

DOI: 10.54200/kt.v1i2.23

J E L E N P U B L I K Á C I Ó A N E M Z E T I A D A T G A Z D A S Á G I
T U D Á S K Ö Z P O N T K Ö Z R E M Ű K Ö D É S É V E L J E L E N T M E G .

Napelemparkok Magyarország területén történő elhelyezését segítő döntéstámogató rendszer fejlesztése

B O G A C S O V I C S G E R G Ő , H A J D U A N D R Á S , H A R A N G I
B A L Á Z S , L A K A T O S I S T V Á N , L A K A T O S R Ó B E R T ,
S Z A B Ó M A R I A N N A , T I B A A T T I L A , T Ó T H J Á N O S *

Absztrakt: A világ energia és ásványkincsek iránti étvágya kielégíthetetlennek tűnik. A Földünkön lévő fosszilis tüzelőanyagok természetes tartalékainak a jelenlegi ütemben történő kiaknázásával az elkövetkezendő évtizedekben súlyos energiahányra visszavezethető problémákkal nézhet szembe az emberiség. Ezért a figyelmünket olyan megújuló energiaforrások felé kell fordítanunk, mint például a napenergia. A napelemparkok helyszínének kiválasztása kulcsfontosságú kérdés, mivel közvetlen hatással van a teljesítményre, a gazdasági, környezeti és szociális kérdésekre, valamint a meglévő és a jövőbeli infrastruktúrára. Ezért ebben a tanulmányban az elsődleges célunk a kormányzati (Minisztérium/MAVIR) döntéstámogatás a napelemparkok elhelyezésének kérdésében, ami a későbbiekben továbbfejleszthető befektetői, lakossági felhasználásra. Az általunk használt publikus adatbázisokból földrajzi koordináták szerint kinyert jellemzők (közvetlen normál besugárzás, átlagos levegő hőmérséklet, tengerszint feletti magasság, elektromos hálózati elemek) felhasználásával kialakított matematikai modell által szolgáltatott jóságérték jelzi a napelemparkok telepítéséhez legalkalmasabb régiók elhelyezkedését.

Kulcsszavak: megújuló energia, napelempark elhelyezése, jóságbecslés, nagymennyiségű adatelemzés

1. BEVEZETÉS

A fosszilis tüzelőanyagok égetése által okozott légszennyezés és a globális felmelegedés csökkentése érdekében a megújuló energiaforrások egyre fontosabbá válnak a modern energiahálózatokban. Az elkövetkező években nagy figyelmet kell fordítanunk az energiatermelésünk átfogó megreformálására, annak érdekében, hogy teljes energiahatalunkunk minél nagyobb hányadát megújuló erőforrásokból származó energiával tudjuk fedezni. Ennek egyik leggyorsabban fejlődő és egyre hatékonyabb módszere a napenergia felhasználása, amely tiszta, gazdaságos és hosszú távú elektromos energiaforrás. A megújuló energiaforrások iránti folyamatosan növekvő igény indukálja – elsősorban azok környezetre gyakorolt kedvezőbb hatása miatt –, hogy minden évben egyre több napelem kerül kihelyezésre. A napenergia felhasználása jelen van az állami és piaci szektorokban egyaránt, továbbá évről évre egyre gyorsuló ütemben nő a világon a napenergiából előállított energia mennyisége. Ennek oka többek között, hogy az optimálisan elhelyezett napelemparkok

* A szerzők a Neumann Nonprofit Közhasznú Kft. munkatársai.

általában nem gyakorolnak negatív környezeti hatást az őket körülvevő területre és az élővilágra, ellenkezőleg, jelentősen hozzájárulnak a CO₂-ki-bocsátás csökkentéséhez és általában véve pozitív hatással vannak az ökológiára. Ahhoz, hogy ez a pozitív hatás érvényesülni tudjon, a napenergia teljes potenciáljának kihasználására van szükség. Ennek első lépése a napelemparkok elhelyezéséhez a legjobb helyszín meghatározása, amely azonban nehéz és összetett feladat, különös tekintettel arra, hogy a napenergia talán egyik legnagyobb hátránya a fizikai telepítéséből adódó helyigénye. Ezért különösen fontos, hogy a kihelyezett napelemek optimálisan legyenek elhelyezve, ezáltal maximalizálva az általuk termelni képes energia mennyiségét. Mindezekre tekintettel egy olyan komplex rendszer, amely képes előre megjósolni egy adott terület napelem által nyújtott energiatermelési képességét, gyakorlatilag a gazdaság összes szereplője számára hasznos eszköz lehet.

Ebben a publikációban egy olyan fejlesztés részleteit mutatjuk be, amely nyilvánosan elérhető adathalmazok feldolgozásával jószágbecslést kíván adni arra vonatkozóan, hogy hol lenne érdemes napenergia telephelyeket létesíteni Magyarország területén, figyelembe véve az energiatermelést és az üzemeltetéshez szükséges infrastruktúrát meghatározó tényezőket. A fejlesztés során felhasznált adatkészleteket két csoportra oszthatjuk. Az adathalmazok első csoportja alapján becslést tudunk adni arról, hogy az ország egyes részein mekkora hatékonysággal tudna egy telephely működni, míg a második csoport az ország jelenlegi teljes energiafogyasztását írja le, amely viszonyítási alapul szolgálhat a kívánt energiatermelés mértékének beállításához. Ezek mellett, megfelelően részletgazdag adathalmazok segítségével meghatározhatók az országon belül olyan földrajzi pontok, ahol más elhelyezési szempontoknak is megfelelhettünk, mint például a telephely közelsége nagyobb városokhoz, energiafogyasztó központokhoz. Ezekből az adathalmazokból kinyerhető jellemzők alapján egy matematikai modellt dolgoztunk ki, amely alapján meghatározható egy szabadon kiválasztható földrajzi koordinátára vonatkozó olyan jószágérték, amely leírja az adott terület napenergia termelési potenciálját.

A rendszer működéséből adódó lehetőségek az olyan gazdasági szereplők esetében, mint például az önkormányzatok, befektetők, cégek, ösztönzőleg hathatnak, ugyanis segítségükkel az állami tulajdonban vagy magántulajdonban lévő területek megvizsgálhatók abból a szempontból is, hogy a jövőben érdemes-e rajtuk napelemparmot létrehozni. Ezenfelül ugyancsak befolyásolhatja az állami döntéshozókat a pályázati források kiírásában is, ugyanis egy terület energiatermelése megbecsülhetőségének esélye megváltoztathatja a befektetési szokásokat. Egy földterület hasznosításakor nemcsak az úthálózat vagy internet hálózat jelenléte, hanem a napenergia termelési képességének mennyisége is értéknövelő tényező lehet vagy akár hatással lehet a rajta létrehozni kívánt létesítmény felépítésére is. Annak ismerete tehát, hogy egy terület milyen energiatermelési képességgel bírhat a jövőben, gyakorlatilag egy új dimenziót ad annak vizsgálatához, hogy azt az állam, a piac vagy a lakosság milyen módon hasznosíthatja.

2. A KAPCSOLÓDÓ SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

A külföldi források közül kiemelendő, hogy egy évtizede az Egyesült Államokban sem volt lehetőség olyan nyilvános térképes forrást felhasználni, amely segítette volna a napelemek elhelyezését, ám azóta több állam is törvényileg előírta az elektromos hálózat és annak fogadóképességi kapacitásáról készített térképek elérhetővé tételét. Ezek segítségével jelentősen fellendült a napelemek és napelemparmok telepítése, hiszen az elektromos hálózathoz való csatlakozás az ilyen beruházások megkezdésének az egyik legmeghatározóbb tényezője. Az Európai Bizottság kutatóközpontja 2001 óta fejleszt a PVGIS webes alkalmazást,¹ amely a napenergia erőforrás-elemzését, valamint a fotovoltaiikus (PV) teljesítmény vizsgálatokat célozza meg. A PVGIS projekt elsődleges eredménye a napsugárzás és PV teljesítménybecslést megjeleltető szabadon hozzáférhető térképes vizualizáció. Emellett nagy számú adatmennyiséget is előállítanak, melyet számos nemzetközi kutatási projektben használtak már fel.

A Magyarországra vonatkozó, nyilvánosan is elérhető térképek jelenleg nem tudják biztosítani azt a részletességet, amely szükséges lenne ahhoz, hogy egy megközelítőleg pontos potenciál becslést lehessen számítani az ország különböző területeire. Átlagos és hozzávetőleges becslést taglal a Kohlheb és munkatársai² által 2015-ben kiadott tanulmány, melyben az ország egészére nézve számítottak elméleti, műszaki, gazdasági és társadalmi potenciált a napenergia, szélenergia, vízenergia, környezeti hő és biomassza forrásokra nézve. Ezen tanulmányban a szerzők külön felhívták a figyelmet arra, hogy a saját kalkulációik sokszor meglehetősen eltérő eredményt produkáltak az általuk vizsgált szakirodalomban leírtakhoz képest. Ennek elsődleges oka a különböző kiindulási feltételek, amelyeket alapul vettek. Ezt figyelembe véve megkülönböztethetünk egy óvatosabb és egy a jelenlegi termelési szerkezet komolyabb átalakítását valószínűsítő ambiciózusabb, minimumként és maximumként megjelölt becslést. A napenergia viszonylatában hazánk kifejezetten jó adottságokkal rendelkezik, hiszen 1900–2200 óra körül alakul a napsütéses órák száma évente. A maximálisan hasznosítható elméleti potenciál a napsugarak merőleges beesését biztosító felszínen $2900 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ ($10\,500 \text{ MJ/m}^2/\text{év}$).^{3,4} A tanulmány kitér a tényleges domborzat figyelembevételével kalkulálható elméleti potenciálra is: $1100\text{–}1400 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ ($4000\text{–}5000 \text{ MJ/m}^2/\text{év}$) elméleti potenciállal számolhatunk (szórt és direkt sugárzást együtt), amely hazánk területére vetítve nagyságrendileg $400\,000\text{–}450\,000 \text{ PJ}$. Ettől pontosabb becsléshez jutunk, ha a napenergia hasznosítására alkalmas berendezések hatásfokával is számolunk, és a különféle napelem (villamosenergia-termelés), illetve a napkollektor (hőenergia-előállítás) típusok energiaátalakítási hatásfokát is figyelembe vesszük.

Munkácsy és munkatársai⁵ szerint az ökológiai szempontokat mérlegelve, csak a beépített és a 2050-ig valószínűsíthetően beépülő infrastruktúra – úgy, mint épületek, vasútvonalak, autópályák – napelemek elhelyezéséhez megfelelően tájolt felületeit figyelembe véve $232,6 \text{ km}^2$ felületen valósulhatna meg aktív napenergia-hasznosítás fenntartható módon. Hibrid kollektoros techno-

lógiával (PVT), mégpedig annak áramtermelésre optimalizált változatával számolva, $33\,605 \text{ MW}$ kapacitással 152 PJ áram és 212 PJ hőenergia termelése lenne lehetséges.

Al Garni és munkatársai⁶ a 2018-as cikkükben arra a kérdésre keresik a választ, hogy milyen metodológiákkal, illetve milyen jellemzők és meghatározó tényezők alapján lehet optimálisan elhelyezni a napelem telephelyeket. A tanulmányukban az adott területre eső napsugárzás mértékét tekintik a legfontosabb változónak, ezt követi az elektromos hálózathoz való közelség és a terület lejtési szöge. Mindezek mellett külön hangsúlyt kaptak a korlátozó tényezők, melyek közül a tájvédelmi területek, vízfelületek és azok partszakaszai tekinthetők a legszigorúbb korlátozásnak.

A Carrión és munkatársai⁸ által írt tanulmányban ismertetett környezeti döntéstámogató rendszer a napsütéses órák számát, a napsugárzást, az átlag hőmérsékletet, a földhasználatot, a lejtési szöget, az irányultságot, az autópályához mért távolságot, illetve egyéb helyi adottságokhoz köthető kritériumokat vette figyelembe. Természetesen a rendszer kalibrálásakor a legnagyobb súllyal a klímához és az orográfiahoz kapcsolható faktorokat látták el. Emellett külön figyelmet fordítottak az olyan negatív indikátorokra, amelyek jelentősen korlátozzák a napelemek elhelyezését, mint például a természetvédelmi területek, az úthálózat és azok közvetlen környezete, a folyók, a tavak, a partszakaszok és a világörökségi helyek.

A napelemparkok Ciprus Limassol kerületében való elhelyezésének kérdését tekintve Georgiou és munkatársai⁹ a legmeghatározóbb aspektusnak szintén a napsugárzást választották, mivel ez határozza meg leginkább a napelemek teljesítményét. Ezt követi az elektromos hálózattól való távolság, mert ez határozza meg a végső telepítési költségeket. A kiválasztott terület lejtését és magasságát a technikai kritériumok közé sorolták, amelyekre való odafigyelés javíthatja a befektetés megtérülését. A földterület típusát és értékét a kevésbé fontos jellemzők közé sorolták, mivel ezek csak egyszeri költség tényezőként szerepelnek a beruházásban. Legutolsó helyre rakták a szociális

aspektusként számon tartott, a táj és a kilátás jelentős módosítását mérő kritériumot.

Összegzésként, az elemzésünk kapcsán vizsgált külföldi és hazai szakirodalmak által fontosnak tartott jellemzőket négy főbb csoportba sorolhatjuk. Az első csoport a klimatológiai változók, mint például a napsugárzás^{6,7,8,9,10} és a levegő hőmérséklete.^{8,9} Ezek a tényezők azért elsődlegesek a napelemek telepítési helyének kiválasztásakor, mert ezek befolyásolják a leginkább az átlagos teljesítményét a beruházásnak. A második csoportba az orográfiai változók tartoznak: a tengerszint feletti magasság,^{9,10} a lejtő^{9,10} és annak irányultsága.¹⁰ Ezek a változók már jobban árnyalják a várható teljesítményt. A harmadik csoportba tartozó tényezők az elhelyezéshez köthető változók: elektromos hálózattól való távolság,^{7, 9,10} úthálózattól való távolság^{9,10} és a lakott területektől való távolság.^{9,10} Ezek a jellemzők befolyásolhatják a beruházás költségét a legnagyobb mértékben. A létesítendő napelem telephely környezetéhez köthető változók alkotják a negyedik, utolsó csoportot, amely magába foglalja a földtípus besorolását,^{9,10} valamint, hogy az adott hely természetvédelmi terület-e^{7,9,10} vagy annak közelében található-e és azt, hogy a táj látványát jelentősen módosítaná^{9,10} a beruházás. Ez utóbbi akkor válhat fontossá, amikor egy forgalmas útról könnyen belátható vagy turisták által gyakran látogatott területről van szó.

3. AZ ELVÉGZETT FEJLESZTÉS RÉSZLETES BEMUTATÁSA

Az elkészült fejlesztéssel célunk egy olyan alkalmazás létrehozása volt, amely képes egy jóságbecslést adni arra vonatkozóan, hogy Magyarország területén az egyes területek mennyire alkalmasak napelemfarmok telepítésére. A predikciós modell létrehozásához a kutatás-fejlesztés során kizárólag nyílt adatkészletek kerültek felhasználásra, amelyeket a 3.1. pontban tárgyalunk, valamint a 3.2. pontban mutatjuk be az adatkészletek tárolásával és a további feldolgozáshoz történő előkészítésével kapcsolatos feladatokat. Ezt követően részletesen

bemutatjuk a kidolgozott metodológiát, amely alapján egy adott koordináta-hoz meghatározásra kerül a napelemfarmok telepítésére vonatkozó prediktált jóságérték (3.3. és 3.4. pontok). Végül a fejlesztés során felhasznált vizualizációs megoldásokról (3.5. pont) és az alkalmazott technológiákról adunk egy rövid leírást (3.6. pont).

3.1. A FELHASZNÁLÁSRA KERÜLT NYÍLT ADATKÉSZLETEK BEMUTATÁSA

Az elmúlt évtizedben világszerte folyamatosan nőtt a különböző szervezetek és a kormányzatok által közzétett nyílt adatok mennyisége, így a fejlesztés során mi is ilyen adatok felhasználására támaszkodtunk. Nyílt adatnak azokat az adatokat nevezzük, amelyeket valamilyen szervezet gyűjtött, hozott létre vagy rendelt meg és liberális felhasználási feltételek mellett – esetlegesen minimális korlátozásokkal – szabadon újra felhasználhatóvá tett. Az adatoknak, annak érdekében, hogy megfeleljenek a nyílt adat definíciójának, a fenti jogi szempontból vett nyíltság mellett, technikailag is nyílnak kell lenniük: azokat nem titkosított, elektronikus formátumban, nyilvánosan elérhetően kell közzétenni.

Az adatkészletek egyre szélesebb körben történő nyilvános publikálása – korábban elképzelhetetlen – lehetőséget kínál a kormányzati szervek, a vállalkozások és a kutatók számára, hogy a nyílt adatokban rejlő potenciált társadalmi, gazdasági és tudományos előnyök elérésére használják fel. A nyílt adatok eredményes hasznosítása azonban sok esetben hosszú időbe telik. Ennek oka, hogy a nyilvánosan elérhető adatkészletek minőségi jellemzői gyakran nem ismertek és ezért azok felhasználásra alkalmassá tétele jelentős erőfeszítéseket igényel. A nyílt adatok esetében gyakori probléma továbbá, hogy hiányoznak a kapcsolódó metaadatok, nem felelnek meg a közzétett specifikációnak, továbbá, hogy előfordulhatnak bennük duplikált, ellentmondásos vagy hiányos adatelemek. Emiatt, habár az egyes szervezeteknél rendelkezésre áll

adatokhoz való nyílt hozzáférés sok szempontból előnyös, azok felhasználása technikai és minőségi nehézségekbe ütközhet, valamint az egyes forrásokból származó nyílt adatok összekapcsolása is további megoldandó feladatot jelent.

A jelen munkában bemutatott kutatás-fejlesztés során törekedtünk az elérhető legjobb minőségű nyílt adatok felhasználására, azonban az adatkészletek jellemzői miatt, valamint a modellezési cél elérése érdekében az adatok előkészítése így is jelentős időráfordítást igényelt. A munkánk során az első lépés a modell számára szükséges publikus és jó minőségű adatforrások feltárása volt. Ezt követően az összegyűjtésre került adatokat olyan formátumba hoztuk, amely elősegítette a hatékony feldolgozást és ezeket a transzformált adathalmazokat egy Microsoft Azure DataLake Storage-ben helyeztük el. A kutatás során felhasznált adathalmazok jellemzőit az alábbi pontokban tárgyaljuk.

Közvetlen normalizált besugárzás (Direct Normalized Irradiation - DNI)

A közvetlen normalizált besugárzási adatokat a Surface Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 2.1 publikus adatbázisból nyertük ki.¹¹ Az adatbázis a nap felszíni besugárzásának, a felszíni közvetlen besugárzásnak, a napsütés időtartamának, a spektrális információknak és az effektív felhő-albedónak a geostacionárius Meteosat műholdak fedélzetén lévő MVIRI és SEVIRI műszerek megfigyeléseiből származó műholdas éghajlati adatrekordjaiból áll. A Meteosat első generációs műhold fedélzetén lévő MVIRI műszer 3 csatornával van felszerelve: egy szélessávú csatornával a látható tartományban, egy infravörös csatornával és egy vízgőz csatornával. A Meteosat műholdak második generációja a Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) és a Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) műszerrel van felszerelve. A GERB műszer a Föld által elnyelt napsugárzás, az űrbe kibocsátott hősugárzás és e kettő közötti különbség vizsgálatára szolgáló látható-infravörös sugárzásmérő, amely pontos méréseket végez a légkör felső részén a rövidhullámú (SW) és a hosszúhullámú (LW) sugárzás összetevőiről.

A közvetlen normalizált besugárzás (DNI) nem más, mint a sugárzás fluxusa a felszínen, a nap irányához képest normálva, a 0,2 - 4 μm hullámhosszúságú tartományban. Ezt W/m^2 -ben fejezzük ki és a közvetlen sugárzás (SID) a nap zenitszögének koszinuszával történő normalizálásával kerül származtatásra. A SID az a sugárzás fluxus, amely közvetlenül, szórás nélkül elér egy vízszintes síkot a felszínen a 0,2 - 4 μm -es hullámhosszúságú tartományában.

Az adatok 1983-tól 2017-ig állnak rendelkezésre, és a $\pm 65^\circ$ hosszúság és $\pm 65^\circ$ szélesség ($\pm 60^\circ$ hosszúság és $\pm 60^\circ$ szélesség a spektrális információk esetében) földrajzi területére vonatkoznak. Az információk havi és napi átlagként, valamint 30 perces pillanatnyi adatokként, szabályos szélességi, illetve hosszúsági rácson, $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ térbeli felbontással állnak rendelkezésre. Magyarország földrajzi régiójára vonatkozóan az általunk kinyert adatok területi korlátja egy, az ország területét befoglaló négyzet, amely alakzat csúcsainak földrajzi koordinátái: 45.70N 16.00E, 48.65N 23.00E.

A levegő hőmérséklete két méteres magasságban

A levegő hőmérsékletére vonatkozó adatokat a *Climate data for the European energy sector from 1979 to 2016 derived from ERA-Interim* publikus adatbázisból nyertük ki.¹² Az adatkészletet a University of East Anglia által a Copernicus Éghajlatváltozási Szolgálat (C3S) részére kötött, az ágazati információs rendszer (SIS) koncepcióját alátámasztó szerződések egyikének keretében hozták létre. Az adatkészlet az európai területre vonatkozóan, az 1979-2016 közötti időszak tekintetében tartalmazza az energiaipar szempontjából releváns szélsőbességet, csapadékot, relatív páratartalmat, globális vízszintes besugárzást, tengerszint feletti nyomást, léghőmérsékletet és hóvastagság adatokat. Az adatkészlet nagyrészt a 6 órás ERA-Interim reanalízis adatkészletből származik, a megfigyelésekhez képest különböző módszerekkel végzett torzítással. Az adatokat napi, havi, szezonális és éves átlagokra aggregálták és azok NetCDF-3 formátumban, szabályos szélességi, illetve hosszúsági rácson, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ térbeli felbontással állnak rendelkezésre. Az információkat az előzőleg be-

mutatott adatbázis esetében alkalmazott módon, csak a Magyarország területét befoglaló négyzet szerinti földrajzi koordinátákra nyertük ki.

Az elektromos hálózatra vonatkozó adatok

Az elektromos hálózatok feltérképezése az OpenStreetMap által végzett kutatásból származó adatok segítségével történt,¹³ melynek célja a bolygó összes elektromos hálózatának feltérképezése és dokumentálása volt. Az elektromos hálózat elemei lehetnek távvezetékek, tornyok és alállomások, amelyek JSON formátumú adatbázisban (OSM nyers adatok), GPS koordináták szerint vannak rendszerezve.

Az adatbázisból általunk használt adatok a nagyfeszültségű távvezetékek, elektromos alállomások, illetve a kisebb feszültségű távvezetékek pozíciójára vonatkozó információk.

A nagyfeszültségű távvezetékek esetén azon energiaátvitelhez használt nagyfeszültségű vezetékek koordinátáit használtuk fel, amelyeket általában tornyok vagy oszlopok tartanak, míg a kisebb feszültségű távvezetékek esetében a kinyert koordináták az elosztóhálózatot alkotó vezetékek hálózatára vonatkoztak. Az elektromos alállomások esetében azoknak a létesítményeknek a koordinátáit vettük figyelembe, amelyek transzformátorokkal, kapcsolóberendezésekkel vagy kompenzátorokkal szabályozzák az elektromos áramot.

Területi magasság adatok

A területi magasságadatok a publikusan elérhető Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global adatbázisból származnak,¹⁴ amely nagyrészt az amerikai Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (NASA) és a Nemzeti Tér- és Hírszerzési Ügynökség (NGA) közös nemzetközi projektje révén jött létre. A projekt célja olyan radaradatok gyűjtése volt, amelyekből földfelszíni magassági adatok készültek. A Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 2000. február 11-22. között az Endeavour űrrepülőgépről végzett méréseket és a folyamat során két különböző rada-

rantennát használva egyszerre két jelet vett fel. Az űrsikló fedélzetén elhelyezett antenna gyűjtötte az egyik adatsort, a másik adatsort pedig egy, az űrsiklóból kinyúló 60 méteres árbóc végén elhelyezett antenna. A két jel közötti különbségek lehetővé tették a felszín magasságának kiszámítását. Az SRTM sikeresen gyűjtött radar adatokat a Föld szárazföldi felszínének 80%-áról az északi szélesség 60° és a déli szélesség 56° között, amelyek szabályos szélességi, illetve hosszúsági rácson 1° x 1° térbeli elhelyezkedéssel, 1 ívmásodpercenként (kb. 30 méterenként) elhelyezett adatpontokkal állnak rendelkezésre. A munkánk során a GeoTIFF formátumban elérhető adathalmaz felhasználásának célja a domborzati modell meghatározása volt, amelyből a domborzat magasságára és a lejtők szögére vonatkozó információkat nyertük ki.

Magyarország területét határoló koordináták

Az elérhető adathalmazok esetében az értékek a teljes Föld bolygóra kerültek meghatározásra, azonban a mi célunk csak a Magyarországra eső területek kinyerése volt. Ezért az előfeldolgozás első lépéseként meghatároztuk, hogy mely koordináták azok, amelyek Magyarország területéhez tartoznak. Az országhatár koordinátáinak meghatározására az Open Source Geospatial Foundation liszensz alatt futó GDAL szoftver könyvtárát használtuk fel.¹⁵ Az így kapott koordináta halmazt a továbbiakban maszkként alkalmaztuk az összes többi jellemzőn.

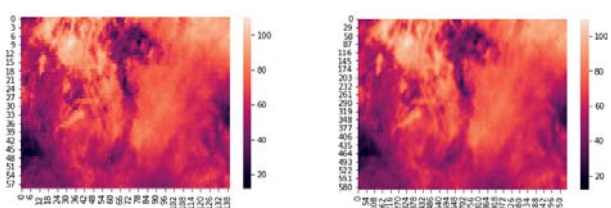
3.2. A FELHASZNÁLT

ADATKÉSZLETEKBŐL KINYERT

ADATOK ELŐKÉSZÍTÉSE

Az adathalmazok rendszerezését követően azokat előkészítettük a további feldolgozáshoz, modellezéshez. Ennek megvalósításához az Azure Databricks szolgáltatást, illetve az Apache Spark elemző motort vettük igénybe, melyek lehetővé tették a rendkívül nagy mennyiségű adatok hatékony és gyors feldolgozását.

Mivel az eredeti adathalmazok túl nagy lépésközben tartalmazták a mért értékeket (a DNI esetében például $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ fokos térbeli felbontással), ezért első lépésként interpolációt alkalmaztunk a hiányzó területek feletti értékek meghatározására. Ennek segítségével interpolált értékekkel töltöttük fel az adathalmazt, melyek a valós értékeket közelítették nagyobb területi felbontásban és amelyek használatával lényegesen részletesebb adathalmazokat tudtunk előállítani. Az interpoláció során tízszeres nagyítást alkalmaztunk, melynek eredményeként minden adathalmaz esetén százszor több adatpontot tudtunk generálni, amellyel elértük például a DNI esetében a $0,005^\circ \times 0,005^\circ$ fokos térbeli felbontást.

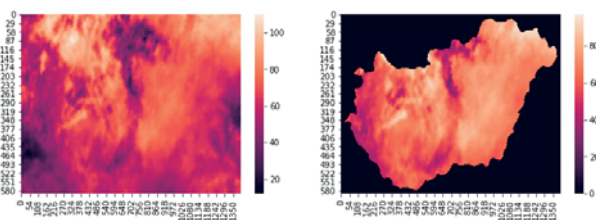


Eredeti felbontás
mellett

Interpolált adatokkal
magasabb területi
felbontás mellett

1. ábra. Az interpoláció eredménye a DNI adathalmaz esetében.

A hiányzó értékeket előállító interpolációt követően a Magyarország területét határoló GPS koordinátákból létrehozott maszk használatával eltávolítottuk azon pontokat, melyek Magyarország határán kívül estek, ezáltal biztosítva, hogy ezen területek semmilyen módon ne befolyásolják a további adatelemzést, illetve modellépítést.

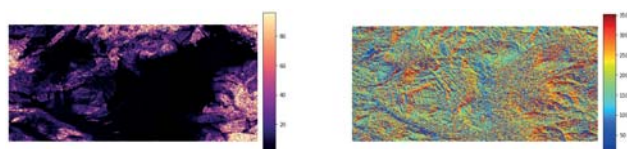


Magyarországot
befoglaló
téglalap

Magyarország határát követő
maszkolt adathalmaz

2. ábra. Magyarországot határoló koordinátákkal történő maszkolás eredménye.

Az adathalmaz előkészítése során állítottuk elő az egyéb származtatott adatokat is, úgymint a magassági adatok alapján kiszámított területi lejtők értékeit. A lejtőkkel kapcsolatos információ kulcsfontosságú lehet a napelemek elhelyezése során, hiszen több információt hordoz, mint csupán az adott terület magassága. A lejtők kiszámítását a magassági adatok alapján a RichDEM¹⁶ függvénykönyvtár segítségével végeztük el. A számítás során a Horn által bevezetett¹⁷ lejtő (slope) és fekvés (aspect) formulákat használtuk. Az előzőekhez hasonlóan a pontos értékek kiszámolása után maszk használatával kiszűrtük azon értékeket, melyek Magyarország határain belül estek.



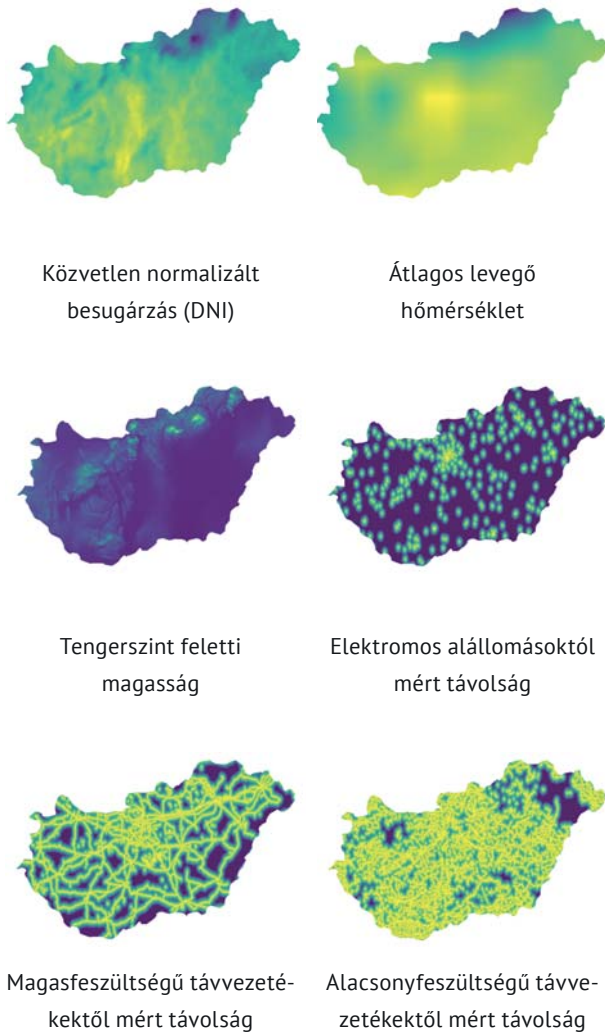
Kiszámolt lejtési
értékek

Kiszámolt fekvési irányultság
értékek

3. ábra. Magyarország feletti magassági értékekből számolt lejtő és fekvési értékek.

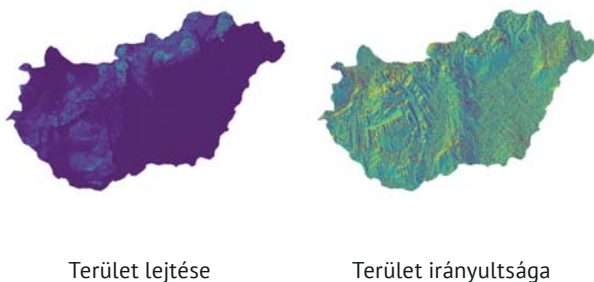
3.3. TELEPHELY JÓSÁGÁNAK MEGÁLLAPÍTÁSÁHOZ HASZNÁLT VÁLTOZÓK

Az adataink előkészítését elvégezve, a következő lépésünk ezen változók felhasználása. Az adatkészleteket és ezzel egyben a számunkra lényeges környezeti változókat, illetve már telepített technológiai adottságokat a korábban elvégzett napelem elhelyezési kutatások eredményei alapján választottuk ki. Összesítve a kutatások eredményeit hat változót azonosítottunk be, amelyek egy napelem telephely jóságbecslésének megállapításához elengedhetetlenek, úgymint a közvetlen normalizált besugárzás, az átlagos levegő hőmérséklet, a tengerszint feletti magasság, az elektromos állomásoktól mért távolság, a magasfeszültségű távvezetésektől mért távolság és az alacsonyfeszültségű távvezetésektől mért távolság.



4. ábra. Magyarország felett ábrázolt adatkészletek vizualizációja.

Ahogy azt már a 3.2. pontban láthattuk, a tengerszint feletti magassági adatainkból további fontos tulajdonságokat tudunk származtatni, amelyek jelentősen befolyásolhatják a napelemek elhelyezését, illetve azok működési hatékonyságát:



5. ábra. Magyarország felett ábrázolt adatkészletek vizualizációja.

3.4. A JÓSÁGBECSLÉS MEGVALÓSÍTÁSA

A napelem telephelyek elhelyezése jóságának becséléséhez a figyelembe vett változók alábbiak szerint számított súlyozott átlagát vettük modellünk kiindulási alapjául:

$$P = 48.077V_{DNI} + 26.923V_{TEMP} + 9.615V_{HVL} + 2.884V_{LVL} + 2.884V_{SUBS} - 9.615V_{ELE}$$

A képletben szereplő rövidítések közül a V_{DNI} a közvetlen normalizált besugárzást, a V_{TEMP} az átlagos levegő hőmérsékletet, a V_{HVL} a magasfeszültségű távvezetésektől való távolságot, a V_{LVL} az alacsonyfeszültségű távvezetésektől való távolságot, a V_{SUBS} az elektromos állomásoktól mért távolságot és a V_{ELE} a tengerszint feletti magasságot jelenti. Ezen súlyozott átlag képletéből láthatjuk, hogy változóink nagyrésze pozitívan befolyásoló tényező, mint például a besugárzás mértéke vagy az átlagos hőmérséklet. Azonban ezzel ellentétesen a tengerszint feletti magasság negatívan befolyásoló tényező, mivel magasan fekvő területeken a napelem telephelyek kiépítési munkálatai jelentősen több tervezést és erőforrást igényelnek. Érdekes még megjegyeznünk, hogy bár egyszerű heurisztika mentén az áramszolgáltatás infrastruktúra távolsága is negatívan befolyásoló tényező lehet, azonban a súlyozott átlag képletében pozitív tényezőként van jelen. Ez abból következik, hogy az infrastruktúra távolsági változóinkat úgy definiáltuk, hogy csak egy bizonyos távolságon belül legyen lényeges az adott távvezeték vagy állomás. Természetesen a pozitív befolyás arányosan nő, ahogy közeledünk az adott infrastruktúra elemhez.

Megállapítható, hogy a modellben a korábban leírt földfelszínre vonatkozó származtatott értékek, mint az adott földterület lejtése és annak irányultsága nem része a súlyozott átlagunknak. Ennek feloldására a tengerszint feletti magasság értékeket lecseréltük egy összetett területi adottság változóra, melyet az alábbiak alapján származtattunk:

$$V_{TER} = 1 - (V_{SL} \times 2|0.5 - V_{ASP}|),$$

ahol a V_{SL} a terület lejtését, a V_{ASP} a terület irányultságát jelenti.

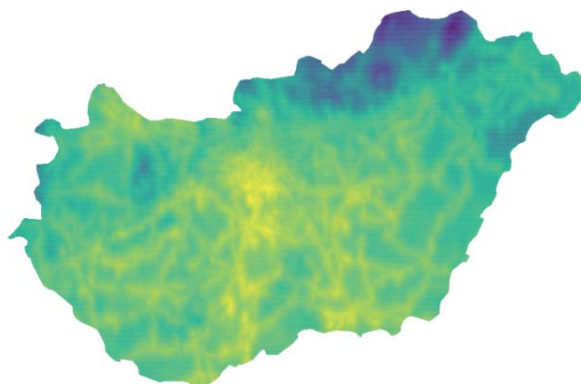


6. ábra. Magyarország térképén ábrázolt összetett területi adottság változó

Láthatjuk a 6. ábra alapján, hogy az új származtatott változó a magassági értékekkel ellentétben pozitívan befolyásoló tényező számunkra, így a következő szerint változik a korábbi súlyozott átlagunk képlete:

$$P = 48.077V_{DNI} + 26.923V_{TEMP} + 9.615V_{HVL} + 2.884V_{LVL} + 2.884V_{SUBS} + 9.615V_{TER}$$

Ezen képletből származtatott jóság értékek vizualizációjával a 7. ábrán a korábban bemutatott tényezők alapján kapott eredmények láthatóak, ahol a citromsárga közeli színek jelzik a legkedvezőbb napelem telepítési helyszíneket.



7. ábra. Végso becsült napelem telephely elhelyezkedés jóság értékek különböző megjelenítési színskálákkal

3.6. A FELHASZNÁLT TECHNOLÓGIA BEMUTATÁSA

A napelem telephely elhelyezés jóságbecslésének teljes folyamata a Microsoft Azure felhőszolgáltatásai segítségével lett végrehajtva. A felhőszolgáltatások használatának előnye a számítógépes erőforrások – például az adattároláshoz szükséges tárhely és a feldolgozáshoz szükséges számítási teljesítmény – igény szerinti, azonnali rendelkezésre állása, valamint a használattal arányos költségvonzata. Ebben a szakaszban ezen szolgáltatásokat mutatjuk be végig haladva az elemzésünk egyes lépésein.

Az első feladatunk a nyers adatok tárolása volt, melyre Azure Data Lake Storage technológiát választottunk. Az Azure Data Lake szolgáltatás fő célja, hogy megkönnyítse a fejlesztők, az adatszakértők és az elemzők számára a tetszőleges méretű és hierarchiájú, valamint tetszőleges típusú adatfeldolgozást, és hogy elemzést tegyen lehetővé. Emiatt kiváló választás az adataink tárolására, azok rendkívül heterogén struktúrája és rendezettsége miatt. Emellett nagy előnye még ezen szolgáltatásnak, hogy jól integrálható mind az általunk előfeldolgozásra használt Azure Databricks és a modell felállítására alkalmas Azure Machine Learning szolgáltatásokkal.

A nyers adatok 1.62 GB tárhelyet foglalnak, melyek nagy része vagy CSV vagy valamely ágazat-specifikus fájlformátumban elérhető számunkra.

Az adatelőkészítést a már említett Azure Databricks szolgáltatáson végeztük el, mely alapvetően Notebook alapú fejlesztést tesz lehetővé, így egy-egy Notebook-ban Python, Scala és SQL szkriptrészek is elhelyezkedhetnek. Konkrét munkafolyamatok kialakítására is lehetőségünk van például Notebook-ok egymás utáni láncolásával vagy meghívásával, ezáltal egy összetettebb, akár többlépcsős munkafolyamat kialakítását is lehetővé téve. Ezen felül az Azure DataBricks támogatja a CI/CD elvet is, melynek során Azure DevOps szolgáltatás használatával lehet a különféle szkriptek közti

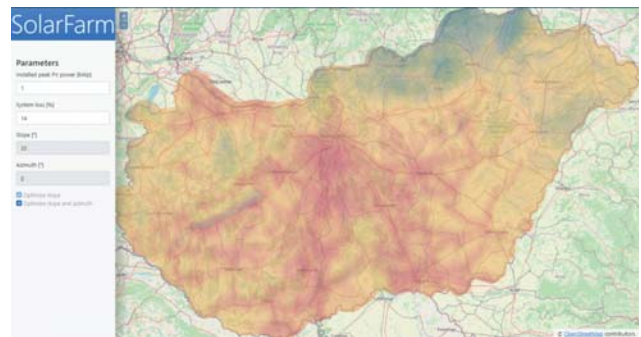
kapcsolatokat és a pontos futtatási folyamatokat definiálni. Az előkészített adathalmazokat szintén az Azure Data Lake szolgáltatás segítségével tároltuk és a későbbi feldolgozást egyszerűsítő CSV formátumba exportáltuk, amely a felskálázásnak és a jelentős strukturális átszervezésnek köszönhetően már 32.5 GB méretűre növekedett.

A jóságbecslést, az Azure Machine Learning Studio felületén keresztül valósítottuk meg. Az Azure Machine Learning szolgáltatásai sok lehetőséget adnak komplex adatfeldolgozási rendszerek létrehozására. Segítségével képesek vagyunk akár bonyolult egyedi modellek előállítására, tanítására, a folyamat végén a betanított modell kiértékelésére, majd exportálására olyan formátumban, amely könnyedén üzembe helyezhető akár egy éles rendszer részeként. Jelen fejlesztés esetében egy 4 virtuális processzormaggal, 28GB RAM memóriával rendelkező virtuális gépet használtunk az Azure Machine Learning hátterében, melynek segítségével nagyjából tíz perces nagyságrendű futási időket kaptunk.

A vizualizáció fejlesztése során több technikát és kereskedelmi szoftvert is kipróbáltunk, azonban végül egy saját fejlesztésű, OpenStreetMap-en alapuló megjelenítés használata mellett döntöttünk. Ennek oka, hogy a kereskedelmi vizualizációs szoftverek számos olyan limitációval rendelkeznek (például a megjeleníthető adatpontokra vonatkozóan), amelyek megakadályozzák a predikciók hatékony megjelenítését, valamint így vált lehetőségünk arra, hogy az összes szükséges funkciót implementáljuk.

4. AZ EREDMÉNYEK MEGVITATÁSA

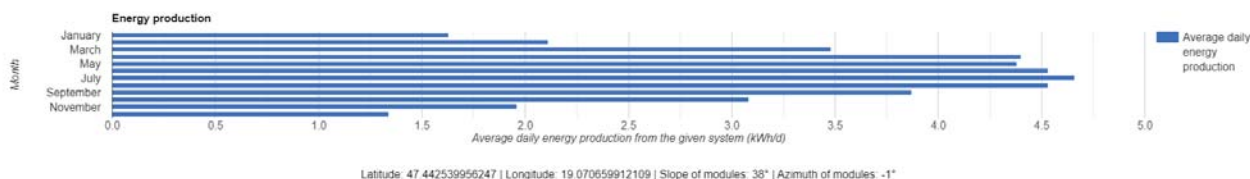
A predikciós modell által előállított eredmény vizualizálásához egy web alapú alkalmazás¹⁸ került kifejlesztésre, melynek fő képernyőjén egy Magyarország területét lefedő, a napelelfarmok telepítésére vonatkozó prediktált jóságértéket mutató hőtérkép látható.



8. ábra. A fejlesztés eredményeképpen elkészült interaktív weboldal nyitó képe.

Ez a felület a színezés segítségével alkalmas arra, hogy áttekintést adjon a felhasználó számára a napelelfarmok elhelyezésére alkalmasabb területekről. A térkép szabadon nagyítható és mozgatható, így a felhasználó számára érdekes területek közelebbről is megvizsgálhatók. Az alkalmazásban a felhasználónak lehetősége van továbbá arra is, hogy a telepítendő napelem-rendszer főbb paramétereit, azaz a rendszer névleges teljesítményét (kilowatt peak, kWp egységben) és a rendszer várható becsült veszteségét százalékban, valamint a panelek dőlésszögét és az azimutális szögét (azaz az Egyenlítőhöz viszonyított vízszintes irányukat) megadja. Az utóbbi két paraméter esetében lehetőség van azok automatikusan történő optimalizálására is a később kiválasztott területhez, amely egy térképi pontra történő kattintással jelölhető ki. Ekkor egy új képernyő nyílik meg, amely a kijelölt helyhez tartozó átlagos napi energiatermelésre ad egy becslést hónapokra lebontva, valamint a dőlésszög és az azimutális szög optimális értékét is megjeleníti, ha a felhasználó ezeket beállította. Ehhez egy, az Európai Bizottság honlapján elérhető szolgáltatás¹ került felhasználásra annak alkalmazásprogramozási interfészén keresztül.

Average daily energy production



9. ábra. A weboldal második lapjának képe.

5. KONKLÚZIÓ

Az Európai Unió korábbi törekvéseivel összhangban, Magyarországnak is egyik kiemelt célja a megújuló energiaforrások alkalmazásának ösztönzése és a fosszilis energiahordozókkal szemben egyre nagyobb arányú jelenlétének támogatása. A zöld energia előállítására már számos technológia rendelkezésre áll, úgymint a szélerőművek, a vízenergia vagy éppen a napelem telepek létesítése. A hazai energiapolitika alapjait meghatározó dokumentumok alapján (Nemzeti Energiastratégia, Nemzeti Energetikai és Klímaterv) egyértelműen látható a kormányzati elköteleződés a megújuló energiaforrások felhasználásának fejlesztése érdekében. A tervek jelentős mennyiségben számolnak PV kapacitások várható telepítésével. A Nemzeti Energiastratégiában definiált (és kiválasztott) PV-központú forgatókönyv 2040-re több mint 10.000 MW napelemes beépített kapacitással tervez. Az energiapolitikai tervezés azonban alapvetően energiapolitikai modellező eszközök alapján készült jövőképet vetít előre (pl.: TIMES modell), amely nem számol a területhasználat, a különböző szempontok szerint korlátozott napelemes beépíthetőség mértékével. A pontosabb jövőkép felvázolása azonban mindenképpen indokolja egy olyan modellező eszköz kifejlesztését, amely a PV kapacitások telepíthetőségével kapcsolatban részletesebb, a területhasználat és egyéb korlátozó tényezőkkel összefüggésbe hozható elemzések elvégzésére is alkalmas. A PV kapacitások telepíthetőségével kapcsolatban kulcsfontosságú, hogy az adott térségben milyen szabad hálózati kapacitások érhetők el. Ezzel kapcsolatban a magyar gyakorlat rendkívül szegényes. Nemcsak az a probléma, hogy a jelenleg publikált térképek lényegében semmilyen érdemi információt nem

tartalmaznak, hanem az is probléma, hogy lényegesen összetettebb a valós hálózati helyzet az egyszerű „nincs szabad kapacitás jelzésnél”. Jelenleg ugyanis egyáltalán nincs szabályozás, illetve nincs egységes gyakorlat arra nézve, hogy a szabad kapacitást egyáltalán hogyan kell kalkulálni. Ráadásul nem csak arról van szó, hogy a szabadon álló PV rendszerek telepíthetőségét szükséges vizsgálni, hanem a házak tetőszerkezete is jelentős szabad felületet képezhet. Ráadásul az energiahatékonysági fejlesztések egyik kifejezett célja a megújuló energia használatának a növelése, amelyet a fenti térképek alapján szintén lehetetlen lenne megvalósítani.

A magyarországi adottságok figyelembevétele során a síkterületek és az alacsony tengerszintbeli változások számos megoldás alkalmazását nem teszik lehetővé vagy legalábbis nem a leghatékonyabb megoldást jelentik. Viszont a napsugárzás, mint potenciális energiahordozó által tárolt energia hasznosításához több befolyásoló tényező is adott és elérhető a Kárpát-medencében. Jelen tanulmány és a hozzá kapcsolódó fejlesztés során arra kerestük a választ, hogy megpróbáljuk meghatározni azokat a kiemelten előnyös elhelyezkedésű területeket Magyarország határain belül, amelyek magas potenciállal bírnak egy jövőbeli beruházás során telepítésre kerülő napelemerőmű vagy éppen háztartási kiserőmű helyszínének kiválasztásánál. Az alkalmazott adatelemzési keretrendszer egy matematikai modellen alapuló jóságértéket becslő megoldás segítségével, a kiszámolt értékek alapján vizualizáció alkalmazásával jelelni meg az eredményeket.

Természetesen az így létrehozott alkalmazás, valamint az annak háttérében lévő predikciós modell számos módon továbbfejleszthető és bővíthető. A jövőbeni fejlesztés iránya elsősorban a végfelhasználó személyétől (kormányzati döntéshozók,

cégek, magánszemélyek) függ. További adatforrások bevonásával, elsősorban a villamosenergia-rendszerre, valamint az egyes magyarországi földterületek minőségére, védettségére és beépíttetésére vonatkozó adatokkal számos további

funkció is implementálhatóvá válhat, mint például az egyes földterületek szűrése, illetve kizárása (helyrajzi szám alapján), vagy a beépíthető tetőfelületek meghatározása és ezek alapján különböző mutatók származtatása.

Jegyzetek

- 1 PVGIS, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (2021. 10. 21.).
- 2 Kohlheb Norbert – Munkácsy Béla – Csanaky Lilla – Meleg Dániel (2015) A megújuló energiaforrások potenciáljai és hasznosításuk Magyarországon, *Kövász*, 19(1-4), 19-50.
- 3 Móczár Gábor – Farkas István (1999) Napenergia hasznosítás, *Ökotáj*, 22. szám, <http://www.okotaj.hu/szamok/22/mas4.html> (2021. 10. 21.).
- 4 Pálffy Miklós (2005) A napenergia fotovillamos hasznosításának potenciálja Magyarországon, *Elektrotechnika*, 98(11), 293, https://www.mee.hu/files/ET/2005/ET_2005_11t.pdf (2021. 10. 21.).
- 5 Munkácsy Béla – Sáfian Fanni – Harmat Ádám – Németh Sándor (2014): Hazai megújuló potenciálok és hasznosításuk jövő-képünkben, In: Munkácsy Béla (szerk.) *A fenntartható energiagazdálkodás felé vezető út. Erre van előre! – Vision 2040 Hungary 2.0* (Budapest: ELTE TTK Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék, Környezeti Nevelési Hálózat Országos Egyesület), 143–152., <http://ktf.elte.hu/wp-content/uploads/2014/09/ERRE-VAN-ELORE-2.0.pdf> (2021. 10. 21.).
- 6 Al Garni, H. Z., Awasthi, A. (2018) Solar PV Power Plants Site Selection: A Review, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 1, 57-75, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2>
- 7 Bocca, A., Chiavazzo, E., Macii, A., Asinari, P. (2015) Solar energy potential assessment: An overview and a fast modeling approach with application to Italy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 291-296, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.138>
- 8 Aran Carrion, J., Espin Estrella, A., Aznar Dols, F., Zamorano Toro, M., Rodriguez, M., Ramos Ridao, A. (2008) Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2358-2380, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.011>
- 9 Georgiou, A., Skarlatos, D. (2016) Optimal site selection for siting a solar park using multi-criteria decision analysis and geographical information systems, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5, 321-332, <https://doi.org/10.5194/gi-5-321-2016>
- 10 Ruiz, P., Nijs, W., Tarvydas, D., Sgobbi, A., Zucker, A., Pilli, R., Jonsson, R., Camia, A., Thiel, C., Hoyer-Klick C., Dalla Longa, F., Kober, T., Badger, J., Volker, P., Elbersen, B. S., Brosowski, A., Thrän, D. (2019) ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials, *Energy Strategy Reviews*, 26, art. no. 100379 <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379>
- 11 Pfeifroth, U., Kothe, S., Trentmann, J., Hollmann, R., Fuchs, P., Kaiser, J., Werscheck, M. (2019) Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01
- 12 Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017), Climate data for the European energy sector from 1979 to 2016 derived from ERA-Interim, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-european-energy-sector> (2020. 11. 19.).
- 13 OpenStreetMap contributors, 2020, Planet dump retrieved from HYPERLINK, <https://planet.osm.org> (2020. 11. 30.).
- 14 NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global, Distributed by OpenTopography, (2013), <https://doi.org/10.5069/G9445JDF> (2020. 11. 27.).
- 15 GDAL/OGR contributors (2021), GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library, Open Source Geospatial Foundation, <https://gdal.org> (2021. 10. 21.).
- 16 <https://richdem.readthedocs.io/en/latest/index.html> (2021. 10. 21.).
- 17 Horn, B. K., Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE
- 18 <https://navu-solarfarm.netlify.app/> (2021. 10. 21.).