópont és a hozzá legközelebb eső pont felhasználásával meghúzzuk az első élt.
- Megkeressük azt a pontot, amelyből az imént meghúzott él a legnagyobb szög alatt látszik, és ennek felhasználásával meghúzzuk az ábra szerinti két új élt, megalkotva ezzel az első olyan háromszöget, aminek a belsejében biztosan nincs térképpont.
- Ugyanílyen módon megrajzoljuk az elsőként berajzolt él másik oldalán is az éleket, illetve a megfelelő háromszöget.

- d. Miután a legelső élre több háromszöget rajzolni már nem tudunk, az eljárást a másodiknak megrajzolt éllel, majd a további éllel folytatjuk mindaddig, amíg találunk olyan élt, amire a leírt eljárással újabb háromszöget lehet rajzolni. Így eljárva végül – a szélső pontok kivételével – minden pont körbe lesz véve háromszögekkel.
- e. E háromszögek súlypontjait összekötve minden ponthoz megkapjuk a pontot tartalmazó poligont.
- f. Ábrázoláskor a pont helyett a poligont rajzoljuk meg, és annak teljes területét a pont színére festjük.

2. ábra

Poligontérképek térképpontok alapján történő előállításának elve.

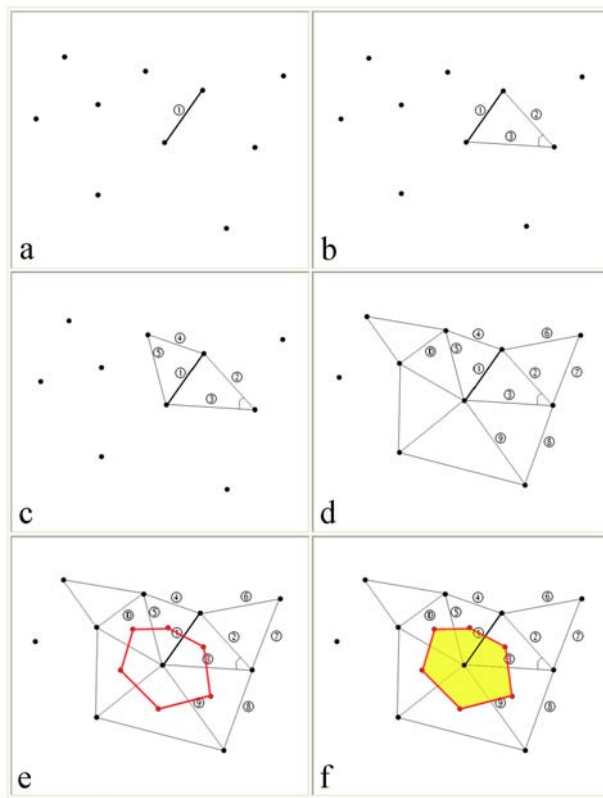


Figure 2. Principle of the creation of polygon-based maps on the basis of point-based maps.

A kidolgozott program felhasználói felülete és fontosabb funkciói

A program felhasználói felületének – **TÉRKÉPEK** című – főoldala (3. ábra) szolgál a rendelkezésre álló poligontérképek beolvasására és megjelenítésére. A program a térképeket – kerettel vagy keret nélkül rajzolt – poligonok sokaságaként, vagy

egyszerűen csak pontonként jeleníti meg a felhasználó választásától függően. A beolvasott térképek kicsinyített formában megjelenítésre kerülnek az oldal alján található sávban. Az aktuálisan szemlélni kívánt térkép, valamint annak megjelenítési módja a kicsinyített térképekre való klikkelés után megjelenő menüben választható meg. A felhasználó többféle megjelenítési mód közül választhat: lehetőség van egy térkép kizárólagos, vagy több térkép egyszerre, egymáson történő megjelenítésére. Több térkép egyszerre történő megjelenítése esetén megválasztható a térképek megjelenítésének sorrendje és egymásra való helyezésük módja. A program kétféle lehetőséget kínál a térképek egymásra helyezésére: az egyik esetben a térképek eltakarják az alattuk lévő térkép megfelelő részeit, a másik esetben a program az alul lévő térkép és a ráhelyezett térkép átlagát² jeleníti meg, ezzel mintegy az átlátszóság érzetét keltve. Lehetőség van arra is, hogy a megjelenítés csak a térkép(ek) egyes színkoordinátáira (R,G,B), vagy azok kombinációira korlátozódjon.

3. ábra.

A program Térképek című oldala, ami elsősorban a poligontérképek és adataik megjelenítésére szolgál.

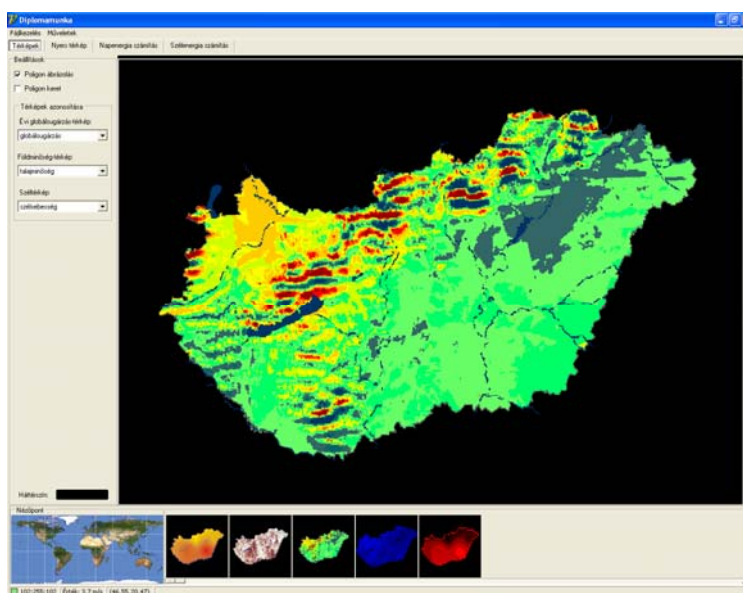


Figure 3: The 'MAPS' page of the program, which serves for the visualization of polygon-based maps and their data.

A jobb oldali görgetősáv segítségével a nézőpont távolságát lehet beállítani (s ezzel a képet nagyítani vagy kicsinyíteni), a bal alsó térkép segítségével pedig a nézőpont irányának földrajzi szélesség és hosszúság koordinátáit lehet módosítani.

² A térképek átlagolása képpontonként történik oly módon, hogy a program az alul lévő és a ráhelyezett képpont színének R, G és B színkoordinátáit külön-külön átlagolja.

A képernyő bal oldalán van lehetőség annak megválasztására, hogy a program melyik beolvasott térképet tekintse globálsugárzás-, földminőség-, illetve szélesség-térképnek a számítások során.

A **MŰVELETEK** menüpont segítségével a megjelenített térkép(ek) bitkép formátumban vágólapra másolható(ak), és ezáltal más programokban is felhasználható(ak).

A programhoz használható poligontérképek a program második (**NYERS TÉRKÉP** című) oldalán állíthatók elő az *1. táblázatban* látható formátumú nyers térképekből. A formátumot a szöveges fájl első sorában elhelyezett **FORMAT0** és **FORMAT1** karaktersorozat azonosítja. Egy térképpontnak mindkét esetben egy sor felel meg: az első esetben valamennyi sor $\theta; \varphi; R; G; B$ szerkezetű, ahol θ és φ rendre a térképpont földrajzi szélesség és földrajzi hosszúság koordinátája fokokban mérve, R, G és B pedig az adott pont színének színkoordinátái. A második esetben a pontokhoz tartozó sorok $\varphi; R; G; B$ szerkezetűek, θ aktuális értékét pedig T betűvel kezdődő sorok határozzák meg az alattuk található sorokra vonatkozóan.

1. táblázat

A program NYERS TÉRKÉP című oldalán poligontérképpé alakítható szöveges adatfájlok (nyers térképek) két lehetséges formátuma

Format0	Format1
48.35;20.4389;44;44;46	T48.35
48.35;21.4521;173;179;184	20.4389;44;44;46
48.35;21.4652;5;5;5	21.4521;173;179;184

Table 1: Formats of files containing the data of point-based maps which can be converted into polygon-based maps on the 'RAW MAPS' page of the program.

A program lehetőséget nyújt a poligontérkép előállítása során elfogadható maximális élhossz és minimális látószög beállítására. Az elkészült poligontérképek alappontjait a program egy IOB kiterjesztésű, az alappontokhoz tartozó poligoncsúcspontokat pedig egy azonos nevű, de IOD kiterjesztésű fájlba menti el.

A felhasználónak lehetősége van arra, hogy a poligontérkép színeihez tetszőleges értéket (globálsugárzás, szélesség stb.) rendeljen hozzá. Az egyes színeknek megfeleltethető értékeket egy az előzőekkel megegyező nevű, de CVT kiterjesztésű szöveges fájlban kell elhelyezni a *2. táblázatban* látható formátumban. A program ezt az értéktáblázatot használja fel arra, hogy a különböző földrajzi helyzetű pontok színe alapján megállapítsa a térképen ábrázolt mennyiség adott pontra jellemző értékét. Amennyiben a pont színe egyik értéktáblázatban szereplő színnel sem egyezik meg, úgy a program ahhoz a színhez tartozó értéket fogja választani, mely színhez a pont színe a legközelebb esik.³

A felhasználó egy az előzőekkel azonos nevű, de DIM kiterjesztésű fájl első sorában megadhatja az adott térkép által ábrázolt mennyiség – program által megjelenítendő – mértékegységét is.

³ A program egy R_1 , G_1 és B_1 valamint egy R_2 , G_2 és B_2 színkoordinátájú szín d_{RGB} távolságát a következőképpen számítja ki: $d_{RGB} = |R_1 - R_2| + |G_1 - G_2| + |B_1 - B_2|$.

2. táblázat

A CVT kiterjesztésű fájlban megadható értéktáblázat formátuma.
Minden sor egy szín három (R, G és B) színekkoordinátáját és végül az adott színhez társítandó értéket tartalmazza pontosvesszővel elválasztva.

252;234;001;4250
236;199;019;4300
231;198;008;4350
231;189;008;4400

Table 2: Format of the file containing the table of colors and associated parameter values. Each line consists of the R, G and B color coordinates of a color, and a floating point number representing the parameter value associated with that color. The numbers should be separated by semicolon.

A program harmadik (**NAPENERGIA SZÁMÍTÁS** című) oldalán nyílik lehetőség a naperőmű beruházás gazdaságosságának számítására. Ezen az oldalon valamennyi eddig tárgyalt paraméter megadására lehetőség van. A program az oldalon elhelyezett térképen kijelölhető földrajzi helyzetű pontra vonatkozóan mutatja be a számítások eredményeit.

A **SZÁMÍTÁSOK** menüpontban lehetőség van arra, hogy az 1 kWh energia teljes élettartamra vonatkoztatott előállítási árát, valamint a beruházás megtérülési idejét a paraméterek aktuálisan beállított értékei mellett Magyarország teljes területére⁴ vonatkozóan kiszámítsuk, és az eredményeket poligontérkép formájában a **TÉRKÉPEK** című oldalon megjelenítsük. Ebben a menüben van továbbá lehetőségünk arra, hogy az eredményeket valamelyik paraméter függvényében kiszámítsuk, és az így kapott függvényt egy további feldolgozásra alkalmas szöveges fájlba elmentsük.⁵

A program negyedik (**SZÉLENERGIA SZÁMÍTÁS** című) oldalán lehet elvégezni a szélerőmű beruházás gazdaságosságára vonatkozó számításokat. A **SZÁMÍTÁSOK** menü ebben az esetben is ugyanazokat a lehetőségeket nyújtja a felhasználó számára, mint a **NAPENERGIA SZÁMÍTÁS** című oldalon.

A programot a globálsugárzás éves összegének átlagát és a felszín felett 70 méteres magasságban mérhető szélesebség átlagát mutató térképeknek, valamint Magyarország földminőség-térképének felhasználásával alkalmaztuk Magyarország területére. Az általunk használt szélterkép egyetlen színnel jelezte azokat a területeket Magyarországon, ahol a felszín felett 70 m magasságban 5.0 m/s-nál nagyobb a szélesebség nagyságának az átlaga. Ezeket a területeket 5.1 m/s szélesebség átlaggal vettük figyelembe, mely értékválasztással a szélerőművek telepítésének gazdaságosságát a legnagyobb átlagos szélesebséggel bíró területekre vonatkozóan pesszimista módon becsüljük.

A naperőmű beruházás gazdaságosságát Siemens M 50 típusú egykristályos szilícium félvezetőre épülő napelemre vonatkozóan végeztük el. Ennek a napelemnek a

⁴ A program a Magyarország legkisebb és legnagyobb földrajzi szélességű két pontja közötti tartományt 300 egyenlő részre bontja fel, s ugyanezt teszi a hasonló módon kijelölt földrajzi hosszúság tartománnyal is. Az eredmények az így nyert 300×300 db területelemre vonatkozóan kerülnek kiszámításra.

⁵ Az így létrehozott fájlban a kiválasztott paraméter értéke nullától az aktuálisan megadott értékig terjed. Ezt az intervallumot a program a számítások során ezer egyenlő részre osztja fel, és az eredményeket ezen részintervallumok végpontjaiban számítja ki.

névleges teljesítménye 50 W, a felülete 0,4 m², jelenlegi egységára 69900 Ft, az egy napelemre jutó évi üzemelési költség pedig hozzávetőlegesen 15 forint (NBT, 2007). Az energiatároló rendszer kapcsán az SD 12-150 típusú akkumulátor adataival számoltunk. Ennek az akkumulátornak a névleges feszültsége 12 V, töltéstároló kapacitása 150 Ah, jelenlegi egységára 73104 Ft, az éves üzemelési költsége ~ 2000 Ft, élettartama pedig 7 év. Feltételeztük, hogy a napelemes erőműhöz 200 kWh villamos energia tárolására alkalmas rendszert kell telepíteni. A számítások során feltételeztük továbbá, hogy

- a napelemes erőmű élettartama 30 év,
- a kapcsolódó villamos rendszer hatásfoka 70%,
- a beruházási költség 30%-át vissza nem térítendő támogatásból tudjuk fedezni,
- a beruházás költségéből 45%-ot tesznek ki a napelemek és az akkumulátorok vételárán felüli költségek (járulékos költséghányad),
- a beruházási költségek fedezéséhez a költségek további 30%-át kitevő, 11%-os teljes hiteldíj mutatójú és 15 év futamidejű hitelt veszünk fel 5,6%-os infláció mellett,
- a villamos energiát 42 Ft/kWh áron tudjuk értékesíteni,
- és az erőműtől elvárt teljesítmény 100 MWh/év.

A termőföldkivonásból eredő jövedelemkiesés megbecsléséhez feltételeztük továbbá, hogy 1 t búza megtermelése az adott területen 22500 Ft nyereséget eredményez.

4. ábra.

1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének (Ft) függése a földrajzi helyzettől Magyarország területén, a szövegben részletezett naperőmű beruházás feltételezésével

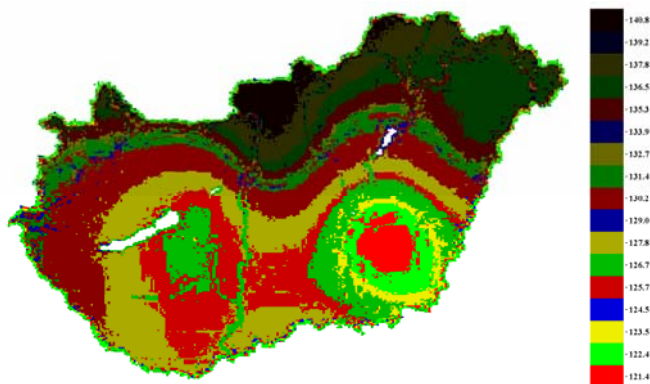


Figure 4. Average production costs (in HUF) of 1 kWh electrical energy considering all the expenditures arisen and all the electrical energy produced during the lifetime of the solar power plant described in the text.

A fenti beruházásra vonatkozóan a 4. ábra mutatja az 1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének a földrajzi helyzettől való függését. Látható, hogy ezzel a naperőművel Magyarországon az ország délkeleti részén lehet a leggazdaságosabban villamos energiát termelni, de a villamos energia előállítási költsége még ezen a területen is meghaladja az országos villamosenergia-hálózatból vételezhető energia árát. Az ábra szerint 1 kWh előállítási költsége a tárgyalt naperőmű esetében 121 Ft és 141 Ft között változik.

Az 5. ábra mutatja a naperőmű beruházás megtérülési idejének függését a földrajzi helyzettől. Ebben az esetben is a délkeleti országrészre vonatkozó adatok a legkedvezőbbek, de a legrövidebb megtérülési idő (~ 85 év) is hosszabb, mint a beruházás teljes élettartama, azaz pénzügyi szempontból megtérülésről ebben az esetben nem beszélhetünk.

5. ábra.

A szövegben részletezett naperőmű beruházás megtérülési idejének (év) függése a földrajzi helyzettől Magyarország területén.

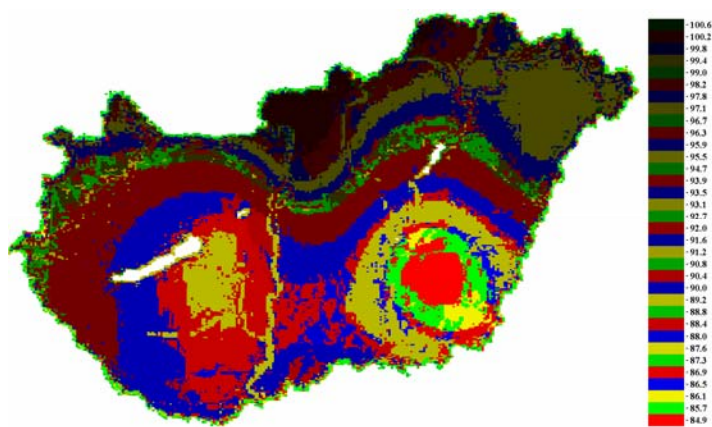


Figure 5: Payback period (in years) of the solar power plant described in the text as a function of geographical location inside Hungary.

A szélörőmű beruházás magyarországi gazdaságosságának vizsgálatához a Nordex N60 típusú szélörőmű adatait használtuk fel. E szélörőmű rotorátmérője 60 m, indulási szélessége ~ 3 m/s, leállási szélessége 25 m/s, magyarországi viszonyok között a hatásfoka ~ 30%, egységára pedig ~ 250 MFt. E szélörőmű magassága 46 m-től 85 m-ig terjedhet. A számítások során feltételeztük, hogy

- a szélörőmű élettartama 30 év,
- a szélörőműhöz nem csatlakozik energiátároló rendszer,
- a kapcsolódó villamos rendszer hatásfoka 70%,
- a szélörőmű magassága 85 m,
- a levegő hőmérséklete 10°C,
- a szélörőművel kapcsolatos éves üzemelési költség a beruházási költség 2%-ával egyenlő,
- a beruházási költség 30%-át vissza nem térítendő támogatásból tudjuk fedezni,
- a beruházás költségéből 30%-ot tesznek ki a szélörőmű vételárán felüli költségek (járulékos költséghányad),
- a beruházási költségek fedezéséhez a költségek további 30%-át kitevő, 11%-os teljes hiteldíj mutatójú és 15 év futamidejű hitelt veszünk fel 5,6%-os infláció mellett,
- a villamos energiát 23 Ft/kWh áron tudjuk értékesíteni,
- és a szélörőmű egyetlen szélörőműből áll.

6. ábra

A tárgyalt szélenergiás beruházás megtérülési idejének (év) függése a földrajzi helyzettől Magyarország területén.



Figure 6: Payback period (in years) of the wind power plant described in the text as a function of geographical location inside Hungary.

7. ábra

1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének (Ft) függése a földrajzi helyzettől Magyarország területén, a szövegben részletezett szélenergiás beruházás feltételezésével



Figure 7: Average production costs (in HUF) of 1 kWh electrical energy considering all the expenditures arisen and all the electrical energy produced during the lifetime of the wind power plant described in the text.

A fenti szélérőmű beruházás megtérülési idejének a földrajzi helyzettől való függését mutatja a 6. ábra. Látható, hogy 23 Ft/kWh átvételi ár mellett Magyarországon elsősorban a Dunántúli-középhegység, az Északi-középhegység, valamint a Kisalföld tájegységein található olyan területek, ahol a tárgyalt szélérőmű beruházás az erőmű tervezett élettartamánál rövidebb idő alatt térül meg. A szóban forgó szélérőmű megtérülési ideje a legkedvezőbb esetben hozzávetőlegesen 19,6 év.

A 7. ábra mutatja 1 kWh teljes élettartamra vetített előállítási költségének függését a földrajzi helyzettől Magyarországon területén. Legkedvezőbb esetben az előállítási költség 20,8 Ft/kWh.

KÖVETKEZTETÉSEK

Számítógépes programot dolgoztunk ki a naperőmű- és szélérőmű beruházások gazdaságosságának megbecslésére a természeti adottságok, a gazdasági környezet és az alkalmazott technológia paramétereinek függvényében. A program lehetővé teszi gazdaságosság-térképek előállítását és megjelenítését csakúgy, mint annak megállapítását, hogy a gazdaságosság milyen módon függ a gazdasági környezet és a technológia paramétereitől.

A program segítségével – példaként – megvizsgált napelemes erőműre vonatkozó eredmények arra utalnak, hogy a napelemes erőművek telepítése Magyarországon pénzügyi szempontból jelenleg még nem tekinthető megtérülő beruházásnak. A naperőmű beruházások pénzügyi szempontból történő megtérülését a napelemek egységárának csökkenése, hatásfokának növekedése, illetve a napelemes rendszerek telepítéséhez a jelenleginél nagyobb mértékű támogatást nyújtó állami támogatás-rendszer segítheti elő. A napelemes erőművek telepítése az ország délkeleti régióiban a leginkább gazdaságos.

A szélérőművekről a vizsgált példa alapján elmondható, hogy 23 Ft/kWh átvételi ár mellett az országban elsősorban a Kisalföldön, a Dunántúli-középhegységben és az Északi-középhegységben található olyan területek, ahol üzemeltetésük gazdaságos lehet.

IRODALOM

- Dely, L. (2006). Zöldenergia Program. Környezetvédelmi beruházások az önkormányzatoknál szeminárium. Balatonfüred, 2006. máj. 31 – jún. 1.
- Farkas I. (2003). Napenergia a mezőgazdaságban. Mezőgazda Kiadó : Budapest.
- GAE (1997). Agrotopográfiai térkép. Gödöllői Agrártudományi Egyetem, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, Térinformatikai Stúdió. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete
- Giber, J., Gönczi, P., Somosi, L., Szerdahelyi, Gy., Tombor, A., Varga, T., Braun, A., Dobos, G. (2005). A megújuló energiaforrások szerepe az energiaellátásban. Az új magyar energiapolitika tézisei a 2006-2030 évek közötti időszakra. 12. fejezet. Gazdasági és közlekedési minisztérium megbízásából
- MET (2007). <http://www.met.hu>
- NBT (2007). Napelemek Bt., <http://www.napelemek.hu/>
- NEP (2007). Nemzeti Energiatakarékosági Program, <http://www.energiakozpont.hu>
- Patay, I. (2003). A szélenergia hasznosítása. Szaktudás Kiadó Ház : Budapest.

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Klencsár Zoltán

Kaposvári Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Matematika és Fizika Tanszék
7401, Kaposvár, Pf. 16.

University of Kaposvár, Faculty of Economic Science

Department of Mathematics and Physics

H-7401, Kaposvár, POB 16.

Tel.: 36-82-505-950

e-mail: z.klencsar@somogy.hu