



# **A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁS KLIMATOLÓGIAI VONATKOZÁSAI**

**DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS**

## **CLIMATOLOGICAL ASPECTS OF UTILIZATION OF WIND ENERGY**

**PHD THESIS**

**BÍRÓNÉ KIRCSI ANDREA**

**Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék  
Természettudományi Doktori Tanács  
Földtudományi Doktori Iskola  
Debrecen, 2008**

## BEVEZETÉS, A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

A szélenergia hasznosításának növelése az Európai Unióban, illetve a világ sok országában elsődleges prioritást élvez, hiszen az országok energiapolitikájában kulcskérdéssé vált a klímaváltozás elleni küzdelem. Számos országban az ingyen rendelkezésre álló szélenergia-potenciált az energiaellátás biztonsága érdekében alkalmazzák. A szélenergia jövőbeli fejlődéséhez nélkülözhetetlenül szükség van a szél energiájának térben, illetve időben történő rendelkezésre állásának vizsgálatára, illetve a szélenergia potenciál olyan jellegzetességeinek ismeretére, amelyek a szélenergia-átvitel villamosenergia-rendszerbe történő illesztését segíthetik anélkül, hogy az ellátás biztonságát fenyegetnék.

Az értekezés célja az, hogy bemutassa a klimatológia azon területét, amely a légmozgások tulajdonságait vizsgálja kifejezetten a szél energetikai hasznosítása szempontjából. A kutatás során arra törekedtünk, hogy a Magyarországon rendelkezésre álló szélenergia-potenciál jellegzetességeit az északi negyed gömb más térségeinek szélviszonyaival összehasonlítva mutassuk be annak érdekében, hogy segítsük a hazai szélenergia hasznosítás fejlődését. A szélklímára vonatkozó információk a szélenergia-hasznosításban érintettek (beruházók, villamosenergia-rendszer irányítója, mérlegkör felelősök, villamos energiafogyasztók) végső soron súlyos pénzügyi-gazdasági döntéseit tehetik megalapozottakká.

A vizsgálataink a következő főbb területekre irányulnak:

- A XXI. század első évtizedére Európában, és általában a világon rendkívül gyorsan és ígéretesen fejlődő terület a megújuló energiaforrások, ezen belül a szélenergia hasznosítása. Bemutatjuk, hogy hol tart ma a fejlődés és milyen tervek készülnek a jövőre vonatkozóan. Rögzítjük a szél hasznosításának elméleti alapjait: a szél keletkezésének feltételeit, az áramlási mező karakterisztikáit, a befolyásoló tényezőket, a szél energiájának leírásának módozatait, a hasznosíthatóság törvényszerűségeit. Röviden bemutatjuk milyen kutatási eredmények ismertek a szélklimatológia terén a Földön, az EU-ban, különös tekintettel hazánkra.
- Nagy területi felbontással, 50 éves időtávra vonatkoztatva vizsgáljuk a légmozgás tulajdonságainak alakulását az északi negyedgömbön az NCEP / NCAR reanalízis modell 1956-2005 közötti homogén napi, havi és éves adatsorai alapján.
- Magyarországi SODAR mérések adatait felhasználva arra a kérdésre kerestük választ, hogy hogyan változnak a magassággal a szél tulajdonságai, milyen tényezők befolyásolják a szélprofilok irányfüggését az adott megfigyelőhelyeken, illetve hogyan változik a szélesség napi menete különböző magasságban összefüggésben a magyar villamosenergia-rendszer átlagos terhelésével.

Végeredményben munkánk legfontosabb célja, hogy szélklimatológiai információkkal elősegítsük a szél energiájának hasznosítását rövid-, közép-, és hosszú távon.

## **ANYAG ÉS MÓDSZER**

A nagytérségű szélklimatológiai vizsgálatokhoz használt adatbázisunk a NCEP / NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) reanalízis projekt 1956-2005 közötti 50 éves  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  felbontású északi negyedgömbre vonatkozó meridionális és zonális szélvektorok napi adatsora volt, melyet kiegészítettünk a 2006-os mérési sorral. Az u és v szélvektorok a reanalízis előállításához használt modell legszűkebb, ún. 995 szigma szintre vonatkoznak. Ez a szint domborzatkövető, azaz orográfiai viszonyoktól függetlenül a talaj felszíne felett kb. 80 m magasság szélviszonyairól tájékoztat. A modell horizontális felbontása T62, azaz  $2.5^\circ$  meridionális és zonális irányban. Ez a Föld gömb alakjából következően az Egyenlítő felé egyre nagyobb területű grideket jelent, amelyek meridionális irányú oldalai kb. 280 km hosszúak. A reanalízis modell területi felbontása nem túl részletes, azonban az egész földgömbre vonatkozik. Másik előnye, hogy a modell 1948-tól napjainkig biztosít egységes módszerrel készített homogén adatsort, ismert rácshálózatra a légkör szinte minden paraméteréről 28 magassági szintben.

A amerikai NCEP / NCAR reanalízist azért választottuk, mert zárt rendszeren kívül is hozzáférhető, illetve naponta operatíván frissül. A napi u és v szélvektorokat évenként egy 73 oszlopból és  $37 \times 365$  sorból álló mátrixban töltöttük le a Climate Research Unit (CRU) adatbázisából. Adataink a nyugati és keleti hosszúság  $-90^\circ$  és  $90^\circ$  közötti, illetve az Északi-sark és az Egyenlítő közötti területre, összesen 2701 gridre vonatkozik. A felbontás léptéke miatt az egész északi negyedgömböt elemeztük, így hazánkon kívül a teljes európai kontinens és tágabb környezetének szélklímája összefüggéseiben tárgyalható és áttekinthető.

A szélklimatológiai elemzéshez a (u, v) szélvektor komponensekből vektorszámítás szabályai szerint számított szélesség adatokat használtuk fel. A napi adatsorokból állítottunk elő havi, évszakos, éves és sokéves átlagokat, melyeket felhasználva számítottunk különböző időskálán értelmezett szélindexeket. A szélindex (%) minden esetben úgy állítható elő, hogy az adott időpontban megfigyelt értéket egy sokéves átlaghoz viszonyítjuk.

Az 1956-2005 közötti 50 év idősorának vizsgálatához regresszió-analízist végeztünk. Az idősorra illesztett lineáris trendegyenes meredekségének (b) nullától való eltérését t-próbára visszavezetett vizsgálattal ellenőriztük. Az

északi negyedgömb mind a 2701 gridjének időbeli változékonyságának jellemzéséhez használtuk a variációs együtthatót, amely a minta szórását a minta átlagához viszonyítva jellemezi.

Az NCEP / NCAR reanalízisból származó, 1956-2005 időszakra vonatkozó nagy mennyiségű adat optimális kezeléséhez egy saját fejlesztésű Delphi nyelven írott programot, a "SZEL"-t használtuk, melyet Nagy Tibor programozó készített. Az adatok feldolgozását (SPSS, Statistica, Excel) illetve térinformatikai programok (GeoMedia 5.1 Professional) segítségével végeztük. A szöveg tördelését LyX 1.5.3 verziójú LaTeX for Windows szövegszerkesztő programmal, az irodalomjegyzéket Java környezetben futó JabRef 2.3b verziójú programmal készítettük.

Magyarország nap és szélenergia potenciálját felmérő kutatás keretében kiemelt szerepet kapott a szél magassággal történő változásának részletes tanulmányozása. Az Országos Meteorológiai Szolgálat a kutatási cél megvalósítása érdekében egy közepes teljesítményű SODAR (SONIC Detection And Ranging) berendezést szerzett be. A SODAR olyan távérzékelési eszköz, amely a földfelszínről képes közvetlen szélprofil mérést végezni a légkör legalsó néhány 100 méteres régiójában. Ez a mérőeszköz egy adott helyszínen akár 20 különböző magassági szintben 30-315 m magasság között operatíván közvetlenül méri a légmozgás tulajdonságait.

A SODAR megfigyelések Magyarországon expedíció jellegűek voltak, melyet 2003 és 2004 folyamán végeztek. Budapest adatsora 2003. április 1. és június 30. közötti nyár eleji időszakot öleli fel. A Pakson végzett megfigyelések 2003. októbertől 2004 februárjáig, jórészt télen zajlottak, míg a szegedi adatsor az itt feldolgozott formában 2004. júniusától szeptemberéig tartó négy hónapban állt rendelkezésünkre.

A szélenergia villamosenergia-rendszerbe illeszthetőségének segítéséhez együttesen vizsgáltuk a SODAR mérésekből származó különböző magasságban mért szélesebesség és a magyar villamosenergia-rendszer (VER) terhelésének napi menetét. A MAVIR adatpublikáció keretében napi rendszerességgel teszi elérhetővé az interneten ([www.mavir.hu](http://www.mavir.hu)) a rendszerterhelés adatokat 60 percre átlagolva, melyeket vizsgálatunkhoz felhasználtunk. A rendszerterhelés adatsorok megegyeztek a SODAR mérések idejével.

A SODAR mérések részletes klimatológiai és energetikai elemzésének egy része a Mistaya Engineering Inc. által fejlesztett Windographer 1.04 verziószámú programmal, más része a Lakes Environmental WRPLOT View 5.2.1 verziójú szélrózsa megjelenítő programjának segítségével készültek.

## EREDMÉNYEK

A makroskálájú északi negyedgömbre vonatkozó szélklimatológiai vizsgálataink alapján a következő legfontosabb megállapításokat tehetjük:

- Az NCEP/NCAR reanalízis vizsgált 1956-2005 közötti napi szélesség adatsora alapján az északi negyedgömbön nem találtunk tartósan egyirányú változást a szélesség éves átlagaiban. Az 50-es évek vége és a 90-es évek erősebb szelekkel volt jellemezhető, míg általában a 70-es évek voltak a legkevésbé szelesek. A '70-es éveket követő évtizedekben a mérsékelt és poláris öv óceáni területein erősödött a szél sebessége.
- A  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  méretű gridekben 1956-2005 között a szélesség változásának iránya és nagysága erősen függ a választott térség földrajzi helyzetétől, a vizsgált időszak hosszától.
- Az egyes évek, hónapok jellemzésére olyan szélindexet fejlesztettünk, amely az északi negyedgömb eltérő adottságú területeinek objektív összehasonlítását teszi lehetővé. Dánia példáján kimutattuk, hogy a makro léptékű szélesség átlagokon alapuló szélindex összhangban áll az országban üzemelő szélenergia termeléséből származtatott szélenergia indexel. Ez bizonyítja, hogy a makro léptékű reanalízis modell széladatai használhatóak nagyobb területen üzemelő szélenergia üzemek összességéből származó energiahozamok jellemzésére.
- Kimutattuk, hogy a szélindex számításához nem mindegy milyen hosszú és milyen időszaktól származó sokéves átlagokat használunk. Megállapítottuk, hogy Magyarországon időszaktól függően 30 éves átlagok használata esetén 5% eltéréssel határozható meg a szélindex értéke.
- Megállapítottuk, hogy a mérsékelt éghajlati öv ideális terület a szél energiájának hasznosítására, mert a szélesség évek közötti és éven belüli változékonysága itt a legkisebb. Magyarországon az éves átlagos szélesség változása Európában Dániával és Spanyolországgal összehasonlítva nagyobb. Hazánkban évről évre statisztikailag sokkal pontosabban lehet becsülni a szél átlagos sebességét, a légmozgások energiáját, illetve a technikailag kinyerhető hozamokat, mint Dániában, vagy az Ibéria-félszigeten. Az éves szélindex szórása Magyarországon keleti irányban növekszik, így az éves átlagos széljelzőszám statisztikailag nagyobb hibával becsülhető hazánk keleti területein.

- Az országban a havi szélesség változása mérsékeltebb, mint Dániában, az extrém széles hónapok nálunk kevésbé kiugróak a sokéves átlagokhoz viszonyítva. Magyarországi szélviszonyok között egy szélenergia hasznosító berendezés téli félévben több mint kétszer, háromszor több villamos energiát termelhet, mint nyáron.
- A Magyarország területét érintő 3 grid (É47,5° K17,5°, É47,5° K20°, és É47,5° K22,5°) napi szélesség értékei között gyakorlatilag nincs szoros kapcsolat. A korrelációs együttható értéke alapján télen erősebb a kapcsolat a területek között, mint tavasszal és nyáron.
- Megállapítottuk, hogy a napi átlagos szélességek az 50 éves napi átlagtól átlagosan 40%-ban térnek el a Nyugat-Magyarországot lefedő gridben. A napi szélesség átlagok statisztikailag télen és nyáron nagyobb, míg tavasszal és ősszel, kisebb hibával becsülhetők.

A Budapesten, Pakson és Szegeden 2003-2004-ben végzett expedíciós SODAR mérések adatsorait vizsgálva az alábbi megállapításokat tehetjük:

- Magyarországon 120 m magasságig a leggyakoribb északnyugati szélirányú szelek rendelkeznek a legnagyobb energiatartalommal. Ezen túl a déli, míg az Alföld déli részén az északkeleti szélirányok energiatartalma számottevő.
- A szélirányok magassággal történő változása mellett a szélesség eloszlás alakja is jelentősen átalakul. Budapesten mintegy 180 m magasságig a Weibull - eloszlás  $k=2.1$  alakparaméterrel számolva pontos. Nagyobb magasságokban a  $k$  alakparaméter értéke csökken. Szegeden és Pakshoz a talajhoz közeli rétegben  $k$  értéke növekszik, maximumát 60 m-nél veszi fel, másodlagos maximumát 90 m magasságban tapasztaltuk. Értéke ezt követően általában csökken. Magyarországon tehát közel 90 m magasságig Wieringa összefüggése, majd ettől nagyobb magasságokban Justus lineáris megközelítése használható a  $k$  alakparaméter magasság szerinti változásának leírására.
- Paks esetén a hatványkitevős szélprofil összefüggés írja le szinte minden magasságban a legjobban a szélesség magasság szerinti változását, a többi mérőhelyen csak a talaj közelében. Budapesten 60 m, Szegeden 75 m magasság felett a logaritmusos összefüggés bizonyult jobbnak. Az átlagos szélprofil ismeretben meghatároztuk szélirány szektoronként a  $z_0$  érdességi magasságot, illetve a hatványkitevős összefüggés alfa kitevőjét, amely a mérőhelyet övező területek érdességének függvényében irányonként is változik.

- 75 m magassághoz normalizált szélprofilok alapján megállapítottuk, hogy Budapesten északnyugati szél fennállásakor 30 m magasságban a 75 m magassághoz mérten közel 25%-kal kevesebb a szélesebbesége, ugyanakkor 120 méteren csak alig 10%-kal több. A relatív profilban körülbelül 60 m magasságban található töréspont, felette egységnyi magasságváltozás hatására már alig növekszik a szél sebessége. A szélesebbeség gradiense Pakson a legnagyobb, hiszen a felszínhez közeli szél akár 40%-kal gyengébb, míg 120 méteren több mint 20%-kal nagyobb, mint 75 méteren. Szegeden Budapesthez hasonló szélesebbeség különbséget (40%) mutattunk ki 30 és 120 m között.
- A magyar villamosenergia-rendszer napi terhelése és a szélesebbeség napi menete összefüggésének vizsgálata során a SODAR mérések helyszínén általában csak a talajhoz legközelebbi, 30 és 45 m magasságban mutattunk ki szignifikáns pozitív kapcsolatot, azaz a szél sebessége akkor volt nagyobb, amikor a fogyasztói igények is megnövekedtek. Egyedül Szegeden volt 120 m felett a negatív kapcsolat szignifikáns volt, míg 60-105 m között egyáltalán nincs kimutatható összefüggés a VER terhelésének napi menetével.

Összességében Magyarország széleenergia potenciálját mindenképpen érdemes hasznosítani akár ipari méretű, hálózatra csatlakozó, akár háztartási méretű szélerőművekkel tesszük is, hiszen hosszú időskálán és makro léptékben rendelkezésre állása stabilabb, mint a szélerőművek élettartama alatt akár a szénhidrogének világpiaci árának változása, vagy a fejlődésének kereteit meghatározó jogszabályi környezet.

Egy terület széleenergia potenciálja objektív adottság, annak tulajdonságain mi nem tudunk változtatni, ezért a széleenergia és más területek bármilyen lehetséges konfliktusát ésszerűen optimalizálva csakis a szélklíma ismeretében, ahhoz alkalmazkodva lehet csak megoldani. A széleenergia hasznosítás magyarországi jövőbeli fejlődésére csak ilyen szemlélet mellett látunk esélyt.

## INTRODUCTION

Increasing wind energy utilization receives priority in the European Union and in many countries in the World as fighting against climatic change becomes a key issue of national energy policies. In numerous countries the free wind-power potential is applied to ensure energy supply safely. In order to develop wind energy utilization it is highly important to study the availability of wind energy both in space and time. Furthermore, it is important to know those characteristics of wind energy that helps to integrate wind power plants into the electric energy system without threatening security of supply.

The aim of the dissertation is to present the field of climatology that studies the characteristics of air movements with special regard to the energetic utilization of wind. In the course of the research it was important to show the wind energy potential characteristics present in Hungary in comparison to the wind conditions of other areas of the northern quarter sphere in order to help the development of domestic wind energy development. Information on the wind climate support the serious financial-economic decisions of those interested in wind energy utilization (investors, transmission system operator, leaders of balance circles, electric energy consumers).

Our research covers the following major fields:

- By the first decade of the 21<sup>st</sup> century renewable energy resources became an extremely rapidly developing field involving wind energy utilization in Europe and in the World in general. The present state of the development and the plans for the future are presented. The theoretical principles of wind utilization are laid: the conditions of wind formation, characteristics of the flow field, the influencing factors, methods of describing the energy of wind, utilization laws. The known research results regarding wind climatology in the World and the EU with special regard to Hungary are presented briefly.
- The pattern of the characteristics of wind flow is studied with high spatial resolution for 50 years of time period in the northern quarter sphere based on the homogeneous diurnal, monthly and annual datasets of the NCEP / NCAR re-analysis between 1956 and 2005.
- Using Hungarian SODAR measurements answer was looked for the questions of how wind conditions change with altitude, what factors influence the direction dependence of the wind profiles at the given observation localities and how the wind velocity varies daily in different altitudes in relation to the average load of the Hungarian electric energy system.



In conclusion the most important aim of the research is to help wind energy utilization in short, middle and long term by providing wind climatic information.

## **APPLIED DATA AND METHODS**

The database for the large scale wind climatic examinations is the daily dataset of meridional and zonal wind vectors with the resolution of 2.5x2.5 degrees related to the northern quarter sphere measured for 50 years between 1956 and 2005 in the NCEP / NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) re-analysis project. This was supplemented by the measurement set of 2006. The 'u' and 'v' wind vectors are related to the lowest so called 995 sigma level used for the construction of the re-analysis. This level is relief tracking, i.e. represents the wind conditions about 80 m above the surface. The horizontal resolution of the model is T62, i.e. 2.5° both in meridional and zonal directions. This means larger and larger grids towards the Equator due to the spherical shape of the Earth. The length of the meridional side of the grids is around 280 km. The spatial resolution of the re-analysis model is not very detailed but it covers the entire sphere of the Earth. The other advantage of the model is the continuous homogeneous dataset for a known framework, covering almost all of the parameters of the atmosphere in 28 height levels measured by the same method from 1948 till nowadays.

The re-analysis of the American National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) was chosen because it is available outside the closed system and it is refreshed operatively daily. The daily 'u' and 'v' wind vectors were downloaded from the database of the Climate Research Unit (CRU) in the form of a matrix consisting of 73 columns and 37x365 rows. The data are related to the area between the -90° and 90° western and eastern longitude respectively and between the North Pole and the Equator covering 2701 grids in total. Due to the scale of the resolution the northern quarter sphere was analysed thus apart from Hungary the wind climate of the entire European continent with its wider environment can be reviewed and analysed.

For the wind climatic analyses wind velocity data calculated from the wind vectors (u; v) according to the rules of vector calculation were applied.

Monthly, seasonal, annual and multi-annual averages were calculated from the daily datasets. Based on these wind indexes interpreted in different time scales were calculated.

Wind index (%) can be calculated so that the value observed at a given time is related to the multi-annual average.

Regression analysis was performed for the analysis of the 50 years dataset between 1956 and 2005. The differing from zero of the steepness (b) of the trend line adjusted on the dataset was controlled by measurements traced back to the trial. The variation coefficient characterising the standard deviation related to the average of the dataset was applied for the characterising of the entire 2701 grid of the northern quarter sphere in time.

For the optimum handling of the large quantity of data from the NCEP / NCAR re-analysis for the time period 1956-2005 a specifically developed programme named "SZEL" written in the language of Delphi by Tibor Nagy programmer. The analyses of the data were performed by statistic (SPSS, Statistica, Excel) and GIS (GeoMedia 5.1 Professional) softwares. The text was constructed by the software LaTeX for Windows LyX 1.5.3 while the references were prepared by the software JabRef 2.3b running in Java environment.

In the research surveying the solar and wind energy of Hungary paid special attention for studying the variation of wind with height in detail. The National Meteorological Service obtained a SODAR (Sonic Detection And Ranging) instrument of moderate capacity in order to reach the research goal. This equipment is able to measure the wind profile directly from the surface in the lowest few 100 metres region of the atmosphere. This instrument can measure the characteristics of the wind flow directly and operatively even in 20 different height levels between 30 and 315 m at one site.

SODAR observations were like expeditions in Hungary carried out in 2003 and 2004. The dataset of Budapest covers the summer period between 1<sup>st</sup> April and 30<sup>th</sup> June 2003. Observations in Paks were made in the winter between October 2003 and February 2004 while the measurements in Szeged were carried out in the four months between June and September 2004.

In order to help the adjusting of wind energy into the electric energy system the wind velocities measured in different heights by SODAR observations and the daily pattern of the load of the Hungarian electric energy system (VER) were studied together. The MAVIR data publication system publishes daily the system load data averaged for 60 minutes via the Internet ([www.mavir.hu](http://www.mavir.hu)). These were applied in our research. System load datasets coincided with the time of the SODAR measurements.

A part of the climatic and energetic analyses of the SODAR measurements were performed with the help of the software Windographer 1.04 developed by the Mistaya Engineering Inc. while the other part was made with the help of the software Lakes Environmental WRPLOT View 5.2.1 programme displaying rose diagrams.

## RESULTS

Based on the macro-scale wind climatic observations related to the northern quarter sphere are the followings:

- On the basis of the daily wind velocity dataset between 1956 and 2005 studied by the NCEP / NCAR re-analysis constantly one way change in the annual average of the wind velocity is not found in the northern quarter sphere. The late 1950s and the 1990s are characterised by stronger winds while, in general, the 1970s were the least windy. Following the 1970s wind were intensified in the ocean territories of the moderate and polar climates.
- The direction and magnitude of wind velocity between 1956 and 2005 in the  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  grids depend strongly on the geographical position and the length of the studied period.
- To characterize the particular years and months such a wind index was applied that assures objective comparison of diverse areas of the northern quarter sphere. Average wind energy velocity of any particular month or year is given in comparison to long-term means, in %. Using Denmark as an example it is demonstrated that the wind index based on macro-scale wind velocity averages is in harmony with the wind energy index from the power generation of wind turbines in the country. This proves that wind data of a macro-scale re-analysis model can be used to characterize power generation of wind turbines.
- It was proved that the length and the time of the period the applied long-term is gained is important for calculating the wind index. In Hungary in the case of 30 years long periods wind indexes can be calculated with 5% of differences depending on the time of the interval.
- The conclusion is that temperate climate zone is an ideal area for wind energy utilization as variability of wind velocity is the minimum both within a year and on long-term basis. Variation of average annual wind velocity in Hungary is larger compared to Denmark and Spain in Europe. In Hungary average wind velocity, energy of air movements and technical potential can be estimated with a lesser punctuality than in Denmark or in the Iberian Peninsula. Deviation of annual wind index increases towards the East therefore the annual average wind capacity can be estimated statistically with less accuracy in the eastern parts of the country.

- In Hungary variation of monthly wind velocity is more moderate than in Denmark the extremely windy months are less prominent compared to the long-term average. At the given wind conditions in Hungary a wind energy power plant can generate twice or three times more energy in the winter half-year than in the summer.
- Practically there is no strong relationship between the daily wind velocity values of the three grids covering Hungary (N47.5° E17.5°, N47.5° E20° and N47.5° E22.5°). Based on the values of the correlation coefficients relationships between the areas are stronger in winter than in summer.
- Daily mean wind velocities differ from the 50-year daily average by 40% on the average in the grid covering Western Hungary. Statistically daily wind velocity averages can be estimated with bigger mistakes in winter and summer; with lesser mistakes in spring and autumn.

Studying the datasets of expedition SODAR measurements performed in Budapest, Paks and Szeged in 2003-2004 the following statements can be drawn:

- In Hungary up to 120 m altitude the most common northwestern winds have the biggest energy capacity. In addition to these southern winds have substantial wind capacity, also northeastern winds at the southern parts of the Hungarian Great Plain.
- Apart from rounding wind directions with altitude the shape of wind velocity distribution also changes. In Budapest up to 180 m altitude Weibull distribution is accurate calculated with  $k=2.1$ . In higher altitudes the value of 'k' decreases. At Szeged and Paks near the ground the value of 'k' increases reaching the maximum at 60 m and secondary maximum at 90 m. Therefore in Hungary up to 90 m altitude Wieringa correlation, while at higher altitudes Justus linear approach are applicable to describe changes by altitude of shape parameter 'k'.
- At Paks the changes by altitude in wind velocity can be defined best by exhibitor equation at almost all altitudes. At other measurement stations this statement is true only near the ground. Logarithmic function proved to be more accurate in Budapest above 60 m and at Szeged above 75 m. In the knowledge of the mean wind profile the  $z_0$  roughness elevation is determined together with the alpha exponent of the exhibitor equation that varies with directions depending on the roughness of the area surrounding the locality of measurement.

- In Budapest when there is northwestern wind the wind velocity is smaller by 25% at 30 m compared to 75 m but at 120 m the velocity is higher only by 10%. The cut-off point in the relative profile is at 60 m, above this wind velocity hardly increases by a unit of altitude change. Wind velocity gradient is greatest at Paks as the wind is weaker sometimes by 40% near the ground while at 120 m it is stronger by 20 % than at 75 m. At Szeged differences in wind velocity are similar to that at Budapest (40%) between 30 m and 120 m.
- When studying the relationship between the daily load on the Hungarian electric energy system and the daily variation of wind velocities significant positive correlation was found only at the elevation of 30 and 45 m, closest to the ground, at the places of the SODAR measurements. Thus wind velocities were greater when consumer demand increased. The negative correlation above 120 m was significant only in Szeged while there is no correlation at all with the daily variation of the electric energy system between 60 and 105 m.

To summarize the above it can be claimed that Hungarian wind energy potential is worthy for utilization by both industrial size turbines connected to the network and by household size smaller turbines as its availability is more stable during long time periods and on a large scale than either world market cost of hydrocarbons or legal conditions of development during the turbines' lifetime.

Wind energy potential of an area is an objective fact, its features cannot be changed, accordingly any possible conflict between wind energy and other areas can be solved optimally only knowing and complying with the wind climate. Future development of wind energy utilization in Hungary is possible only by implementation with this approach.

## SZÉLKLIMATOLÓGIA TÉMÁBAN EDDIG MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK:

Mika, J.; Kircsi, A. és Tar, K. (1999), A napi maximális szélökés néhány statisztikai tulajdonsága az Alföldön. In: *Időjárási és éghajlati szélsőségek. Meteorológiai Tudományos Napok Budapest. 1999. november 18-19.* OMSZ, pp. 207-213

Tar, K.; Makra, L. és Kircsi, A. (2000), Temporal change of some statistical characteristics of wind speed in Hungary. In: *Detecting and modelling Regional Climate Change.*, Springer-Verlag, pp.251-262

Kircsi, A.; Mika, J. és Tar, K. (2000), Some statistical characteristics of the daily maximum gust of wind in Hungary."3rd European Conference on Applied Climatology. Pisa, Italy, 16-20. October, 2000.

Kircsi, A. és Tar, K. (2001), Szélenergia és csapadék. In: *A szélenergia hasznosítása a vízgazdálkodásban. 2001. Március 14. Budapest,* Magyar Szélenergia Társaság, pp. 53-61

Tar, K. és Kircsi, A. (2001), Kísérlet a szélenergia statisztikai becslésére., in G. HORVÁTH, ed., 'Szélenergia konferencia I. 2001. Január 24. Gödöllő.', Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület, Gödöllő, pp. 28-34

Tar, K. és Kircsi, A. (2001), A szélirányok néhány statisztikai jellemzőjének időbeli változása Magyarországon. In: *Dr. sen. Berényi Dénes születésének 100 éves jubileumi ülése. 2000. November 9. Debrecen.* Debreceni Egyetem pp. 245-262

Tar, K. és Kircsi, A. (2001), Módszer a napi átlagos fajlagos szélteljesítmény meghatározására. In: *A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai. Meteorológiai Tudományos Napok 2001. Budapest. 2001. november 15-16.* Országos Meteorológiai Szolgálat, pp. 129-137

Tar, K.; Makra, L.; Horváth, S. és Kircsi, A. (2001), 'Temporal change of some statistical characteristics of wind speed over the Great Hungarian Plain.', *Theoretical and Applied Climatology* 69(1-2.), pp. 69-79

Tar, K.; Kircsi, A. és Szegedi, S. (2001), A possible statistical estimation of wind energy., in P. HELM és A. ZERVOS, ed., 'Wind Energy for the new millenium. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001. pp. 886-889

Tar, K. és Kircsi, A. (2002), A szélenergia kapcsolata az időjárási helyzetekkel.

In: *ÖKOENERG'2002 Energiahatékonysági és Hulladékgazdálkodási Konferencia. Kecskemét, 2002. május 30-31.* Regionális Energiahatékonysági Központ pp. 41-46

Tar, K.; Kircsi, A. és Vágvölgyi, S. (2002), Temporal changes of wind energy in Hungary in connection with the climate change., in 'Proceedings CD-ROM of the Global Windpower Conference és Exhibition, Paris, France, 2-5 April 2002.'

Vágvölgyi, S.; K. Tar és Kircsi, A. (2002), Utilization of wind energy in irrigation of orchards in Hungary. In: 'Proceedings CD-ROM of the Global Windpower Conference és Exhibition, Paris, France, 2-5 April 2002.'

Tar, K. és Kircsi, A. (2002), A szélenergia kapcsolata az időjárási helyzetekkel. In: 'ÖKOENERG'2002. Kecskemét. 2002. május 30-31. pp 41-46

Kircsi, A. (2003), Napi maximális széllokések jellemzői Magyarországon. In: *Proceedings CD-ROM of the 2nd International Conference on Applications of Natural-, Technological- and Economical Sciences, Szombathely 10. May 2003.* Berzsényi Dániel Főiskola, Szombathely

Tar, K.; Kircsi, A. és Vágvölgyi, S. (2003), Relationship between the energy and the change of direction of the wind., in 'European Wind Energy Conference és Exhibition, Madrid, Spain, 16-19 June 2003'.

Tar, K. és Kircsi, A. (2004), A szélerő hasznosítás klimatológiai aspektusai Magyarországon. In: *ÖKOENERG'2004 Energiahatékonysági és Hulladékgazdálkodási Konzultációs Konferencia és Kiállítás. Kecskemét, 2004. április 22-23.* Regionális Energiahatékonysági Központ, Kecskemét, pp 68-77

Kircsi, A. (2004), Napi maximális széllokések statisztikai szerkezete Magyarországon. In: *Földtudományi tanulmányok. Tiszteletkötet Dr. Justyák János 75. születésnapjára.* Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék, Debrecen, pp. 83-93

Kircsi, A. (2004), Szélesebesség adatok területi extrapolációja – lehetőségek és nehézségek. In: *A megújuló energiák kutatása és hasznosítása az Észak-Alföldi régióban. 2003. November 24. Debrecen,* Magyar Szélenergia Társaság kiadványai. No.2. Magyar Szélenergia Társaság, pp. 71-78

Hunyár, M.; Tóth, P.; Kircsi, A. és Veszprémi, K. (2006), Szélenergia hasznosítás Magyarországon hidrogénfejlesztéssel összekötve. In: *Budapesti Nemzetközi Hidrogén Energetikai Fórum, Budapest, 2006. Október 9-10.*

Tóth, P. és Bíróné Kircsi, A. (2006), A szélenergia hasznosítás helyzete Magyarországon. In: *ENERGEXPO 2006 Nemzetközi Energetikai Szakkiállítás és Konferencia. Debrecen, 2006. szeptember 26-28.* V-Trade Kiállítások Kft., Debrecen, pp. 276-281

Bíróné Kircsi, A. és Tóth, P. (2006), A magyarországi szélenergia hasznosítás tapasztalatai és jövője., *Energiagazdálkodás* 47(5), pp. 18-24

Tar, K. és Bíróné Kircsi, A. (2007), Energetikai célú szélprofil vizsgálatok. In: *ENERGEXPO 2006 Nemzetközi Energetikai Szakkiállítás és Konferencia. Debrecen, 2007. szeptember 25-27.* V-Trade Kiállítások Kft., Debrecen, pp.

Bíróné Kircsi, A. és Tar, K. (2007), Profilvizsgálatok a szél energetikai hasznosításához. In: *Erdő és klíma V. kötet.* Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, pp. 83-103

Bíróné Kircsi, A. (2007), A szélenergia hasznosítás tapasztalatai és jövője., 12. rész 8.5 fejezet In: *Épületgépészet a gyakorlatban.*, Verlag Dashöfer, 12. rész 8.5 fejezet pp. 1-12

Bíróné Kircsi, A. (2007), A megújuló energiaforrások. In: *Tanár úrnak Tisztelettel! 56 tanulmány Dr. Korompai Gábor 70. születésnapjára.* Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, pp. 227-236

Kircsi, A. és Tar, K. (Megjelenés alatt), 'Profile tests to optimize the utilization of wind energy.', *Acta Silvatica és Lignaria Hungarica*