

A DOMBORZAT ÉS AZ ÉRDESSÉG ÁRAMLÁSMÓDOSÍTÓ HATÁSÁNAK SZÉLENERGETIKAI SZEMPONTÚ ELEMZÉSE

Bartholy Judit¹ és Radics Kornélia²

¹ELTE, Meteorológiai Tanszék, 1518 Budapest, Pf. 32.

²MH Meteorológiai Szolgálat, 1135 Budapest, Lehel út 33-35

e-mail: bari@ludens.elte.hu, kornelia.radics@mil.hu

1. Bevezetés

A hagyományos energiakészletek csökkenésével és a légkör szén-dioxid tartalmának jelentős növekedésével napjainkban egyre nagyobb szerephez jutnak a „kifogyhatatlanul” rendelkezésre álló ún. megújuló energiaforrások. E lehetséges alternatív energiaforrások egyike a szél.

A többezer éves hagyományokkal rendelkező szélenergia-hasznosítás látszólag végnapjait élte a XX. század közepe táján, hiszen nem volt jelentős energiahiány a Föld fejlett országaiban. A szélenergia ekkor relatíve drága, gyenge hatásfokú és csak időszakosan kinyerhető erőforrásnak számított. Ezért a fosszilis tüzelőanyagok, valamint az atomenergia átmenetileg háttérbe szorította a szélenergia hasznosítását (Bartholy és Radics, 2002). Az 1970-es évek sokkoló olajválsága, majd a rákövetkező évtizedekben a globális melegedés problémája azonban újra a szél – mint megújuló energiaforrás – felé fordította a kutatók, a fejlesztők és a közvélemény figyelmét. Eddig soha nem tapasztalt ütemű fejlődés indult meg, s önálló iparággá nőtte ki magát a mind hatékonyabb szélerőművek tervezése, gyártása, karbantartása.

Az elmúlt évtizedben minden eddiginél nagyobb mértékben megnőtt, 1997 és 2002 között pedig megnégyszereződött a hasznosított szélenergia mennyisége Európában és az egész világon egyaránt (AWEA-EWEA, 2003). A hatékony szélparkok által termelt energia előállításának költsége az elmúlt években olyan szintre csökkent, hogy napjainkban már versenyképes számos hagyományos energiahordozóval, és olcsóbb, mint az atomenergia.

Az Európai Unió 1997-ben kiadta a megújuló energiaforrásokról szóló ún. fehér könyvét. A könyv ajánlása szerint 2010-re a Közösség országaiban 12 százalékra kell növelni a megújuló energiaforrások arányát. Az Európai Unióban megfogalmazott elvárásoknak megfelelően az elmúlt években a hazai energiapolitika is támogatja a megújuló energiaforrások hasznosítását (Bohoczky, 2001).

A villamos energia termelését célzó szélenergia-hasznosítás 2000-ben még nem volt jelen hazánkban. A XX. század végéig a szélenergia hasznosítása csak olyan kisteljesítményű szélkonverterek alkalmazásával jöhetett szóba Magyarországon, amelyek vízszivattyúkat, áramfejlesztőket, vízszellőztető berendezéseket működtettek. Az utóbbi években végzett

kistérségű vizsgálatok (Tóth *et al.*, 2000; Kajor és Kovács, 2001) azonban igazolták, hogy hazánk megfelelően kiválasztott térségeiben is lehetséges nagyteljesítményű, villamos energiát termelő szélerőműveket telepíteni. A közel egy évtizede elindult szélenergetikai vizsgálatok első eredményeit az Európai szélatlasz (Troen és Petersen, 1989) mintájára készített Közép-európai országok szélatlasza (Dobesch és Kury, 1997) közli. Azonban a szélerőművek optimális elhelyezését szolgáló, megfelelő felbontású európai széltérképek – még napjainkban is – Magyarország külső határainál véget érnek. Az előadás során bemutatott kutatás fő célja ezért az európai ajánlásoknak megfelelő hazai szélenergetikai vizsgálatok elkészítése, hazánk szélenergia térképének megrajzolása volt.

2. Az alkalmazott vizsgálati módszerek

Kutatásaink kezdeti szakaszában a korábbi klimatológiai elemzések (Bacsó *et al.*, 1953; Bacsó, 1959; Kakas, 1967; Nemzeti atlasz, 1989; Tar, 1991) felhasználásával hazánk különböző régióinak ún. rendelkezésre álló szélteljesítményét becsültük. Az Európai szélatlással megegyező módszertant alkalmazva, 29 magyarországi meteorológiai állomás legfrissebb, hat – néhány esetben öt – éves időszora alapján elkészítettük hazánk szélatlaszát (Radics, 2004), s elemeztük az energetikai szempontból lényeges jellemzőket.

A hegyhátsági toronymérés (Haszpra *et al.*, 2001; Barcza, 2001) nyolc éves (1995-2002), négy szinten (10 m-en, 48 m-en, 82 m-en és 115 m-en) mért széladatainak felhasználásával elemeztük a vertikális szélprofil szerkezetét (Radics és Bartholy, 2002a; Bartholy *et al.*, 2003), valamint az empirikus szélprofil-formulák különböző hibáinak és a légköri stabilitási viszonyoknak a kapcsolatát (Radics, 2004).

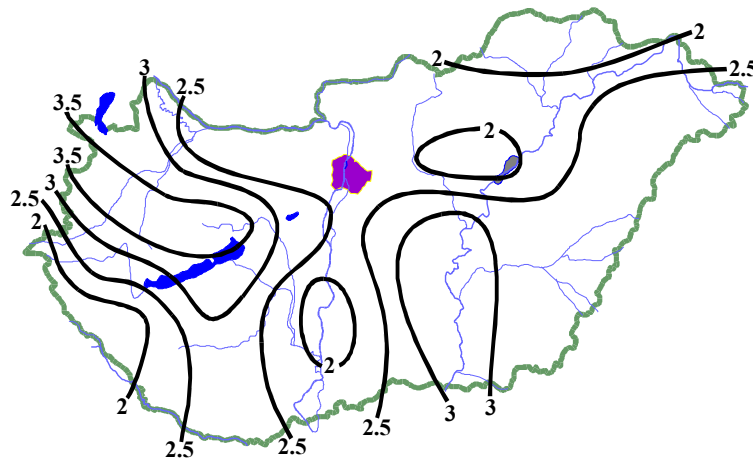
A domborzat és az érdesség áramlásmódosító hatásának vizsgálatára a dán fejlesztésű Wind Atlas Analysis and Application Programot (WAsP-ot) alkalmaztuk. A WAsP a mért széladatok horizontális és vertikális extrapolációjára szolgáló, Jackson és Hunt elméletére alapozott, lineáris, spektrális modell (Mortensen *et al.*, 1993), melynek felhasználásával készült az Európai szélatlasz is. Svédországi mérési adatsorok felhasználásával feltártuk a WAsP modellezési korlátjait (Bartholy és Radics, 2000; 2001), majd a hegyhátsági széladatok segítségével igazoltuk a WAsP modell hazai adaptálhatóságát. Így lehetőség nyílt a modellezési eredmények verifikálására. A széladatok horizontális és vertikális extrapolációját esettanulmányok során végeztük el (Radics és Bartholy, 2002b), továbbá a domborzat és az érdesség áramlásmódosító hatását elemeztük azzal a céllal, hogy feltárjuk a rendelkezésre álló szélteljesítmény-mező legfontosabb sajátosságait.

A kutatás befejező részében az ország egész területére – a WAsP modell és a digitális terepmodellek alkalmazásával – modelleztük az átlagos szélesebséget és rendelkezésre álló szélteljesítményt ábrázoló térképeket (Radics, 2004). A térképsorozat felhasználásával lehetőségünk nyílt Magyarország szélenergia-készletének részletes felmérésére és az ország szélenergia hasznosíthatóság szempontjából történő regionalizálására.

3. Eredmények, következtetések

Előadásunk során az európai ajánlásoknak megfelelő hazai szélenergetikai vizsgálatainkat mutattuk be. Eredményeinket összefoglalva az alábbi legfontosabb következtetéseket vonhatjuk le.

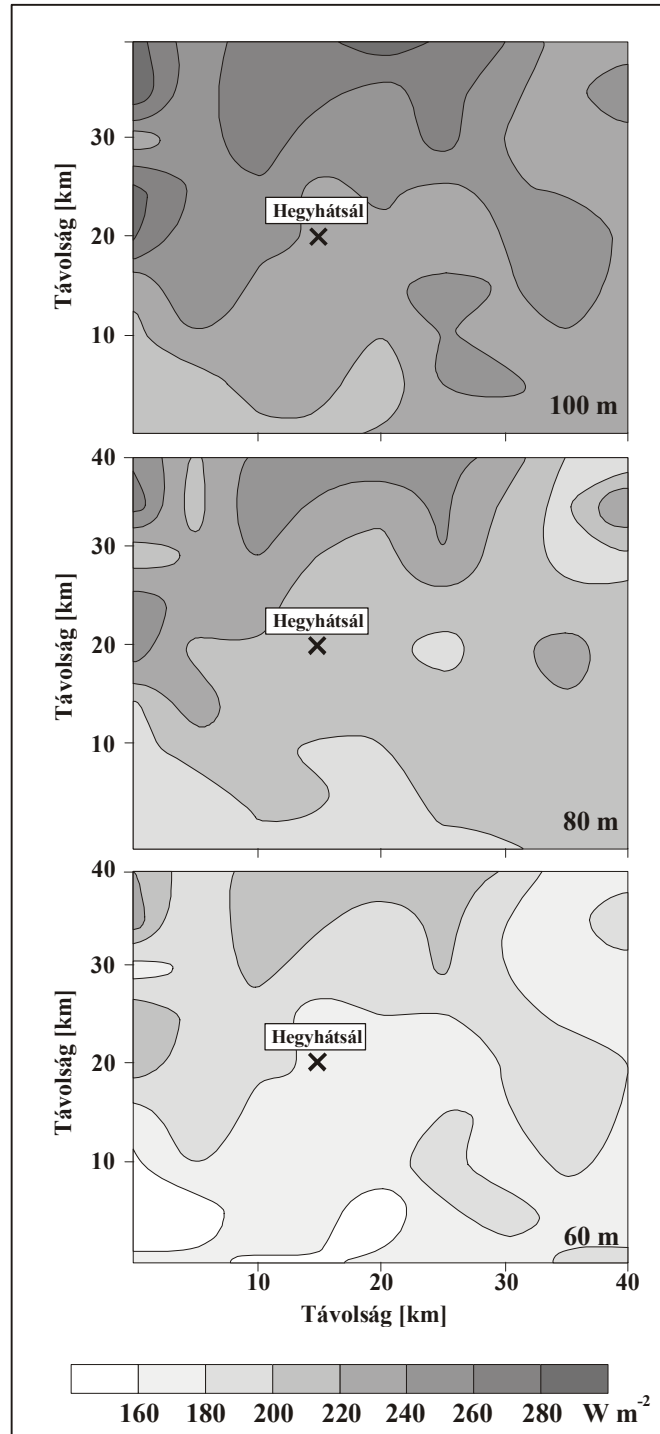
- A korábbi szélklimatológiai vizsgálatok eredményeit összevetve nem mutatható ki hazánk szélklimájának alapvető megváltozása az elmúlt évszázad során, annak ellenére, hogy kisebb térségek rövidebb idősorait is megvizsgálva esetenként szignifikáns trend jelenik meg (Tar et al., 2001).
- 29 magyarországi meteorológiai állomás minimum öt éves, 10 m-es magasságra korrigált széladatsora alapján az éves átlagos szélesség $1,47 \text{ m s}^{-1}$ (Jósvafő) és $4,05 \text{ m s}^{-1}$ (Szentkirályszabadja) között változik (1. ábra). Így az európai szélosztályozás alapján hazánk a mérsékelt szél kategóriába sorolható.



1. ábra. A 10 m-re interpolált szélességi értékek [m s^{-1}] éves átlagának területi eloszlása Magyarországon.

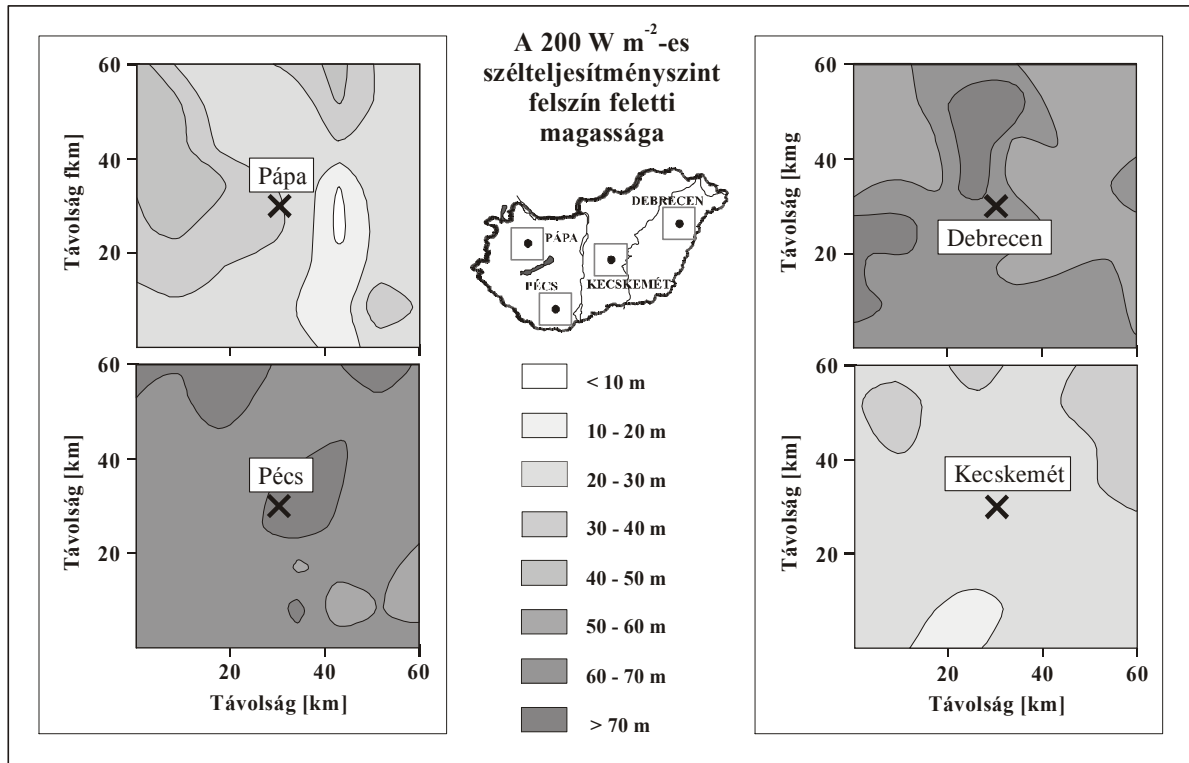
- A szélesség és köbös átlagai határozott évi és napi menetet mutatnak. A szélesség napi és évi változékonyságának mértéke átlagosan $1-2 \text{ m s}^{-1}$. A köbös átlagok évi és napi menete még sokkal határozottabb. Éves amplitúdójuk sok esetben eléri a $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-3}$ -ot, míg a napi változékonyság mértéke akár $150-200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-3}$ is lehet.
- A Dunántúlon és a középső országrészben az északi és északnyugati szelek, míg a keleti országrészben az északi és északkeleti szelek a leggyakoribbak. Az uralkodó szélirány relatív gyakorisága alacsony, 11,5 % (Miskolc) és 25,4 % (Szentkirályszabadja) közé esik. A szélcsendes időszakok aránya néhány térségben kifejezetten magas értéket vesz fel; átlagosan 1,39 % (Kékestető, 25,07 m-en) és 23,2 % (Jósvafő, 9,99 m-en) között változik.
- Az $1-3 \text{ m s}^{-1}$ -os sebességű szelek átlagos éves tartama a legnagyobb (1500-3000 óra), azaz a gyenge szelek a legjellemzőbbek országunkra. A legnagyobb átlagos éves energiát a $4-9 \text{ m s}^{-1}$ -os szelek hordozzák (átlagosan 20-120 kWh m^{-2}).
- A szélesség havi anomáliái általában 1 m s^{-1} -on belül maradnak, azaz szélklimánk az egész év során kiegyenlítettnek mondható.

- A hegyhátsáli toronymérés alapján a legszelesebb (március) és a legkevésbé szeles (október) hónapokban vizsgáltuk a szélesebesség relatív gyakorisági értékeit az egyes mérési magasságokban. Bár a tavaszi hónapok lényegesen nagyobb szélenergia-kinccsel rendelkeznek, nem találtunk szignifikáns különbséget a márciusi és októberi szélesebesség eloszlások között a magasabb szinteken. A magasság és a szélesebesség növekedésével mind a szélcsendes időszakok száma, mind a relatív gyakorisági értékek szórása csökken.
- A vertikális szélprofil jellemzésére használt formulákkal nem találtunk jelentős különbséget a hegyhátsáli mérések teljes adatsorára, valamint a stabilis és labilis esetekre számított szélesebességi értékek három különböző szintre meghatározott hibája között. Mind a teljes adatsorra, mind a labilis esetekre a felhasznált profilegeyenletek alulbecsülik a magasabb szinteken uralkodó szélesebességi értékeket. Ezzel ellentétben, stabilis légköri viszonyok esetén a valóságban alacsonyabb szélesebességek fordulnak elő 82 m-en és 115 m-en, mint az a leggyakrabban alkalmazott szélprofil-formulák segítségével számítható.
- A topográfia és a modellezett átlagos szélesebességi értékek jó egyezést mutatnak a rendelkezésre álló szélteljesítmény-mezővel. Még kis horizontális távolságok (5-10 km) esetén is lényeges különbségek ($60-80 \text{ W m}^{-2}$) mutatkozhatnak a rendelkezésre álló szélteljesítmény mennyiségében a domborzati különbségek, illetve az érdességi viszonyok függvényében (2. ábra).
- Magyarországon az átlagos szélesebesség és rendelkezésre álló szélteljesítmény nagy térbeli változékonyságot mutat. Különösen a hegyvidéki területeken találunk kis távolságon belül jelentős eltéréseket. 120 m-es magasságban a modellezett átlagos szélesebesség átlagosan közel másfélszerese, a modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény pedig több mint háromszorosa a 10 m-re számított értéknek. A felszín feletti magasság növekedésével a leginkább és legkevésbé szeles vidékek szélenergia-viszonyai közti különbség egyre nő.
- Egy megfelelően kiválasztott szélteljesítmény-szint felszín feletti magasságát ábrázoló, ún. háromdimenziós diagramok (3. ábra) nélkülözhetetlen segítséget nyújthatnak a tervezett szélerőművek optimális helyszínének kiválasztásában.
- A szélenergia hasznosítására leginkább alkalmas térség Magyarországon az északnyugati országrész, de a délkeleti területek is jelentős szélenergia-kinccsel rendelkeznek. Az ország regionális szélenergia-viszonyainak tanulmányozása, elemzése a WAsP felhasználásával modellezett finom felbontású széltérképek (Radics, 2004) segítségével végezhető el, melyek különböző szinteken ábrázolják az átlagos szélviszonyokat és a rendelkezésre álló szélteljesítmény mennyiségét.



2. ábra. A rendelkezésre álló széltejesítmény-mező horizontális szerkezete
Hegyhátsál 40 × 40 km-es körzetében, 60, 80 és 100 m-es magasságban.

Kutatásaink összegzéseként levonható tehát az a legfontosabb következtetés, hogy Magyarországnak van kinyerhető szélenergia-kincse, amit elődeink a kor technológiai szintjének megfelelően ki is használtak. A szélenergiának – mint megújuló energiaforrásnak – a napenergia, a vízi energia és a biomasszából nyert energia hasznosítása mellett Magyarországon is fontos szerepe lehet a jövőben.



3. ábra. A 200 W m^{-2} -es rendelkezésre álló szélteljesítményszint felszín feletti magassága Debrecen, Kecskemét, Pécs és Pécs $60 \times 60 \text{ km}$ -es körzetében.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki az Uppsalai Egyetem Meteorológiai Tanszékén működő MOWIE projektnek a svédországi expedíciós szélmérési eredményekért és a WASP modell használatának lehetőségéért. Hálásan köszönjük a Magyar Honvédség Meteorológiai Szolgálatának a szinoptikus meteorológiai állomások széladatsorát. Köszönet Dr. Weidinger Tamásnak (ELTE, Meteorológiai Tanszék) a digitális terepmodellek használatának lehetőségéért, Dr. Haszpra Lászlónak (Országos Meteorológiai Szolgálat) és Dr. Barcza Zoltánnak (ELTE, Meteorológiai Tanszék) a hegyhátsági profilmérések és a stabilitási paraméterek idősoráért. A szinoptikus meteorológiai állomások automatizálásának időpontjait és a szélmérő műszerek mérési magasságát Wantuchné Dr. Dobi Ildikó (Országos Meteorológiai Szolgálat) bocsátotta rendelkezésünkre. Külön köszönet érte.

Az elvégzett kutatásokat részlegesen az alábbi pályázatok támogatták: OTKA T-015717, T-023811, T-025803, T-026629, T-034867, T-038423, NKFP-3A/0006/2002 számú programjai, valamint az EU5-ös keretprogramon belül futó AEROCARB és CHIOTTO projektek (EVK2-CT-1999/0013).

Felhasznált irodalom

- AWEA-EWEA – American Wind Energy Association és European Wind Energy Association (2003): *Record growth for global wind power in 2002*. Press Release, March 3, 2003, Washington DC, 3p.
- Bacsó N., Kakas J. és Takács L. (1953): *Magyarország éghajlata*. OMI kiadványa, XVII. Kötet, Budapest, 225p.
- Bacsó N. (1959): *Magyarország éghajlata*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 302p.
- Barcza Z. (2001): Long term atmosphere/biosphere exchange of CO₂ in Hungary. *Doktori disszertáció*, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 116p.
- Bartholy J. és Radics K. (2000): A szélenergia hasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 14, Budapest, 80p.
- Bartholy J. és Radics K. (2001): Selected wind characteristics and potential use of wind energy in Hungary. Part I. *Időjárás* 105, 109-126.
- Bartholy J. és Radics K. (2002): A szélenergia hasznosításának története. *Léggör*, XLVII/2, 30-34.
- Bartholy J., Radics K. és Bohoczky F. (2003): Present state of wind energy utilisation in Hungary: policy, wind climate, and modelling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7, 175-186.
- Bohoczky F. (2001): Az energiapolitika és a megújuló energiaforrások. In: *A légköri energiaforrások hasznosításának meteorológiai alapjai* (szerk.: Mika J.), a Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, OMSZ, Budapest, 15-20.
- Dobesch, H. és Kury, G. eds. (1997): *Wind Atlas for the Central European Countries of Austria, Croatia, Czech Republic, Hungary, Slovak Republic, and Slovenia*. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 16, ZAMG, Wien, 105p.
- Haszpra L., Barcza Z., Bakwin, PS., Berger, BW., Davis, KJ. és Weidinger T. (2001): Measuring system for the long-term monitoring of biosphere/atmosphere exchange of carbon dioxide. *J. Geophys. Res.* 106(D3), 3057-3070.
- Kajor B. és Kovács T. (2001): Az inotai szélérőmű projekt eddigi tapasztalatai, eredményei. In: *A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai* (szerk.: Mika J.), a Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, OMSZ, Budapest, 149-157.
- Kakas J. ed. (1967): *Magyarország klímaatlasza*, II. rész. Adatbázis. Akadémiai Kiadó, Budapest, 263p.
- Mortensen, N.G., Landsberg, L., Troen, I. és Petersen, E.L. (1993): *Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP)*. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 126p.
- Nemzeti atlasz (1989): *Magyarország nemzeti atlasza* (szerk.: Pécsi M.). Kartográfiai Vállalat, Budapest, 395p.

- Radics K. és Bartholy J. (2002a): Selected wind characteristics and potential use of wind energy in Hungary. Part II. *Időjárás* 106, 59-74.
- Radics K. és Bartholy J. (2002b): Estimation of climate effects of land use changes with simple wind models. *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 1073-1076.
- Radics K. (2004): A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája, a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése. Doktori értekezés, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 139p.
- Tar K. (1991): Magyarország szélklímájának komplett statisztikai elemzése. *OMSZ Kisebbségi Kiadványai* 67, Budapest, 124p.
- Tar K., Makra L., Horváth Sz. és Kircsi A. (2001): Temporal change of some statistical characteristics of wind speed over the Great Hungarian Plain. *Theor. Appl. Climatol.* 69, 69-79.
- Tóth. G., Horváth G. és Tóth L. (2000): Energetikai célú szélmérés és széltérkép készítése. In: *Szélenergia Konferencia Előadásai* (szerk.: Horváth G.). Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület, Gödöllő, 81-87.
- Troen, I. és Petersen, L. (1989): *European Wind Atlas*. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 656p.