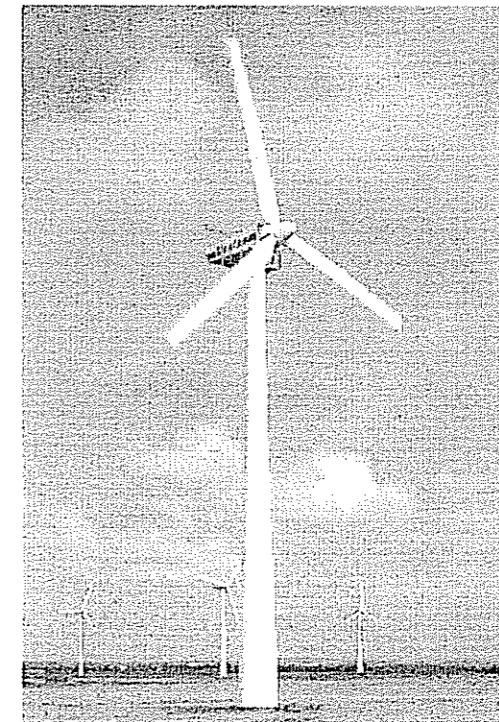


EGYETEMI METEOROLÓGIAI FÜZETEK

No. 14.

A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI A
KÁRPÁT-MEDENCÉBEN

Összefoglaló a T015707 számú OTKA program keretében végzett kutatásról



Témavezető: Bartholy Judit, ELTE Meteorológiai Tanszék

A kötetet összeállította: Bartholy Judit és Radics Kornélia

A kutatási munka résztvevői: Barcza Zoltán, Bartholy Judit,
Kovács Attila, Mészáros Róbert, Pongrácz Rita, Radics Kornélia,
Vigh Gabriella, Weidinger Tamás

Budapest, 2000.

BME-OMIKK
1 100000 000000 000000 000000

420.140

ISBN 963 463 422 2

ISSN 0865-7920

Kiadja
az ELTE TTK Meteorológiai Tanszék.

A kiadásért felel:
Dr. Bartholy Judit
tanszékvezető egyetemi tanár



Kutatásainkhoz anyagi segítséget nyújtottak az
OTKA T026629, T15707, T025803 és T23811 pályázatok,
valamint az FKFP-0193 program.

Készült az ELTE Meteorológiai Tanszékén 80 példányban.

TARTALOMJEGYZÉK

1. A kutatási program célkitűzései	5
2. A szélenergia hasznosítás rövid története	7
3. Magyarország szélklímájának áttekintése, az Európai Szélatlasz hazai adatokkal való kiegészítése	17
3.1 Szélklímavizsgálatok, magassági korrekció, változékonyság térben és időben	17
3.2 Az Európai Szélatlasz hazai adatokkal való kiegészítése	18
3.3 Fajlagos szélteljesítmények, s a Weibull paraméterek hazai értékei	34
3.4 Hosszabb idősorokon végzett vizsgálatok	36
4. Expedíciós szélenergetikai mérések, hibaforrások analízise	40
4.1 Különböző átlagolási idők összehasonlítása	41
4.2 A szélteljesítmény paraméterei, becslési technikák	42
5. Elméleti háttér	50
5.1 A geosztrofikus erőtvény és a geosztrofikus szél	51
6. A WAsP modell	52
6.1 A szélmező modellezésének korlátai	52
6.2 A széltérkép statisztika	52
6.3 Modell számítások	56
6.4 A széltérkép statisztikák alkalmazása	57
7. Modellek adaptálása, hazánk szélenergia készletének felmérése	58
7.1 Svédországi terepre végzett esettanulmányok eredményeinek összefoglalása	58
7.2 A hegyhátsági expedíciós mérésorozat elemzése	61
8. Hazánk szélenergia készletének feltérképezése	63
Köszönetnyilvánítás	71

Felhasznált irodalom	72
Publikációs lista	74
Az <i>Egyetemi Meteorológiai Füzetek</i> eddig megjelent kötetei.....	80

1. A kutatási program célkitűzései

Bevezető: A világban a szélenergia hasznosítása nagy múltra tekint vissza, pl. a legelső európai szélmalom az 1180-as évekből származik, s az első elektromos áramot termelő szélturbina 1890-ben Dániában lett installálva (a Paul la Cour professzor által kifejlesztett szerkezet egy iskolaépületet világított meg). Dániában a múlt század végére a szélerőgépek becsült összkapacitása meghaladta a 200 MW-ot. A XX. század első felét egyre szélesebb körű fejlesztések jellemzik. A 40-es években megjelennek az 1 MW teljesítmény feletti nagyturbinák, s lehetővé válik egy-egy település teljes energiaellátása csupán a szélenergia felhasználásával. Természetesen az adott térség szélklímája határozta meg, hogy milyen mértékű szélenergia hasznosításra volt esély, de még a szélenergiában nem olyan gazdag Magyarországon is több, mint 800 szélmalom üzemelt ebben az időszakban. A hatvanas években - a zuhanó energiaárak miatt - minden fejlesztés, s egyben a működő malmok, generátorok, telepek nagy része is leáll. Egy-két évtizeden át, időszakosan úgy tűnik, hogy a szélenergia felhasználása szükségtelen, s nem gazdaságos. Az újabb, minden eddigit meghaladó mértékű fejlesztések a 70-es évek elejétől indulnak be, s azóta töretlenül folynak. Könnyű átlátni, hogy az energiaáraknak az elmúlt évtizedekben tapasztalt nagymértékű növekedésével egyre csökken azon térségek száma, ahol nem gazdaságos a szélenergiának, mint önerőből megújuló energiaforrásnak a hasznosítása.

A szélklimatológiai és szélenergetikai kutatási program célkitűzései: A hazai szélenergia hasznosítás peremfeltételeinek áttekintését tűzte ki célul e kutatási program. Rövidebb előkészítő fázis és az ötéves pályázati időszak alatt a pályázati munkatervünkben szereplő vállalatokon haladtunk végig, s azokat sikeresen teljesítettük, mint abba e beszámoló 3. fejezetétől részletesebben is betekintést engedünk. Vázlatpontokba foglalva a pályázat futamideje alatti tevékenységünket, az alábbi kutatási feladatokat hajtottuk végre:

- Megtörtént a hazai széladatok gyűjtése, korrekciója, extrapolálása, rendszerezése.
- A FEFA műszerpályázattal elnyert szélmérőműszerekkel expedíciós mérések szervezése különböző helyszíneken. Automatizált expedíciós adatgyűjtés, adatrendezés, adatkontroll megszervezése.
- Két pest megyei helyszínről expedíciós mérés adatainak feldolgozása. A mért és számított értékek alapján a széladatok megbízhatóságának figyelembevételével megtörtént az eddigi szélklíma vizsgálatok összefoglaló, összehasonlító elemzése.
- A klimatológiai adatsorok alapján a szélenergia potenciálok kiszámításra kerültek a kiemelt állomásokra, s a szélteljesítmények magasság szerinti extrapolálása is megtörtént.
- Az Európai Szélatlással (melyben a Kárpát-medencéről nincs információ) megegyező formátumban magyarországi szélatlást készítettünk (13 hazai állomás adatait felhasználva), melyben a hazai szélenergia hasznosítás szempontjából lényeges paraméterek szerepelnek.
- Az összegyűjtött, valamint az expedíciós terepmérések során mért széladatok segítségével megtörtént a szélenergia hasznosítás technológiai áttekintése, szélérőművek paraméterei szerinti típusoptimalizálás (kis, közepes és nagyteljesítményű erőművek esetére).
- Magyarországi szélklímák statisztikai vizsgálata keretében eloszláselemzések készültek. A Weibull paraméterek, s a fajlagos szélteljesítmények számítása több

időkivágotra megtörtént (kettő és öt éves periódusokra). Kísérlet történt a szélenergia potenciálok számítására, valamint a szélteljesítmények magassággal való extrapolálására.

- Áttekintő elemzés készült, mely a szélenergia helyét jelöli ki a világ, s Európa energiagazdálkodásában, s a magyar szélenergia felhasználás eddigi történetét foglalja össze.
- A szélturbinák és szélgenerátorok alkalmazási lehetőségeit, feltételeit, s korlátait tekintettük át. Összehasonlító elemzés készült a rendelkezésre álló és kinyerhető teljesítményekről. A teljesítmény karakterisztikák közül a közepes teljesítményoutputokat becsültük, valamint a különféle átlagolási idők révén keletkező hibákat számítottuk.
- A saját telepítésű mérőrendszer beruházása, valamint a szükséges kiegészítő beszerzések is (szenzorok, mérőműszerek, adatgyűjtő) megtörténtek.
- Szélmodell kísérletek: modellek installálása, futtatása a DTM1000-es és a DTM3000-es európai digitális terepmodell magassági és érdességi paramétereinek felhasználásával. Szélmodellek adaptálása, a szélmező és a szélenergia hasznosítás lehetőségét felmérő mezoskálájú modellek tesztelése. Összetett és egyszerű terepek összehasonlítása, a meglévő modellezési hibák korrigálása, az eredmények verifikálása, következtetések. Helyi szélenergia potenciálok becslése. Magyarország szélenergia hasznosíthatóság szempontjából való regionalizálása.

E tanulmányban a szerzők kutatómunka eredményei közül öt területet mutatunk be részletesebben:

1. Magyarország szélklimájának áttekintése, az Európai Szélatlasz hazai állomásokra vonatkozó adatokkal való kiegészítése.
2. Expedíciós szélenergetikai mérések.
3. Szélenergia potenciálok becslései, hibaforrások analízise.
4. Szélklimatológia, és szélenergia potenciálok becslése WAsP modellel.
5. Modellek hazai adaptálási lehetőségei, esettanulmányok hazánk kistérségű szélenergia készleteinek felmérésére.

2. A szélenergia hasznosítás rövid története

A szél nem volt ismeretlen a régmúlt időkben, amióta az ember csónakot, hajót épít, azóta használja a szél erejét. A Biblia Ó- és Új-testamentumában is gyakran jut jelentős, vagy akár mitikus szerep a szélnek (pl. Ézsaiás prófétát egy óriási forgószél viszi fel a mennybe, Jónást egy pusztító szélvihar juttatja a cethal gyomrába), s több helyen pontos leírást találhatunk a szél tulajdonságairól. Ha leülünk egy mezőn, vagy egy parkban, s figyeljük a szél járását, megtapasztaljuk, hogy a szél iránya és ereje egy adott helyen pillanatról pillanatra változik, s egy kis térrészen belül is hol itt erősödik, hol ott gyengül. A szelet tárolni lehetetlen. Ha egyszer elment, nem tér vissza többé. Energiát termelni a szélből – évszázadokig megoldásra váró kihívás volt az emberiség számára.

Az első szélmalomok: Nincs rá semmilyen jel, hogy az ókori görögök, vagy a római birodalomban szélmalomokat használtak volna. Az alexandriai Heronál találjuk az első írásos emléket (*“Pneumatica”* című könyvében, i.sz. 60-ban) a szélmalomok létezéséről. Az idők során mechanikus szerkezetük, erőátviteli rendszerük alapján a szélmalomok két nagy csoportját fejlesztették ki: a horizontális, valamint a vertikális típust. A legősibb típusú horizontális malom Perzsiából származnak (sokuk még jelenleg is működik, az *1. ábrán* is egy ilyen kerül bemutatásra). Egy korai perzsa feljegyzés szerint “Umar ibn al-Khattab” második ortodox kalifa i.sz. 644-ben bekövetkezett erőszakos halálát épp egy szélmalom okozta, miszerint a malom tervezője és tulajdonosa megölte a kalifát a malomra kivetett magas adó miatt.

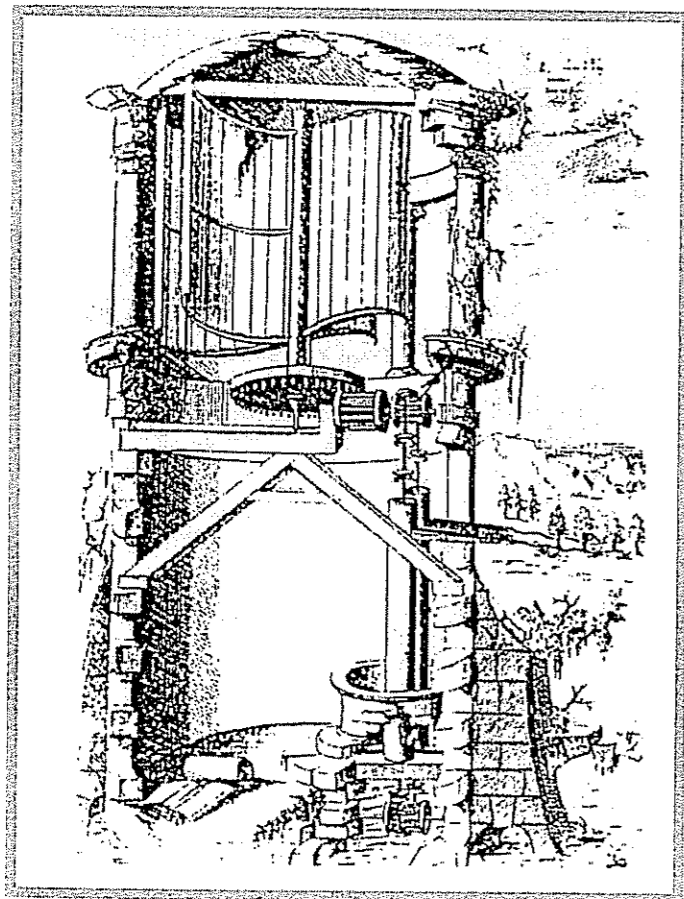
A szélmalomok elterjedésének kezdetei: Tibetben a szélhajtotta imalmok a hetedik, nyolcadik században jelentek meg először, s mind a mai napig láthatóak szerte az országban. A tizedik századtól kezdődően egyre több arab forrás jelzi a horizontális szélmalom megjelenését Ázsia közel-keleti régiójában. Nagy valószínűséggel Kínában is ebben az időszakban terjedtek el, de az első írásos emlékek, illetve részletesebb leírások a horizontális típusú malomokról csak a XIII. századból származnak. Mind a mai napig működnek ezen leírásokban szereplő szerkezetekkel közel azonosak Kína keleti partjainak a Jangce folyótól északra eső részén, valamint a Tianshan hegység közelében fekvő Thangku és Taku tartományokban. A kínai malomokat a tengerparti régióban a sós víz - sólepárlás céljából történő - kiemeléséhez használták. Más tartományokban az édesvíz folyókból, tavakból való kiemelése volt a cél, hogy azt átvezethessék öntözési csatornába, vagy öntözőmezőgazdasági területekre. Jól megfigyelhető a kínai dzsunkák és ezen malomok közötti hasonlóság: a vitorlázat formája, anyaga, szerkezete szinte azonos.

Európában az első függőleges tengelyű szélmalom leírása és szerkezeti vázrajza 1438-ból származik, Mariano Jacopo Taccola naplójából, melyet csak jóval később találtak meg, s sohasem hoztak nyilvánosságra. Nyomtatásban Besson 1578-as könyvében jelent meg elsőként egy ismertetés és működési vázrajz (*2. ábra*), melyet azután a reneszánsz kor legtöbb könyve átvett. Az ilyen típusú malomok szintén vízkiemelésre szolgáltak.

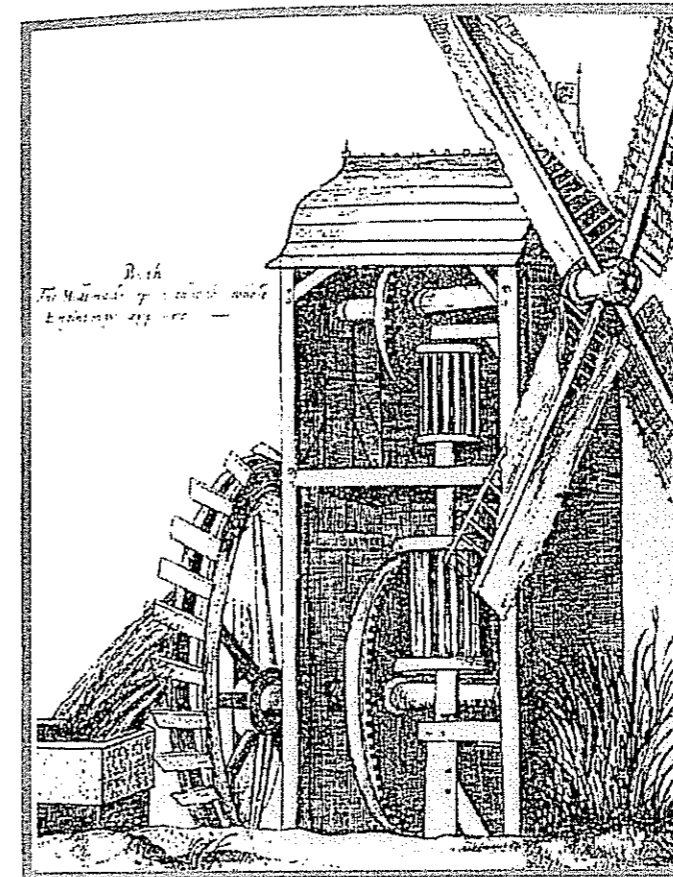
A horizontális és vertikális malomok elterjedése Európában: Az 1680-1870-es időkben csupán Angliában 94 találmány szerepel a hivatalos nyilvántartásokban, melyek mindegyike vagy teljesen új szélmalom konstrukció, vagy jelentős szerkezeti változtatást tartalmaz. E találmányok közös vonása, hogy a szélenergia hasznosításának határfokát kívánják javítani. Ebben az időszakban - Angliához hasonlóan - egész



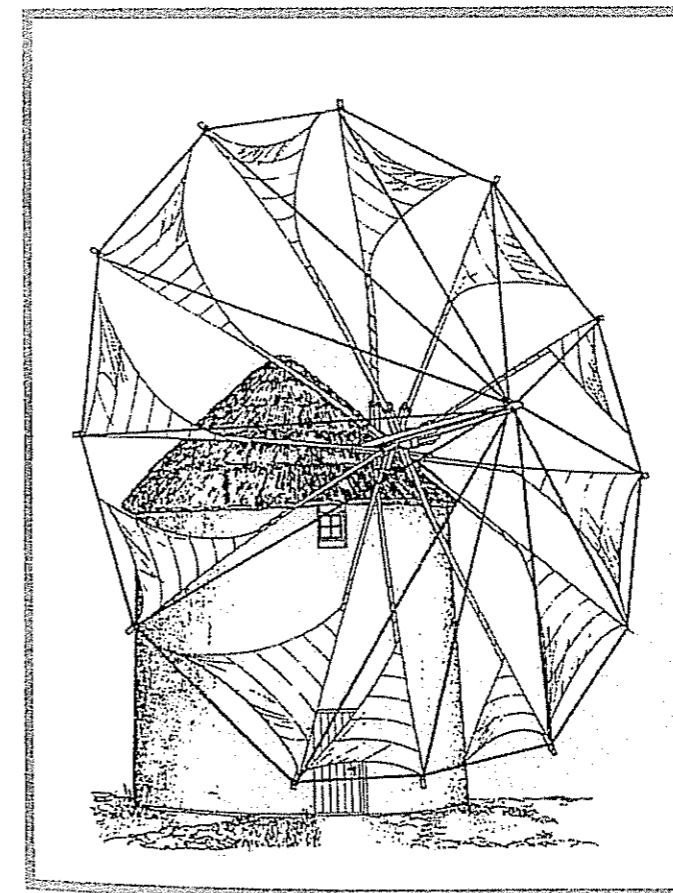
1. ábra:
A felvétel egy még napjainkban is működő perzsa szélmalomról mutat büszke tulajdonosával (Nish tafun, Khorason, Irán). Ez az egyik legősibb típusú horizontális szélmalom. (Fotó: Harveston M., 1977)



2. ábra:
Az első ismert illusztráció az európai, függőleges tengelyű, horizontális szélmalomról, mely a víz kútból történő kiemelésére szolgált. (Besson, 1578)



3. ábra:
Mezőgazdasági területek öntözésére szolgáló szélmalomról készült metszet. Feltételezések szerint ez az első, ilyen célra használt vertikális szélmalom. Jól látható, hogy a lapátok textíliával vannak bevonva, s hogy a szélirányba fordítás problémája még nem megoldott. (A metszet készítője: Blith W., 1652)



4. ábra:
Tipikus mediterrán típusú vertikális szélmalom, kúpformájú nádtetővel. Könnyűszerkezetes lapátstruktúrára kifeszített textilvitorlázat, mely nem fordítható szélirányba. (Forrás: Hills R., 1994)

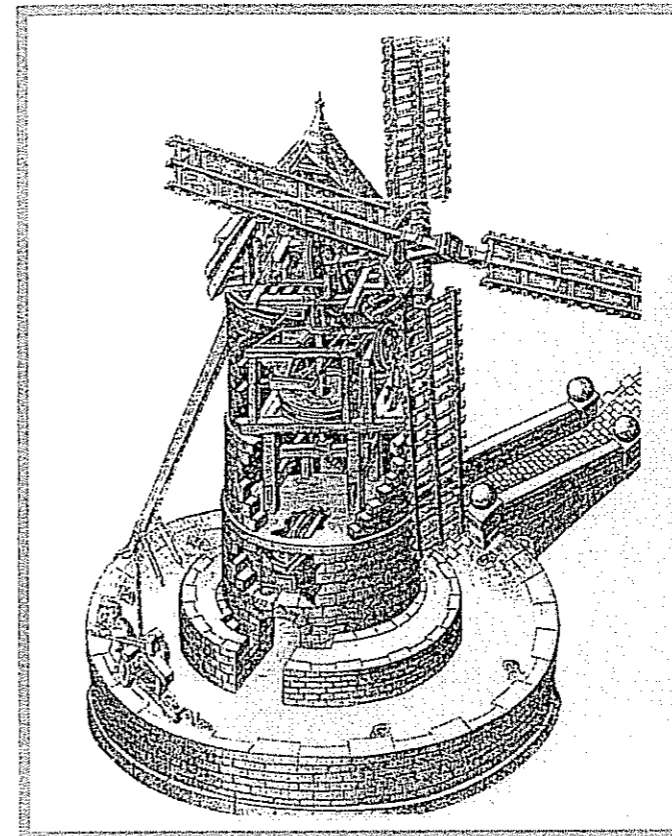
Európában óriási variációja jelenik meg a szélmalomoknak, melyek régiókénti elterjedése a szélviszonyoktól, az adott közösség építkezési szokásaitól, a hozzáférhető építőanyagoktól, a pénzügyi lehetőségektől, s más helyi adottságoktól függ. Ez a kis összefoglaló természetesen nem törekedhet teljességre a szélmalom bemutatása területén, mégis néhány alaptípus illusztrálását megkísérli. A kezdeti időszakban főként a mezőgazdasági területek öntözéséhez szükséges vízmennyiség kiemelésére használták a szélmalomokat. Ezek egyik vertikális rendszerű prototípusa látható a 3. ábrán. A Blith W. által 1652-ben készített metszeten látható a malom szerkezeti felépítése, az erőátviteli megoldások, a lapátok elhelyezése, kiképezése, mérete, borítása, valamint az is, hogy ez a típus még nem számol a szélirányba fordítás teljesítménynövelő hatásával.

A 4. ábra egy tipikus mediterrán szélmalom rajzát mutatja. A vertikális rendszerű malom jellemzői: henger alakú kőépület, melyet kívülről bevakolnak, s fehérre festenek; tetejét kúpformájú nádtető fedi, ehhez rögzítették a könnyűszerkezetű, fából készült forgó lapátvázat; a lapátok vitorlavászon textíliával lettek beborítva, melyet kötéllel feszítettek a vázra. A szélirányba fordítás problémája még itt sem megoldott.

Az ún. "bástya-malom" az 1500-as évek végén, 1600-as évek elején terjedt el Nyugat-Európában. Ennek egyik nagyon szép darabját mutatjuk be Ramelli által 1588-ban készített metszeten (5. ábra). A precíz rajz sok technikai részletet megörökít, úgy mint az épület anyagát, a belső szerkezet elemeit, valamint a kőből megépített malomfeljárót, mely a gazdáknak könnyítette meg az épületbe való bejutást, illetve az őrölni hozott termény beszállítását. Ugyancsak leolvasható a rajzról, hogy ennél a típusnál a lapátok tengelye az elfordítható kalaphoz van rögzítve, s így a szélirányba fordítás már megoldott. Kivehető az a hajtókar, a hozzá kapcsolódó csörlőkkel, mellyel az elforgatás művelete végezhető.

Még ma is nagyszámban üzemelnek Hollandiában az ún. "strázsa-szélmalomok" (6. ábra). Négyzet alapú kis faházak ezek, melyek egy korongon állnak, s egy hajtókar segítségével szélirányba forgathatók. Ezeknek a vertikális szélmalomoknak négy favázú lapátja van, melyre textil vitorlavászon lehet rögzíteni. Az ábrán látható malom Hollandia dél-nyugati részén, Tholen szigetén található, s a fotó 1990-ban készült.

Szélmalom az amerikai kontinensen: A tizenhatodik, tizenhetedik században a Nyugat-Európából érkező felfedezők értelemszerűen magukkal vitték az adott kor technikai színvonalát, anyaghasználatát, eszközkészletét. Mivel Amerika keleti partvidéke sok területen hasonlatos volt a telepések régi otthonával, ezért a szélmalomok is megépülhettek a hagyományos szerkezetben, a megszokott anyagokból. A földnek ekkor még nem volt valódi értéke, s a népsűrűség nagyon kicsi volt, valamint a farmok egymástól való távolsága is tetemes, ezért mind nagyobb önellátásra törekedtek a farmerek ezen a vidéken. Célszerűnek látszott kisebb méretű, egyszerűbb szerkezetű, egy fărnot kiszolgáló szélgép tervezése. Egy ilyen gép prototípusa Halladay tervei alapján, 1854-ben készült el (7. ábra). Halladay találmánya alapján a szélmalom hidraulikai elvek felhasználásával házi vízmű rendszert működtet. E gép legnagyobb erénye az volt, hogy biztosított volt a felügyeletmentes, károsodás nélküli folyamatos működés nagy szelek esetére is (egy beépített önszabályozó szerkezet képes volt a lapátok hajlásszögét változtatni a szélesebbesség függvényében). Egy másik új elemként megjelenik a faroklemez, mely a lapátok automatikus szélirányba való fordulását biztosítja.

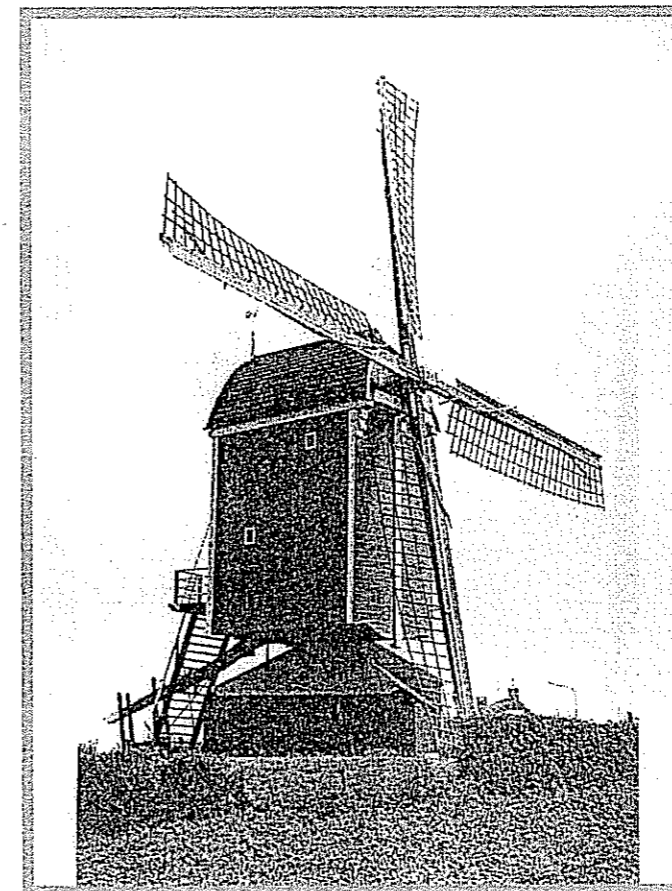


5. ábra:

Az ún. "bástya-szélmalom".

Sok ötletes megoldás, technikai részlet látható a metszeten: a lapátok tengelye az elfordítható kalaphoz van rögzítve, így a szélirányba forgatás megoldott; a hajtókar hivatott a kalap elmozgatására, melyet egy csörlős megoldás biztosít; a kőből megépített malomfeljáró a bejutást könnyíti; még a textília átfűzési technikája a lapátokon is nyomonkövethető a rajzon. Ez az egyik legősibb típusú vertikális szélmalom.

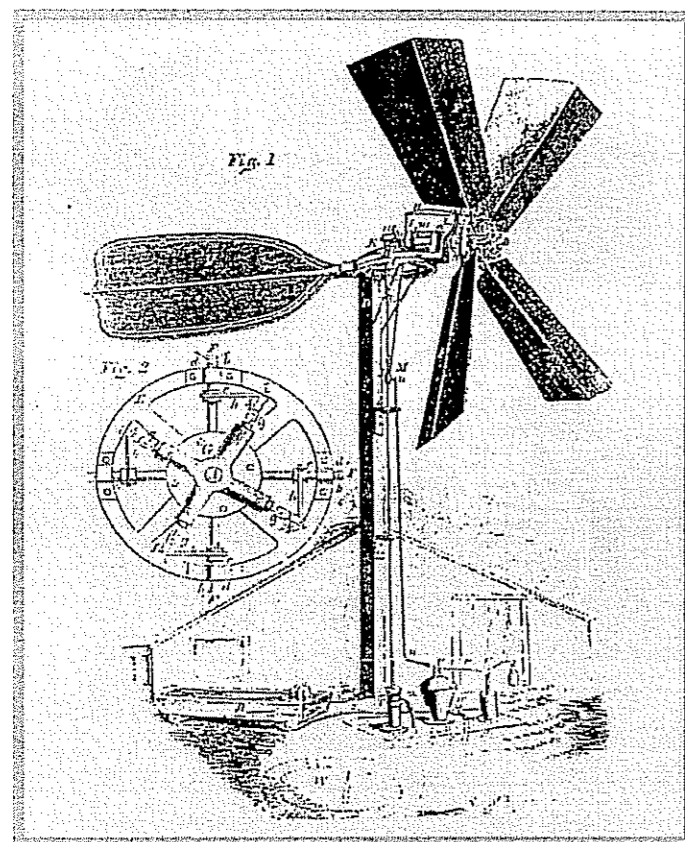
(A metszet készítője: Ramelli, 1588)



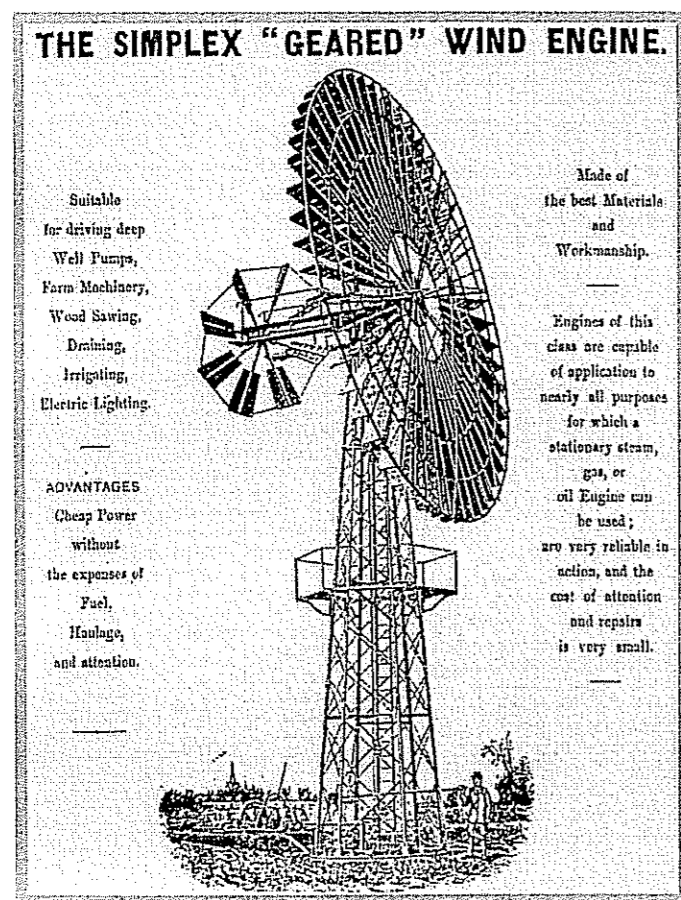
6. ábra:

Holland típusú ún. "strázsa-szélmalom".

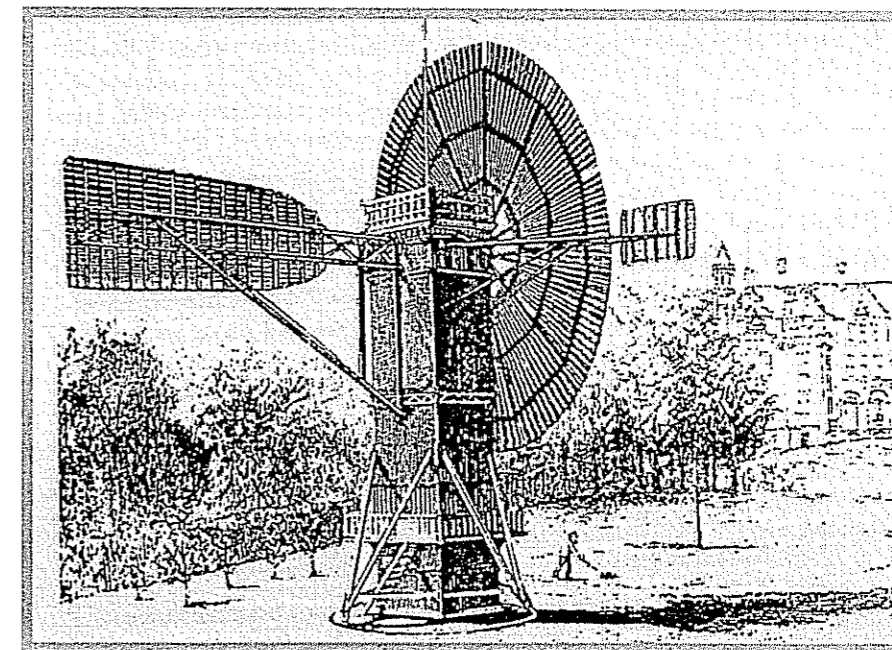
A jellegzetes négyzet alapú forgatható ház a vertikális szélmalom egyik még napjainkban is sokhelyen látható formája. A szélirányba forgatás megoldott e típusnál. (Fotó: Tholen sziget, Dél-nyugat Hollandia, 1990)



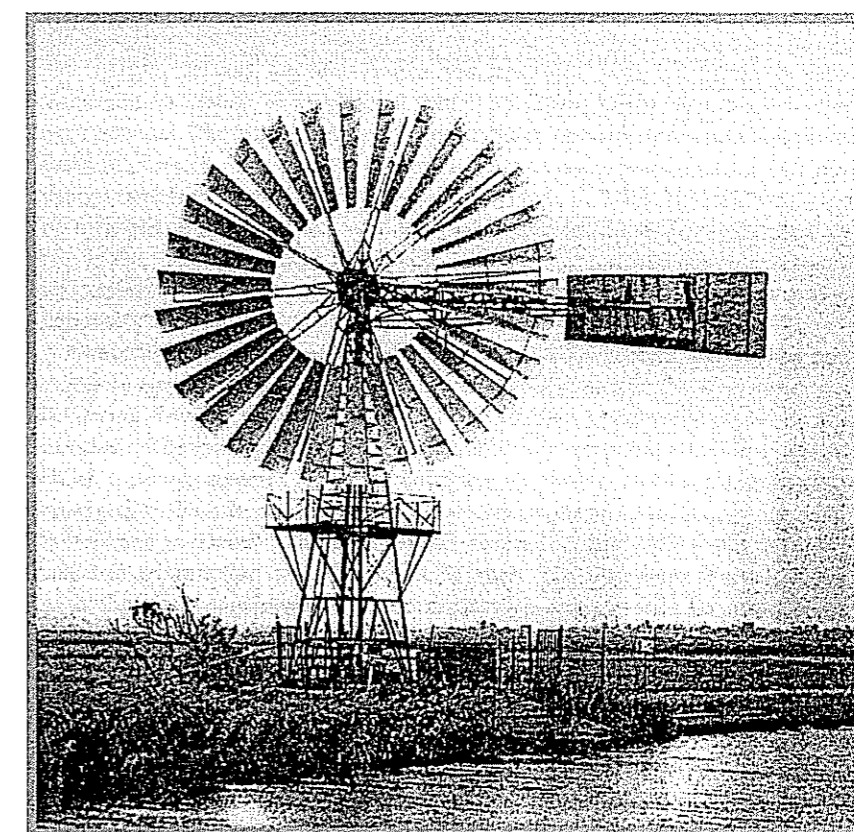
7. ábra:
Halladay (1854) tervei alapján amerikában megépített szélmalom, mely hidraulikai elvek felhasználásával házi vízmű rendszert működtet. Beépített önszabályozó rendszere védelmet adott a túl nagy szelek okozta károsodások ellen, valamint faroklemeze biztosította az automatikus szélirányba fordulást.



8. ábra:
Amerikai típusú, Angliában gyártott sokfunkciós szélmalom. Vízátemelésre, kutakból való vízkiemelésre, fűrés- és egyéb ipari gépek meghajtására, valamint elektromos áram generálására egyaránt alkalmas.
(Korabeli rajz: J. W. Titt katalógusából, Anglia, 1905)



9. ábra:
C. F. Brush első elektromos áramot generáló kísérleti szélmalma.
(Korabeli rajz: Cleveland, Ohio állam, USA, 1890-es évek eleje)

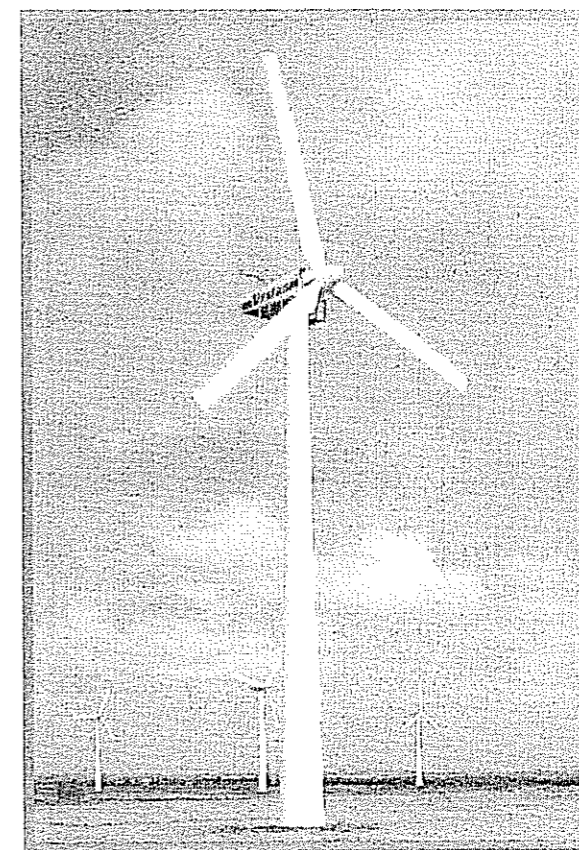


10. ábra:
Még Hollandiába is megfigyelhető az amerikai hatás, s a hagyományos szélalmokat helyenként felváltották a fent bemutatott típusok, melyek vízkiemelésre, vízátemelésre szolgálnak.
(Fotó: Zaan mellett, Hollandia, 1990)

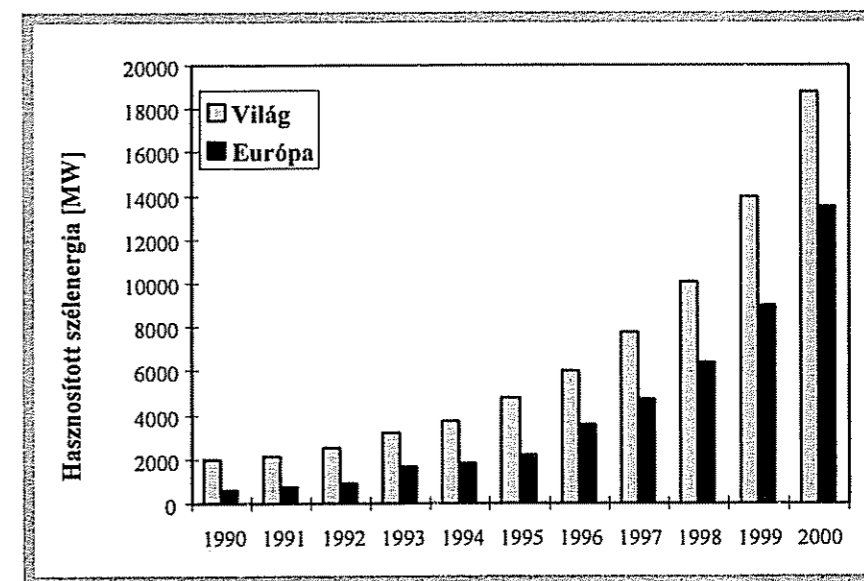
Szélgenerátorok, melyek elektromos áramot termelnek: Forradalmian új fejezet kezdődött az amerikai kontinensen és a világon a szélenergia hasznosítása területén, amikor C. F. Bush az 1890-es évek elején az amerikai Cleveland-ben (Ohio állam) megálmodta és megépítette az elektromos áramot generáló szélturbinát. Ennek az impozáns faszerkezetnek a korabeli rajzát mutatjuk be a 9. ábrán. Európában ezzel szinte egyidőben készült el a dán Paul la Cour professzor első (majd 1897-ben második) elektromos áramot adó szélgenerátora. E két remekmű több, mint húsz éven át üzemelt a dániai Askor közelében. A méltán nagy érdeklődéssel beindított gépek mezőgazdasági farmok elektromos árammal való ellátását biztosították, eleinte kísérleti, majd hamarosan operatív jelleggel.

Szélmalomok vasból, az energia tárolása, a szélgenerátorok új generációja, a szélenergia hasznosítás fellendülése: Az amerikai vas- és acélipar fejlődésével a szélgenerátorok anyaga és formája is változott. Egyre jobban elterjedtek a vasszerkezetű gépek, melyek közül egy korai és egy jelenleg is használatos típust a 8. ábrán és a 10. ábrán mutatunk be. Ahogy azt a Titt katalógusból kivett ismertető is hirdeti (8. ábra), már 1905-ben megvásárolhatóak voltak a többfunkciós vasszerkezetű szélgenerátorok, melyekkel mind öntözési, vízkiemelési, vízátelési, mind elektromos áram generálási feladatokat el lehetett látni. Ezek a soklapátos vasszerkezetek Európában is mindinkább felváltották a hagyományos fából és kőből épült szélmalomokat, s e század eleji vasmonstrum leszármazottjai mind a mai napig megtalálhatóak (10. ábra). A megrendelők részéről egyre intenzívebben jelentkezett az egyenletes energiatermelés igénye, azaz, hogy a szakaszosan keletkező, s általában nem teljes mértékben felhasznált energia tárolására is legyen mód. Ekkor jelentek meg a szélgenerátorok környezetében az akkumulátorok. Időszakosan a XX. század közepén úgy tűnt, hogy mivel nincs energiahiány a Földön, valamint a szélenergia relatíve drága, nem jó hatásfokú és szakaszosan kinyerhető, ezért talán a fosszilis források, valamint az atomenergia szükségtelessé teszi a szélenergia kiaknázását. Csak rövid ideig tartotta magát ez a nézet, és a 70-es, 80-as években eddig soha nem tapasztalt ütemű fejlődésnek indult, s szinte egy önálló iparágá vált ki magát a szélfarmok tervezése, telepítése, valamint a szélgenerátorok tervezése, gyártása, karbantartása (11. ábra). A szél gazdasági hasznosításának témaköre rendkívül összetett, s csak időben dinamikusan változó folyamatként tekinthető, így még arra a nagyon egyszerű kérdésre sem adható egyértelmű válasz, hogy egy adott térségben érdemes-e a szélenergia kiaknázása érdekében befektetéseket végezni (13. ábra).

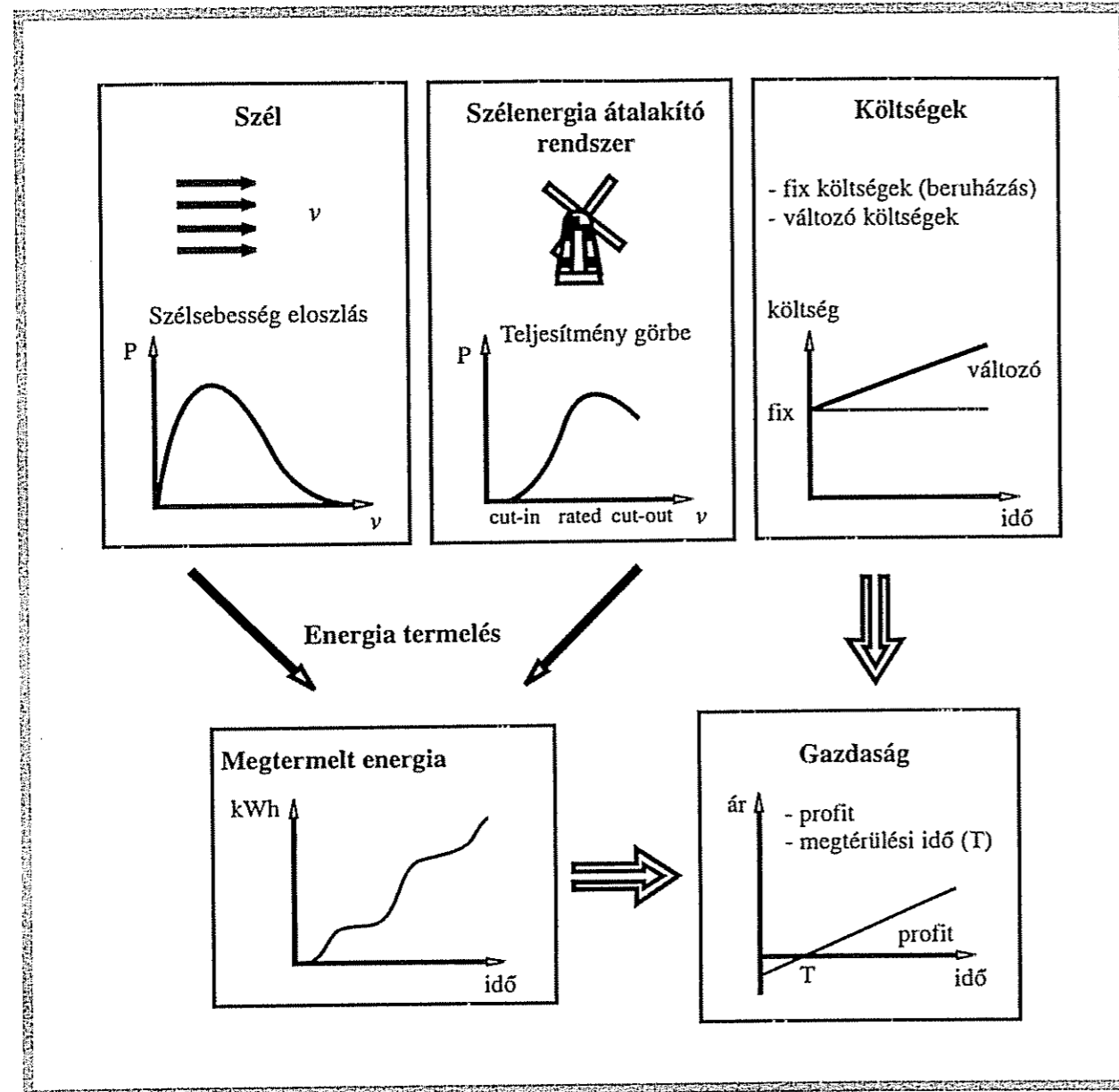
Összegezve e fejezet gondolatmenetét: azt mondhatjuk, hogy a szélenergia kitermelés elmélete és gyakorlata több évszázad alatt alakult ki, s jelenleg egy dinamikusan fejlődő iparág a világon. A szélenergiát átalakító berendezések működési elve, mérete, formája, teljesítménye, azaz lényegében minden paramétere megváltozott az elmúlt néhány évtizedben. Az 1990-2000 időszakban minden eddiginél nagyobb mértékben megnőtt a szélenergia termelés mennyisége mind Európában, mind az egész világon (12. ábra). Amennyiben van Magyarországnak gazdaságosan kinyerhető szélenergia kincse, úgy értelemszerűen nem lenne jó, ha az ország kimaradna e folyamatokból. E kérdés eldöntésére kell vizsgálatokat végezni olyan intézményekben, ahol jelen van az ipari lobby és politikai érdekektől mentes szakmai tudás.



11. ábra:
Újgenerációs elektromos áramot generáló szélturbinák farm.
(Típus: Vestas V47-660)



12. ábra:
Összehasonlító diagram, melyről a világ és Európa hasznosított szélenergia mennyiségeinek növekményei olvashatók le az 1990-2000 időszakra.
(Heier és Kleinkauf (2000) adatainak felhasználásával készített ábra)



13. ábra:

A szél gazdasági hasznosításának fontosabb komponensei és azok egymásrahatásának folyamatábrája.

A szélnek, mint megújuló természeti energiaforrásnak a gazdasági hasznosítását befolyásolják a helyi klimatikus szélviszonyok, az alkalmazott szélenergia átalakító rendszerek teljesítményparaméterei, melyek együttesen determinálják a kitermelhető összenergia mennyiségét. Ezen paraméterek kölcsönöshatásban vannak a beruházások költségráfordításaival, illetve az energia-értékesítés piaci feltételeivel.

3. Magyarország szélklímájának áttekintése, az Európai Szélatlasz hazai adatokkal való kiegészítése

Az Európai Unió finanszírozásában, a dán RisØ Nemzeti Kutatólaboratórium kiadásában a 80-as évek végén megjelent az Európai Szélatlasz (Troen és Petersen, 1989). Ez a közel 700 oldalas kiadvány országonkénti összesítésben tartalmazza a térség szélklíma adatait. Az adattár, illetve a grafikonok sorozatai elsősorban a szélenergia hasznosítás szempontjából lényeges információkat tartalmaznak. Magyarország – az összes kelet-európai országgal együtt – kimaradt ebből az atlaszból. Ezt a hiányt igyekeztünk pótolni a kutatási projektünk első fázisában, s az Európai Szélatlással megegyező módszertant alkalmazva 13 magyarországi állomásra előállítottuk ugyanazokat a paramétereket, melyeket az atlasz a többi európai ország mérőhelyeire mutat be. Ezzel lehetővé vált az adatok összehasonlítása, a szélpotenciálok, illetve azok napi, évi menetének paralel vizsgálata.

3.1 Szélklíma vizsgálatok, magassági korrekció, változékonyság térben és időben

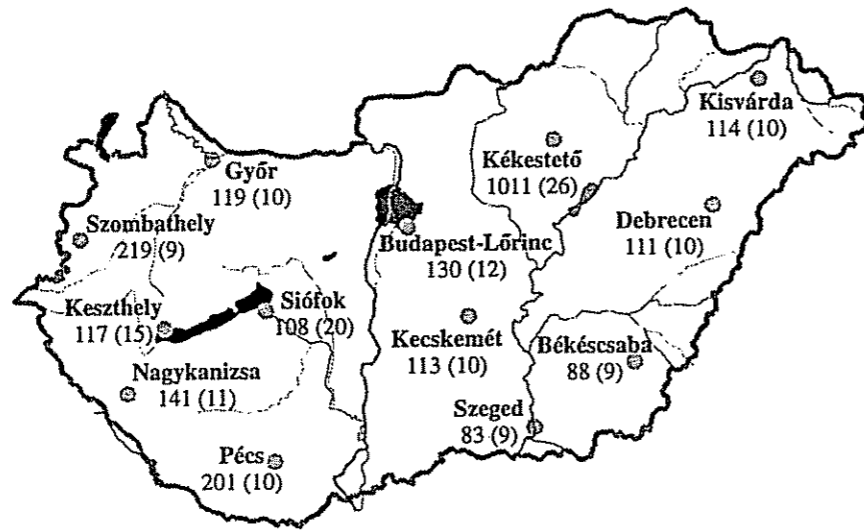
Megvizsgáltuk Magyarország 13 állomásának szélviszonyait (Kovács, 1996), hogy pontosabban leírassuk szélklímájukat. 5 éves (1968-1972), órás adatsort használtunk fel, mely napi 24 szélirány és szélsebesség adatot szolgáltat. A szélirány értékek 16 szektoros beosztással szerepelnek, a szélsebesség adatok pontossága 0,1 m/s. (Az adatok forrása: dr. Tar Károly, Debreceni Egyetem, aki ezt az adatbázist 18 évvel ezelőtt a KMI igazgatójától kapta.) A 14. ábrán a vizsgálatban szereplő állomások földrajzi elhelyezkedését mutatjuk be. Az állomások neve alatti számok a tengerszint feletti magasságot és a mérési szint magasságát (zárójelben) mutatják. Mint minden nyers mérési adatot, a felhasznált adatsorokat is előzetes adatkontrollnak vetettük alá. A fő problémát a mérési magasságok eltérései okozták. Mivel a legtöbb helyen a mérés tíz méteren történt, ezért az összes adatot erre a szintre korrigáltuk. A szélprofil törvényekben szereplő mennyiségek nem voltak ismertek, ezért csak empirikus korrekciós eljárás jöhetett szóba. A meteorológiai gyakorlatban általánosan elfogadott félempirikus magassági korrekciót a Mezősi és Simon (1981) formula alapján végeztük:

$$v_h = v_{10} (0,223 + 0,656 \lg(h + 4,75)) \quad (3.1)$$

Tar (1991) megerősíti ezen formula használatát a sarvasi toronymérések alapján végzett ellenőrző vizsgálataival.

Megállapítottuk, hogy a mérőhelyek által reprezentált területeken az éves átlagos szélsebesség 2,29 m/s (Kisvárdá) és 4,24 m/s (Szombathely) között változik. Hazánk így az európai szélosztályozás kategóriáit követve mérsékelt szél tartományba sorolható. Az átlagos szélsebességi értékekben viszonylag kicsi térbeli változásokat regisztráltunk. A legszelesebb vidék az északnyugati országrész, a legkevésbé szeles délnyugat és északkelet. A szélsebesség szórásértékeinek elemzésénél látható, hogy nem feltétlenül a nagyobb szélsebesség értékekhez tartoznak a nagyobb szórások. Az átlagértékek az országban az 1,47 m/s (Kecskemét) és 3,59 m/s (Szombathely) sebességek között mozognak. A kinyerhető szélenergia becsléséhez köbös mennyiségeket használunk, s ezek várakozásainknak megfelelően sokkal nagyobb változékonyságot mutatnak. A köbös szélsebességeknél a különbségek: 33,46 m³/s³

(Kecskemét) és $316,12 \text{ m}^3/\text{s}^3$ (Szombathely). Ezen mennyiségek már a szélsébség eloszlásáról is adnak némi képet, hiszen ritkán előforduló nagyon nagy szelek a köbös átlagot jelentősen megnövelik, míg az átlagos szélsébséghez csak kicsit járulnak hozzá. Így lehetséges, hogy míg Kisvárdán az átlagos szél kisebb, mint Kecskeméten, a köbös átlagok jóval nagyobbak. A sorból Siófok és Szombathely értékei ugranak ki, melyet az időnként előforduló viharos erejű szellőkéseknek tulajdoníthatunk.



14. ábra: Az vizsgálatban szereplő állomások földrajzi elhelyezkedése. Az állomás neve alatti számok az állomás tengerszint feletti magasságát és a mérési szint felszínétől mért magasságát (zárójelben) mutatják.

Meghatároztuk a szélsébség és köbének éves és napi meneteit, melyből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a szélsébségnek tavaszi (március-április) maximuma és kora őszi (szeptember) minimuma van; valamint, hogy a legmelegebb órákban legerősebbek a szelek. A Dunántúlon és a középső országrészben az északi és északnyugati szelek, míg a keleti országrészben az északi és északkeleti szelek a leggyakoribbak. Az 1-2 m/s-os szelek átlagos éves tartama a legnagyobb (2000-2500 óra), azaz a gyenge szelek a legjellemzőbbek országunkra. A legnagyobb átlagos éves energiát a 4-8 m/s-os szelek hordozzák ($40-70 \text{ kWh/m}^2$ 10 m-en). A szélsébség havi anomáliái általában 1 m/s-on belül maradnak, azaz kiegyenlítettnek mondhatóak. Megvizsgáltuk a fajlagos rendelkezésre álló széltejesítményt 10 és 50 m-es magasságban. 10 m-en átlagosan ez az érték $30-50 \text{ W/m}^2$ körül van, míg 50 m-en ennek csaknem háromszorosa.

3.2 Az Európai Szélatlasz hazai adatokkal való kiegészítése

Egy-egy állomás szélklíma paramétereinek összefoglalását - az Európai Szélatlással azonos formátumban - egy-egy külön oldalon mutatjuk be. Az egész vizsgálat során különösen ügyeltünk arra, hogy mind az alkalmazott módszerekben, mind a megjelenítési formában pontosan kövessük az Európai Atlaszt, hogy ne csorbuljon az összehasonlíthatóság kritériuma. Az általunk feldolgozott hazai 13 állomásra egy oldalas klíma lapot készítettünk, melyeken hat diagram sorozaton tüntettük fel a bemutatni kívánt információkat. Az oldalak tetején kiemelten megtalálható az állomás neve, az ott mért éves átlagos szélsébség (m/s), annak szórása (m/s), valamint a

szélsébségek köbös átlaga (m^3/s^3). Az ezt követő hat diagram sorozaton az alábbiakban leírt paraméterek találhatóak meg.

Az állomásonként előállított szélklíma diagramok leírása:

1. Átlagos évi menetek:

- a: mért havi átlagos szélsébség (m/s),
- b: mért szélsébségek havi köbös átlagai (m^3/s^3)*.

2. Átlagos napi menetek:

- c: júliusi átlagos szélsébségek óras értékei (m/s),
- d: januári átlagos szélsébségek óras értékei (m/s),
- e: júliusi átlagos köbös szélsébségek óras értékei (m^3/s^3)*,
- f: januári átlagos köbös szélsébségek óras értékei (m^3/s^3)*.

3. A szélrózsa:

- g: a szél irány szerinti gyakoriságai (%),
- h: irányonkénti hozzájárulás az átlagos szélsébségekhez (%),
- i: irányonkénti hozzájárulás az átlagos köbös szélsébségekhez (%).

4. A szélsébség tartam és fajlagos energia diagram:

- j: szélsébségek időtartam szerinti megoszlása (óra),
- k: a szélsébségekhez tartozó átlagos éves fajlagos szélenergia (kWh/m^2).

5. Havi anomáliák:

- l: havi átlagos szélsébség anomáliák (m/s),
- m: havi átlagos köbös szélsébség anomáliák (m^3/s^3)*.

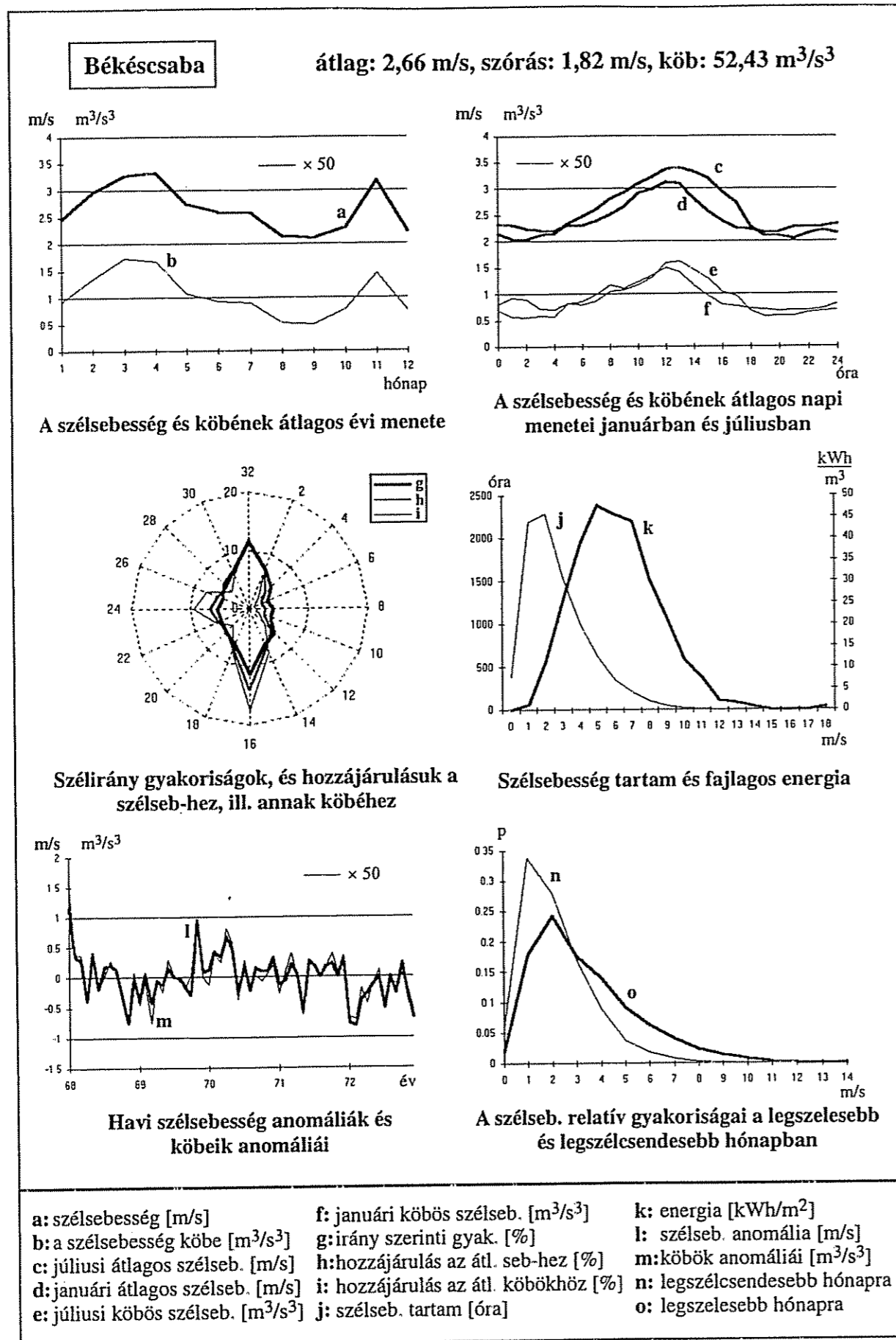
6. Szélsébség relatív gyakoriságai a legszelesebb és a legszélcsendesebb hónapban:

- n: a legszélcsendesebb hónap szélsébség eloszlása,
- o: a legszelesebb hónap szélsébség eloszlása.

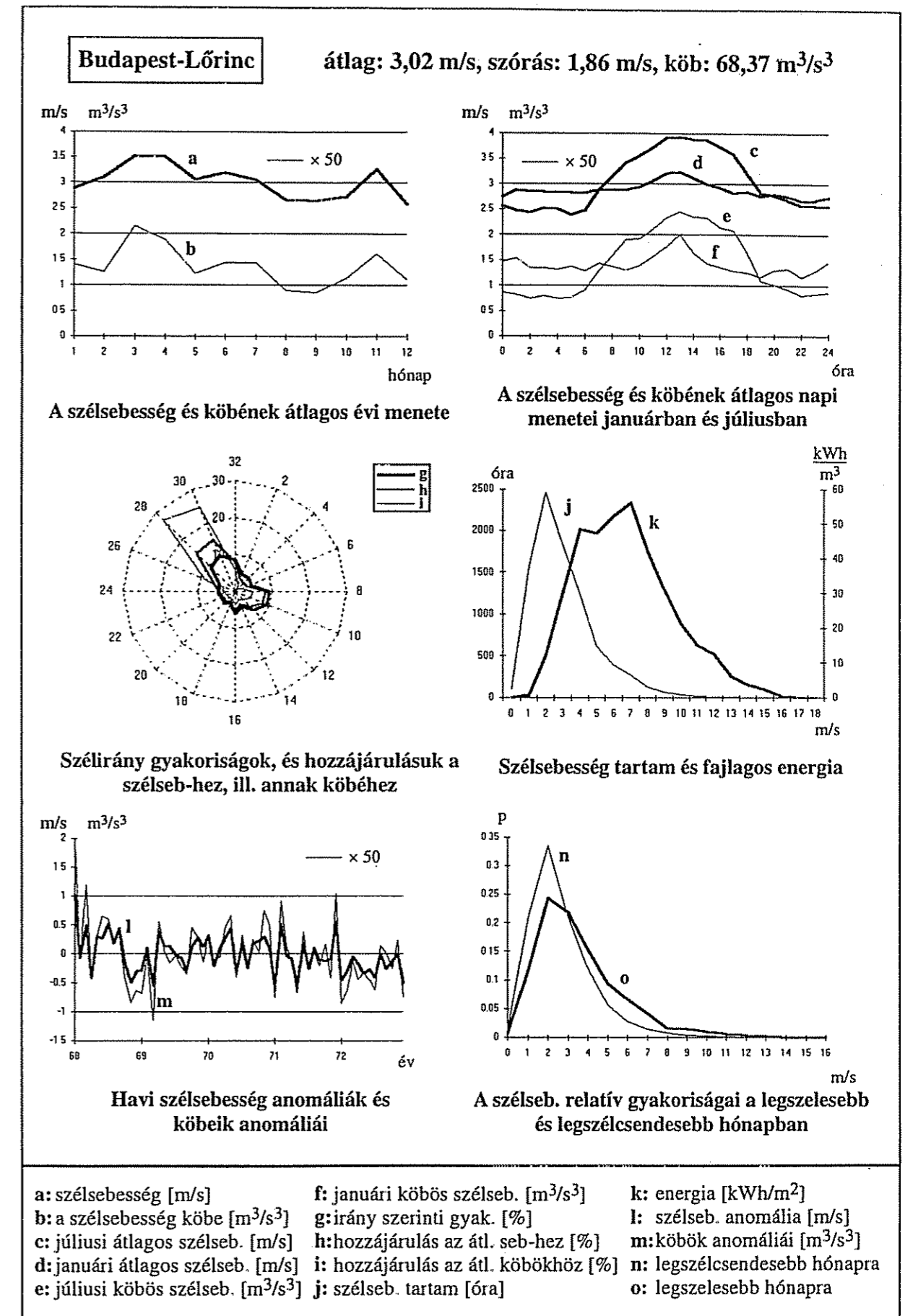
*(leosztva egy 50-es skálafaktorral).

A 15-27. ábrán a 13 állomás szélklíma lapjait mutatjuk be, és az eredményeket az alábbiakban részletezzük.

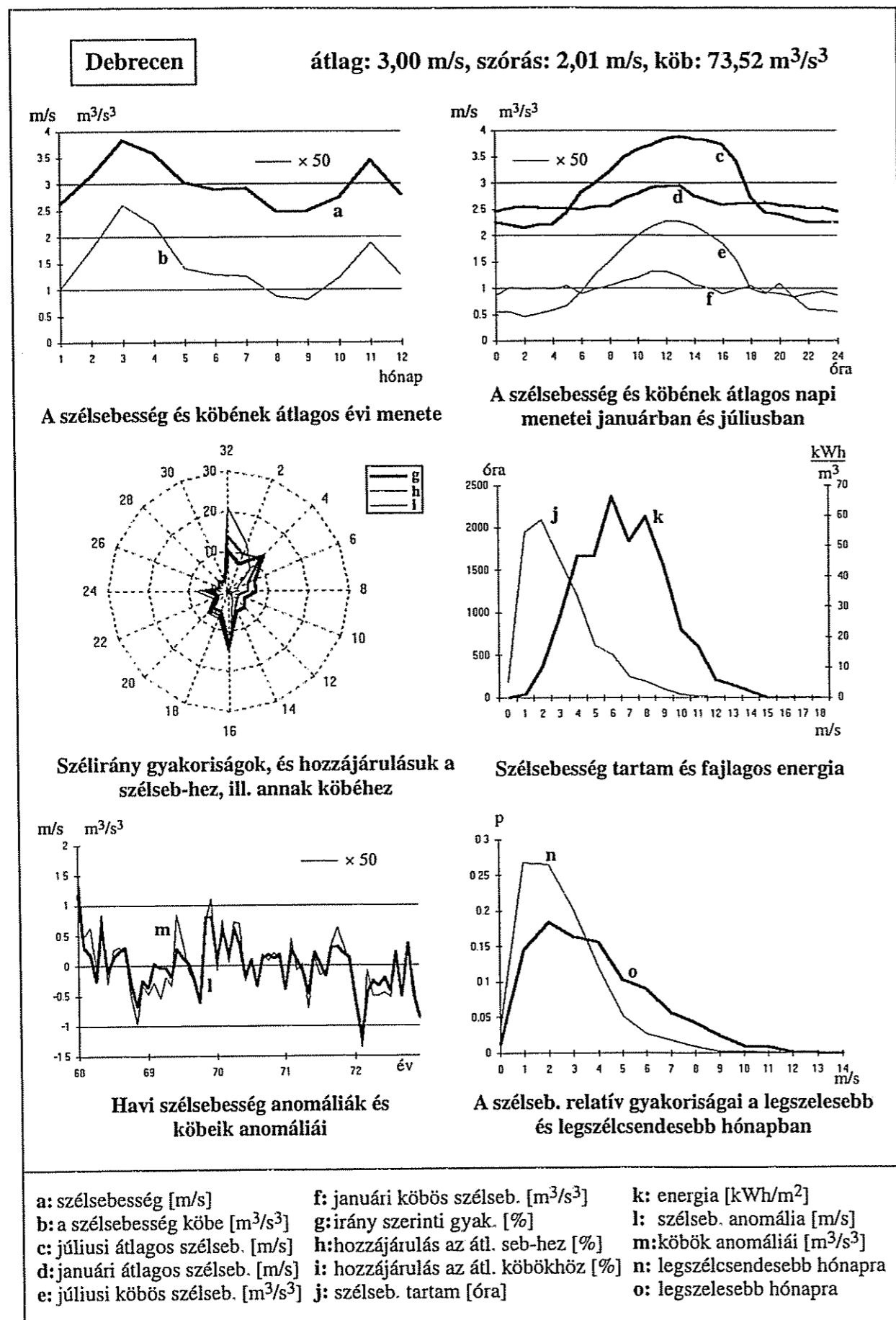
A szélsébség és köbének átlagos évi menete: A szélsébség és annak köbé határozott évi menetet mutat télvégi, kora tavaszi maximummal, későnyári, kora őszi minimummal. Ez a tavasszal megerősödő ciklontevékenység következménye. A legszelesebb és a legszélcsendesebb hónap közötti szélsébség különbség általában 1-1,5 m/s körül van. Ez közel 30-40 %-os ingadozásnak felel meg az éves átlaghoz képest, ami jelentősnek mondható. A köbös átlagok évi menete még sokkal inkább kifejezett, itt $50 \text{ m}^3/\text{s}^3$ -os eltérések is előfordulnak, ez csaknem 100 %-os relatív különbséget jelent. A két mennyiség a legtöbb állomáson szinte teljesen együtt halad. Érdekes megemlíteni Siófokot, ahol a többi állomástól eltérő az évi menet. Itt április-júliusi maximum és téli minimum a jellemző. Ez feltehetően a tóparti elhelyezéssel és az intenzívebb konvektív tevékenységgel magyarázható, amely nyár elején maximális.



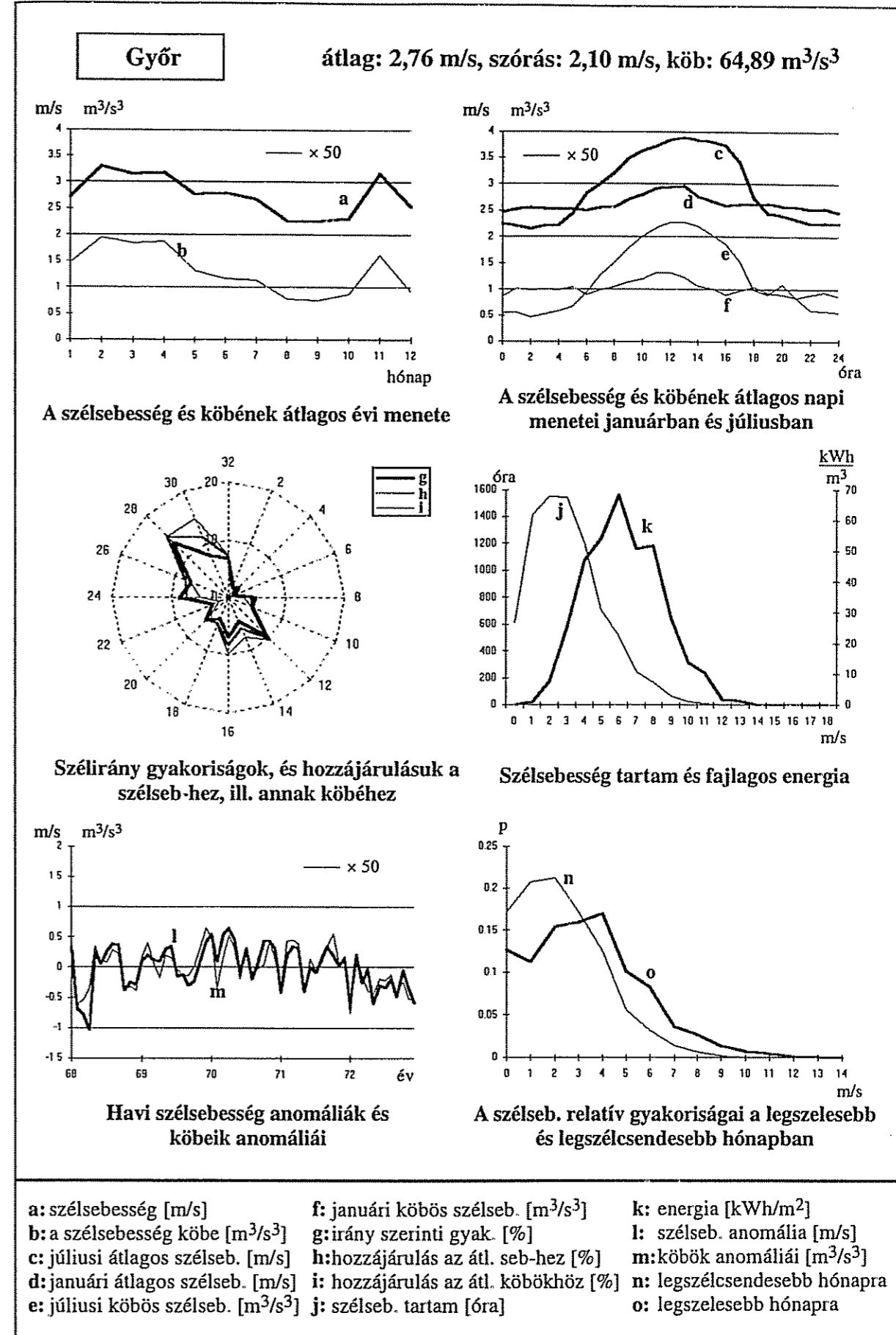
15. ábra: Békéscsaba állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



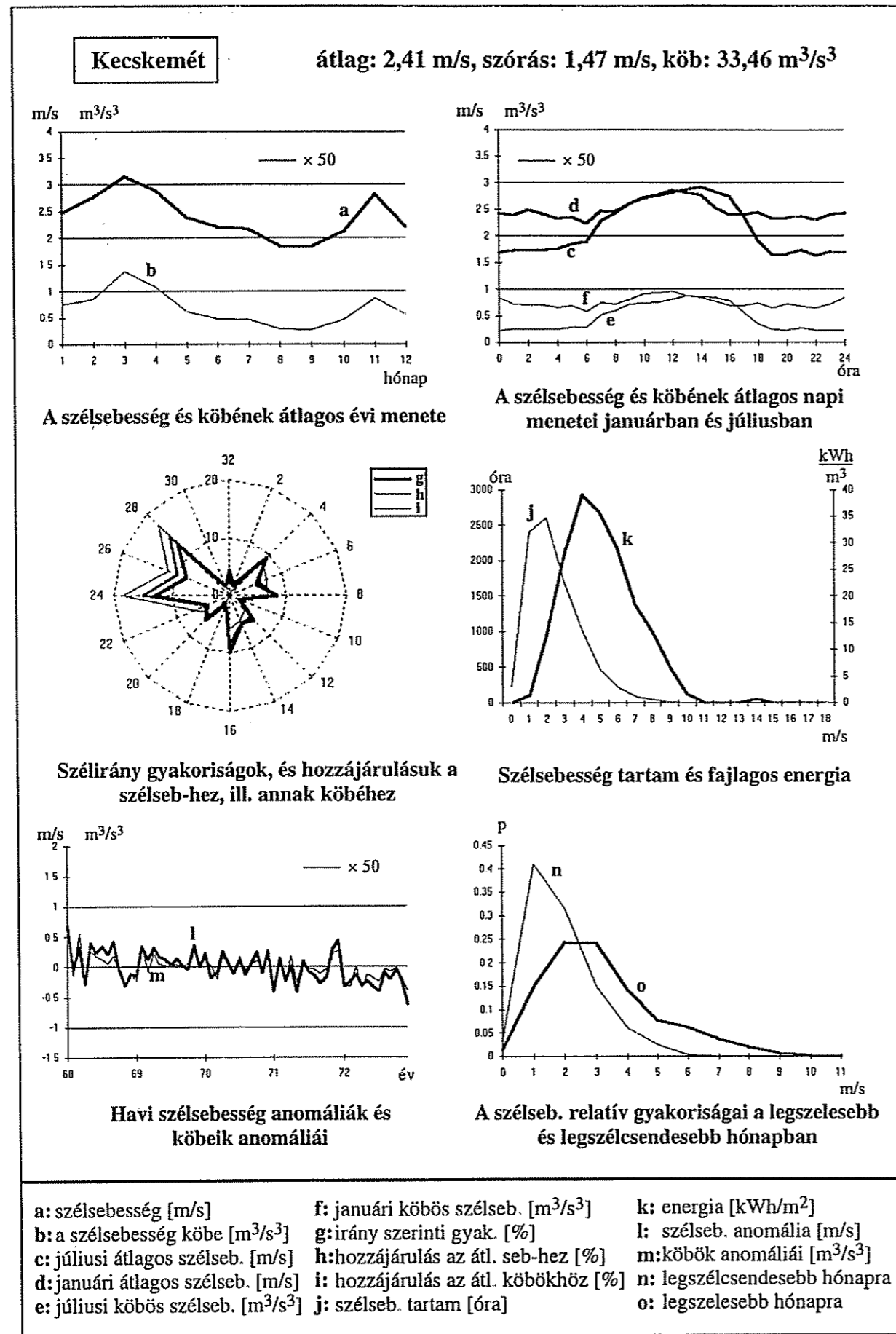
16. ábra: Budapest-Lőrinc állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



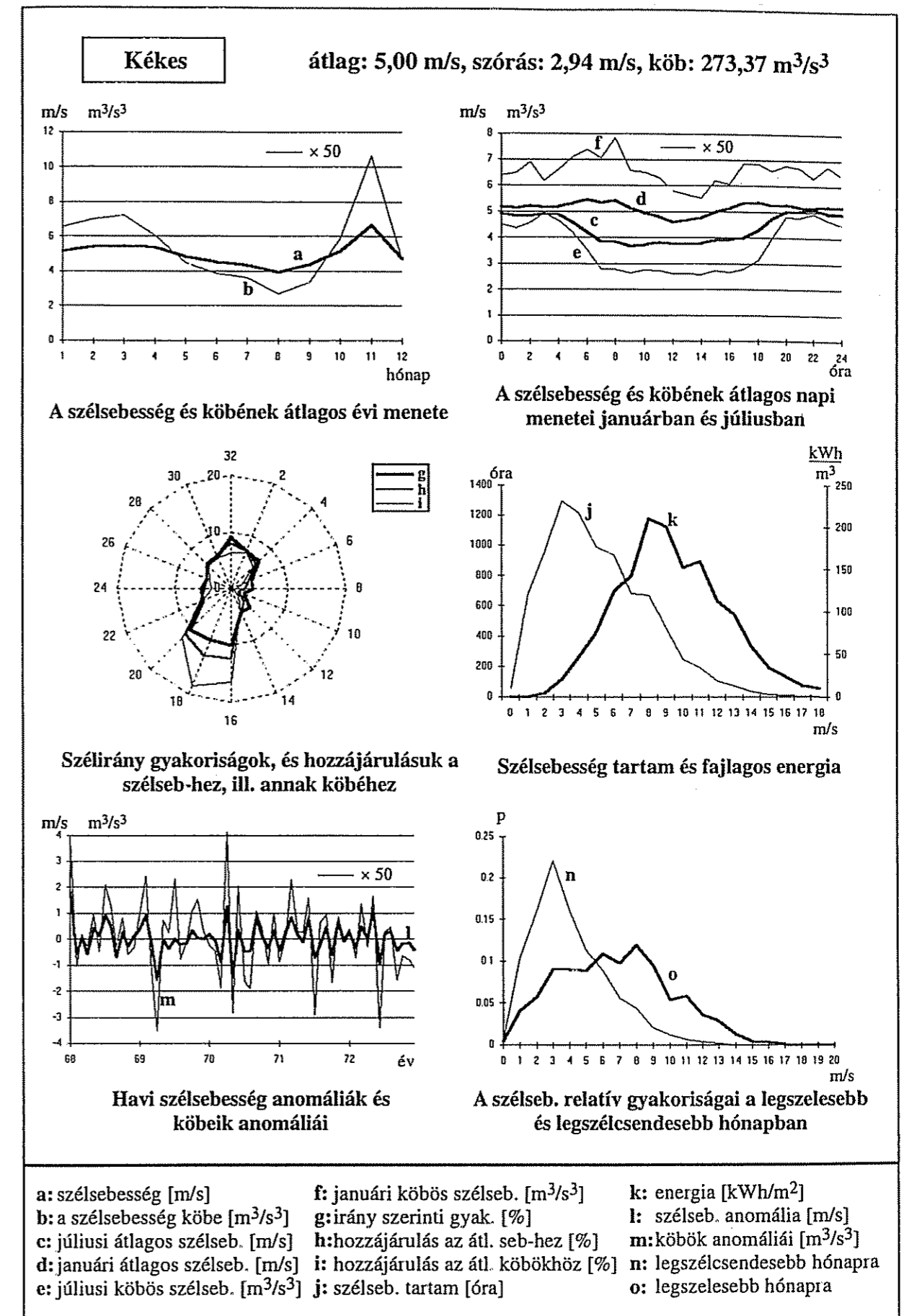
17. ábra: Debrecen állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



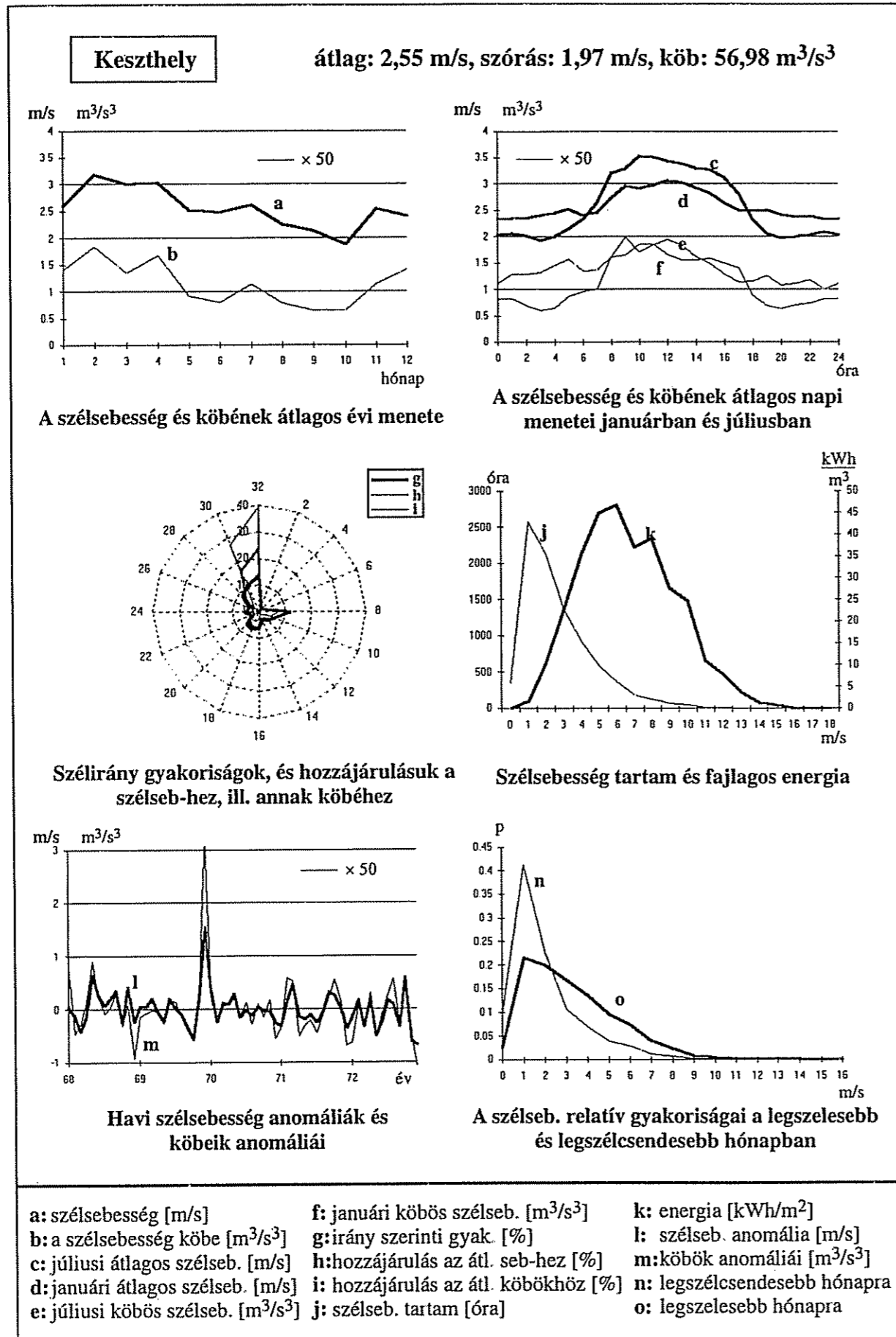
18. ábra: Győr állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



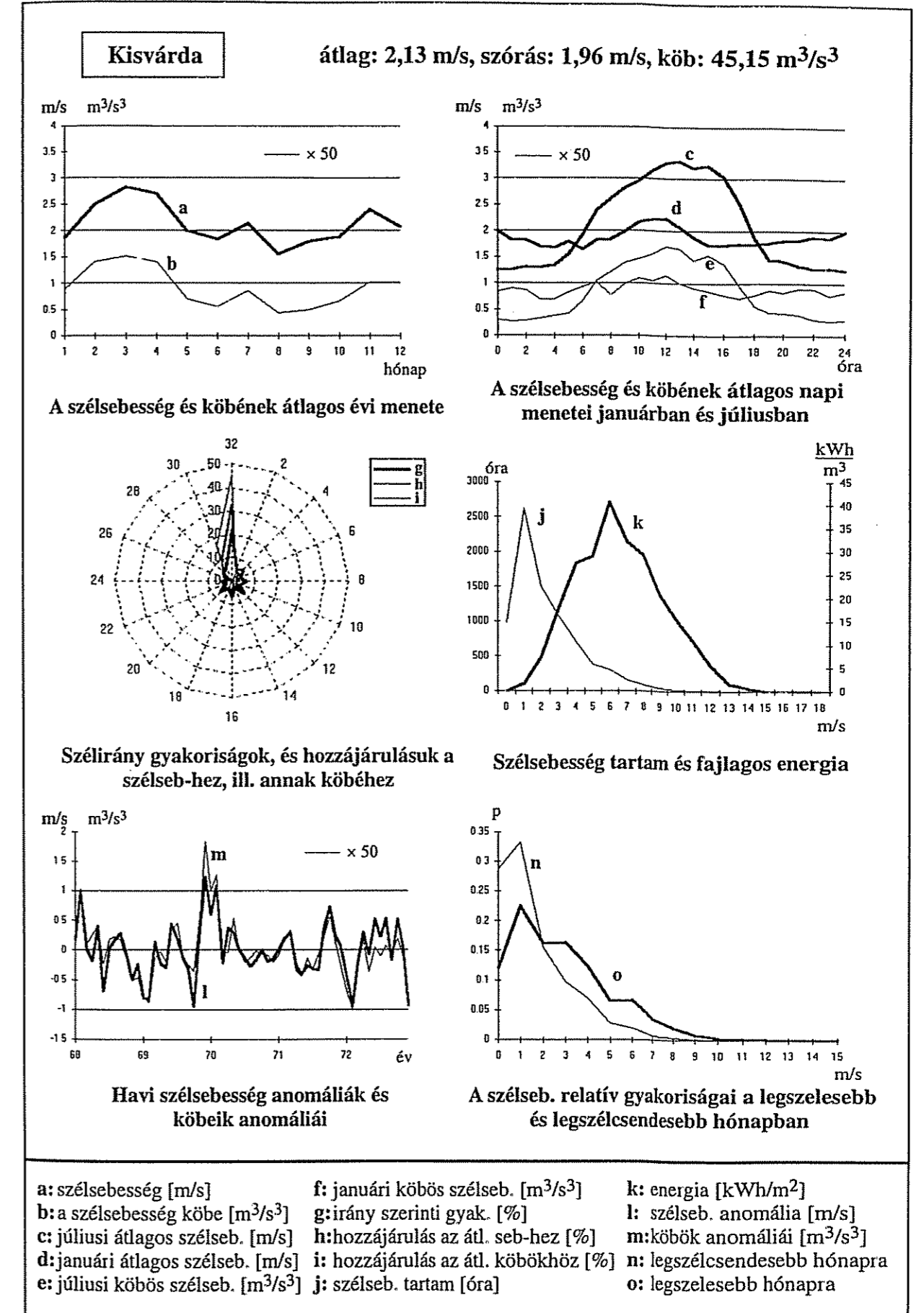
19. ábra: Kecskemét állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



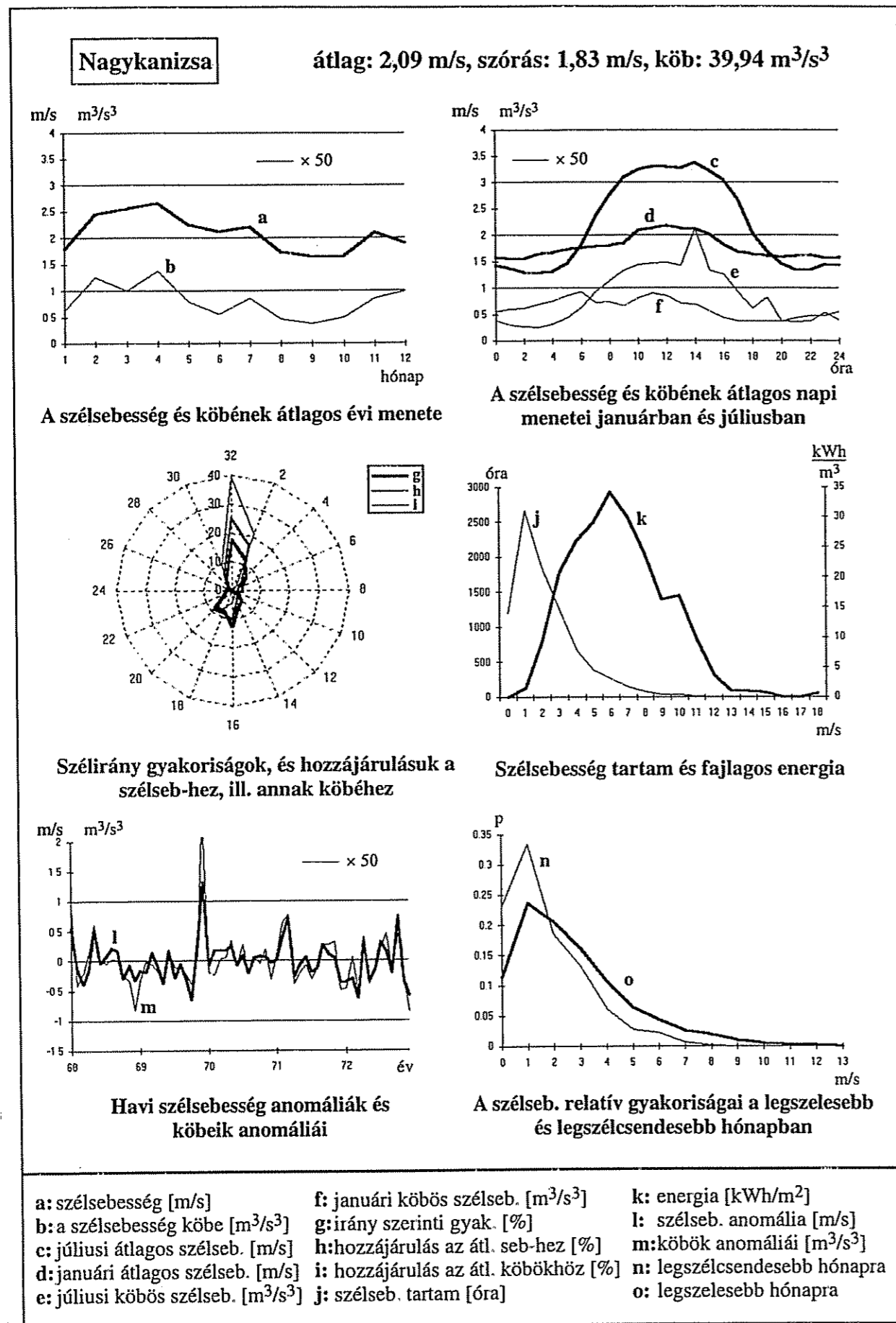
20. ábra: Kékes állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



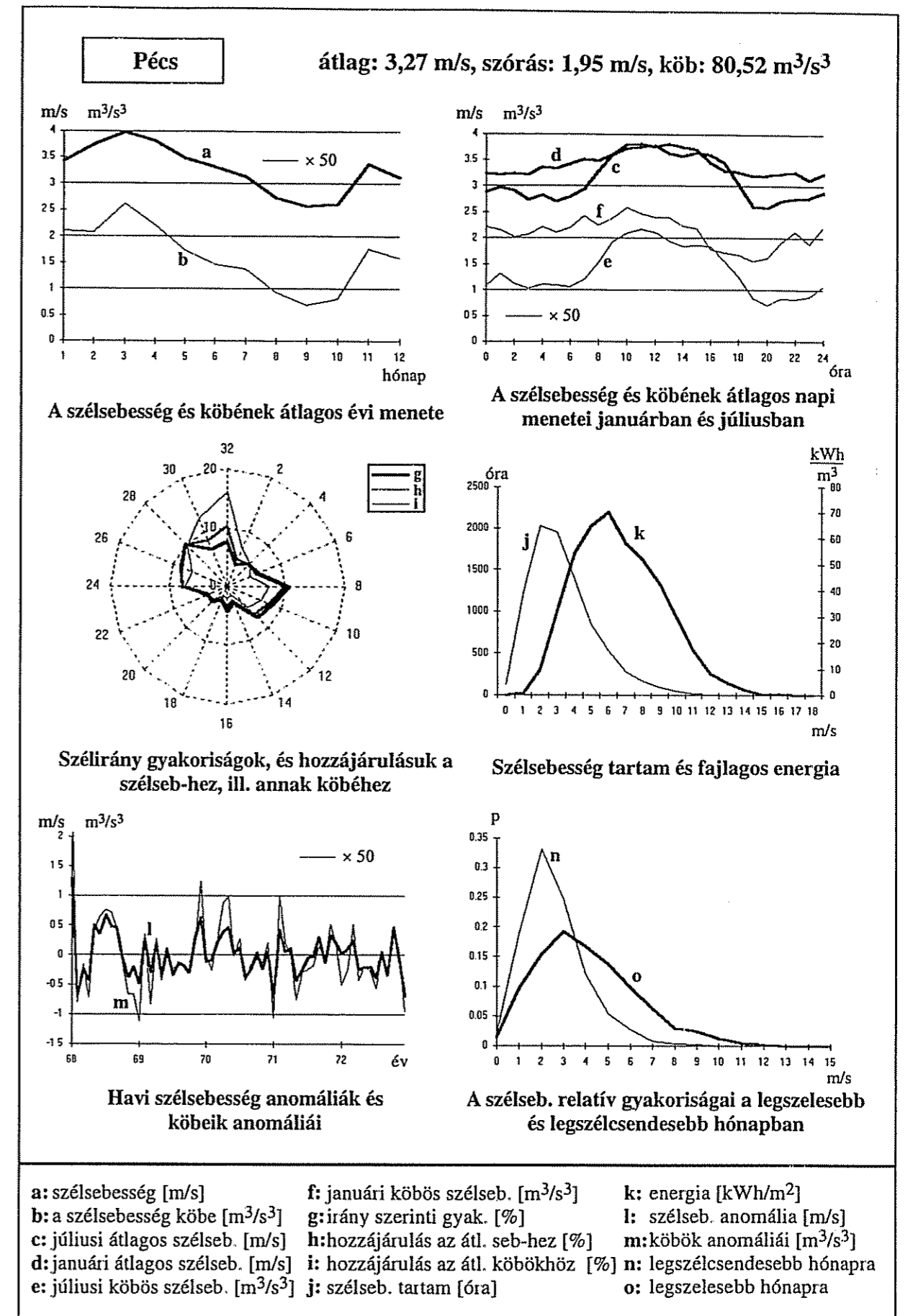
21. ábra: Keszthely állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



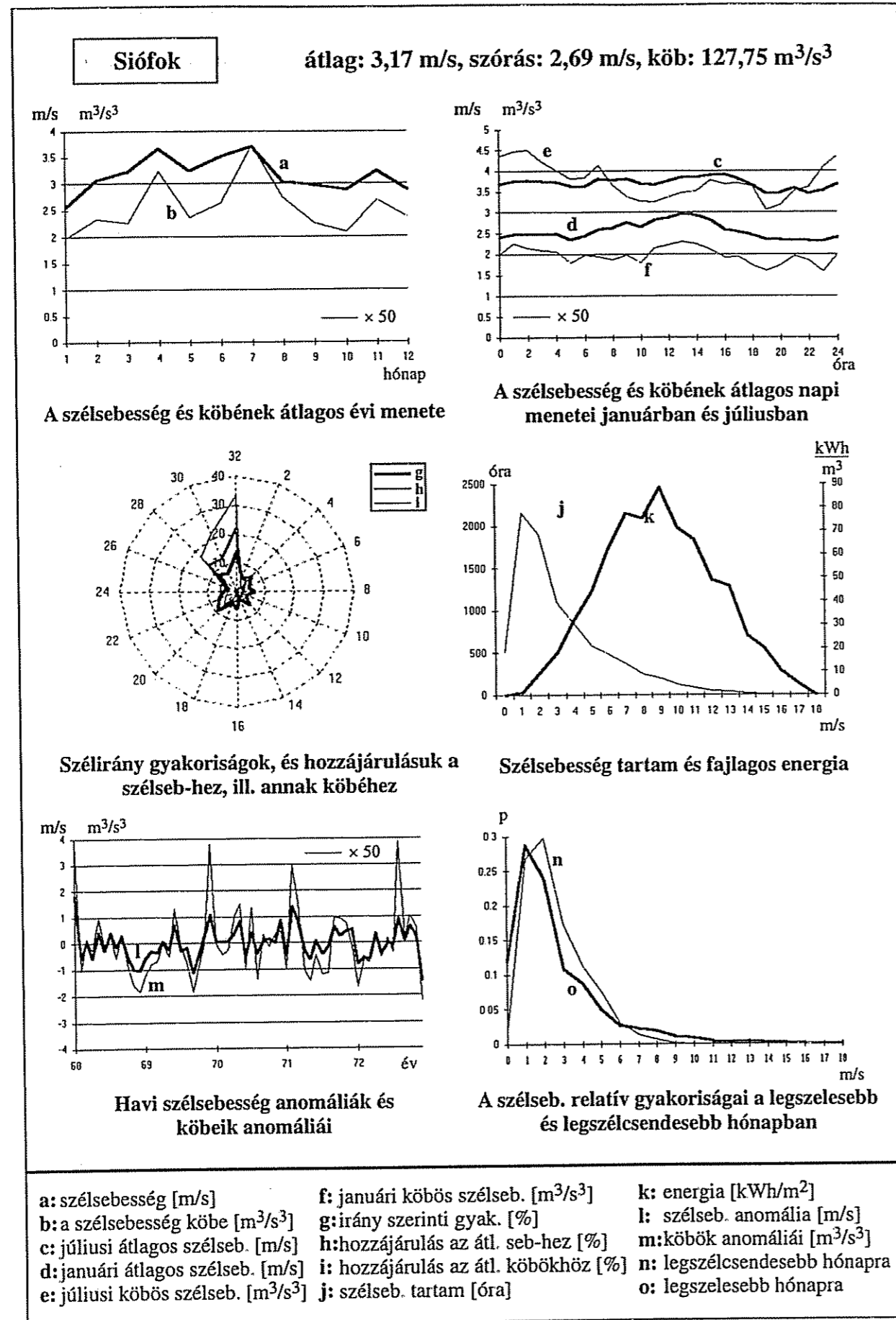
22. ábra: Kisvárdá állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



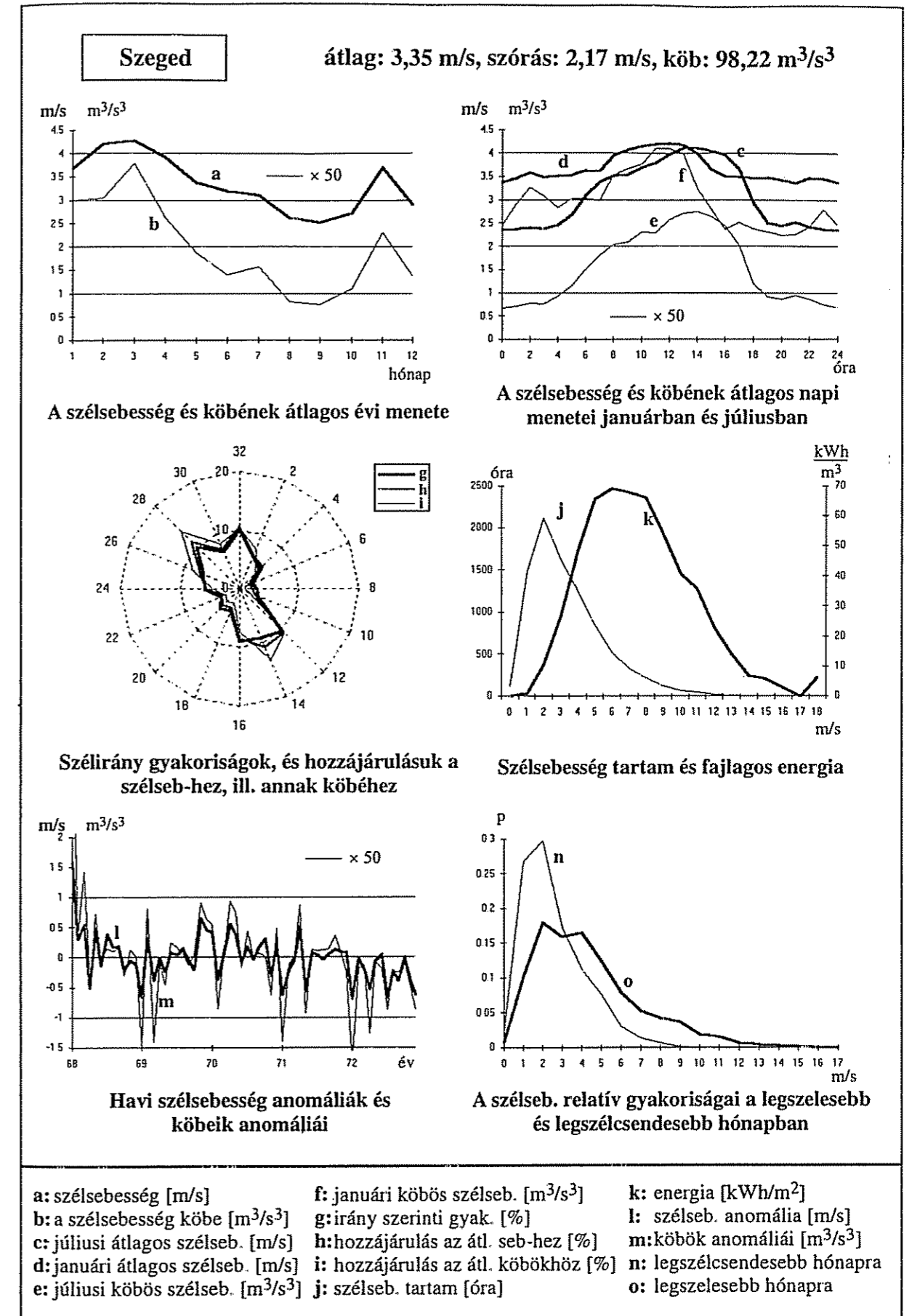
23. ábra: Nagykanizsa állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



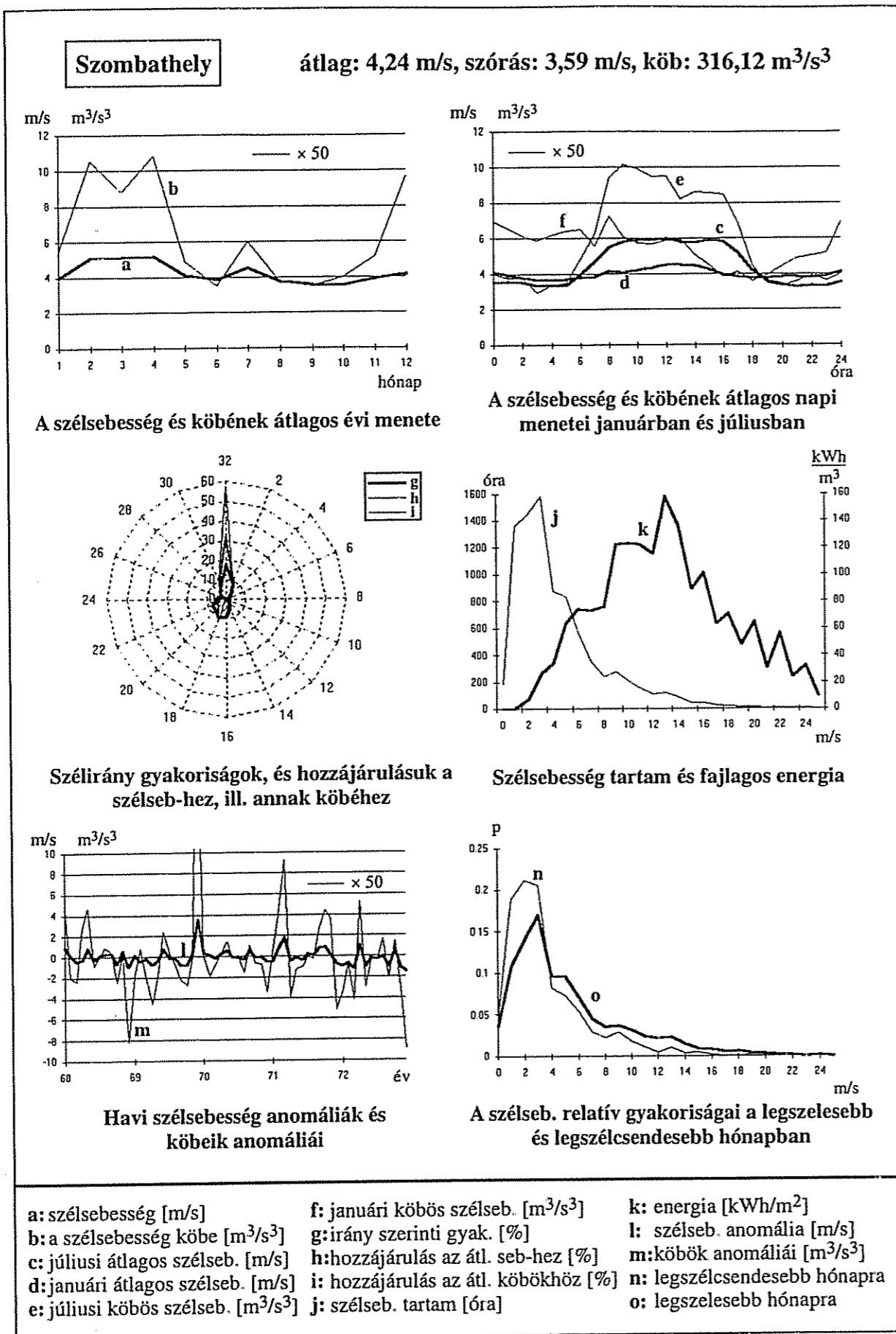
24. ábra: Pécs állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



25. ábra: Siófok állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



26. ábra: Szeged állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.



27. ábra: Szombathely állomás szélklíma és szélenergetikai adatai.

A szélesség és köbének átlagos napi menetei januárban és júliusban: Határozott napi menetet mutat a szélesség és köbe. A hőmérséklettel való szoros kapcsolatot erősíti az is, hogy júliusban sokkal nagyobb a nappal és éjjel mért szélesség értékek közötti különbség, mint januárban. Olyannyira, hogy egyes állomásokon (Debrecen, Győr, Kecskemét, Kisvárd, Nagykanizsa és Szeged) a nappali maximum az éjjeli minimum kétszerese is lehet. Megfigyelhető, hogy a januári maximumok általában délben, míg a júliusi maximumok ettől kissé később, körülbelül 14 órakor jelentkeznek. A szélesség köbének menetei itt is teljesen hasonlóan futnak. Siófok és Kékestető azonban itt is kilóg a sorból: előbbi esetén alig figyelhető meg napi menet, utóbbin pedig nappal van a minimum. A kékestetői eredmény (ez 26 m-es felszín feletti magasságra vonatkozik) egyezik a korábbi irodalmi megállapításokkal (Houghton, 1985), vagyis a felszíntől távolodva a szélességnek egyre inkább fordított a napi menete: éjjeli maximum, nappali minimum a jellemző.

Szélirány gyakoriságok: A legváltozatosabb képet a szélirányok eloszlása mutatja. A teljesség igénye nélkül áttekintjük ennek legjellemzőbb vonásait néhány állomást kiemelve. Szombathely szélirányeloszlás ábráját tanulmányozva azonnal szembeötlik az északi szelek dominanciája. Ezek 18 %-os relatív gyakoriságot mutatnak. A legfeltűnőbb az, hogy a köbös szélességek csaknem 60%-a származik ebből az irányból. A Dévényi-kapun beáramló levegő itt déli irányban folytatja útját. Ez Nagykanizsa és Keszthely szélirányeloszlásában is megfigyelhető. Jól mutatja ennek a kapunak az áramlómódosító hatását Győr is, ahol északnyugat-délkeleti irányú a legjellemzőbb áramlási kép. Siófokon a leggyakoribbak az északi, északnyugati és a délnyugati szelek. A legerősebbek északi és északnyugati irányból törnek a Balaton keleti medencéjére. A keleti országrészben az áramlást a Keleti-Beszkidék alacsonyabb vonulata is erősen befolyásolja, itt az északi és északkeleti szelek a leggyakoribbak (Debrecen, Kisvárd). Szegeden és környékén egy északnyugat-délkelet irányú áramlási tengely jellemző. Összegzésképpen elmondhatjuk, hogy a Dévényi-kapun beözönlő levegő a nyugati országrészben még főként déli irányba halad, míg az ország belsejébe már északnyugati irányból érkezik, s innen tovább egészen déli határainkhoz. Az északkeleti kapun beáramló levegő ezzel valahol a délkeleti országrészben egyesül.

Szélesség tartam és fajlagos energia: Először a szélességek átlagos éves időtartamának jellemzőit tekintsük át. Megállapítható, hogy a legtöbb állomáson az 1-3 m/s sebességű szelek a maximális gyakoriságúak, átlagosan 2000-2500 órán át tartanak, mely az évnek csaknem egynegyede. A szélcsendes (< 0,5 m/s) órák száma nagyon változó, a legkevesebb Kékestetőn (56), majd Budapest (98) következik. A legtöbb Nagykanizsán, itt majdnem 1200 óra. Látható, hogy a legtöbb állomáson 10 m/s-nál nagyobb szelek tartama éves átlagban nagyon kicsi, általában 10 óra alatt van. Kivétel ez alól Kékestető, Siófok és Szombathely, ahol ennél sokkal nagyobb értékek jellemzőek. Ez utóbbi állomáson még a 20 m/s-os szelek is 13 órán át tartanak egy évben (öt éves átlagban).

Nagyon fontos a szélenergia hasznosítás szempontjából az, hogy az adott hely szélklímájának megfelelően legyen megtervezve, de legalább kiválasztva a telepítendő szélgenerátor. Ehhez nyújt óriási segítséget az egyes szélességekben levő rendelkezésre álló fajlagos energia mennyisége egy évre vonatkoztatva. A görbék az egyes állomásokra nagyon különbözőek, mind a maximumok helyében, mind a

maximumok értékében. Annyi azonban elmondható, hogy általában a legnagyobb energiát a 4-8 m/s-os szelek hordozzák. Ezek már elég erősek és még elég gyakoriak ahhoz, hogy számottevő fajlagos energiát képviseljenek (átlagosan 40-70 kWh/m²). Érdemes kiemelni Szombathelyt, ahol a maximumot a 13 m/s-os szelek jelentik, melyek átlagosan 130 órán át fújnak és 158 kWh/m²-es fajlagos energiájuk van. A másik figyelemre méltó hely Kékestető. Itt 8 m/s-nál található a maximális energia (220 kWh/m²).

Havi szélsősebesség anomáliák és köbeik anomáliái: A szélsősebesség havi anomáliáit megfigyelve megállapíthatjuk, hogy elég kicsik a fluktuációk. Az eltérések legnagyobb részben 1 m/s-on belül maradnak, tehát azonos nagyságrendűek az éven belüli és a napi változásokkal. Ahol nagyobb az átlagos szélsősebesség, ott nagyobbak a fluktuációk is, így pl. Kékestetőn, Siófokon és Szombathelyen. Nem látható szignifikáns különbség a pozitív és negatív irányú eltérések előfordulásában. Bár az adatbázis elég rövid időszakra vonatkozik, meg kell említeni, hogy némely állomáson, még ennyi idő alatt is trend jellegű változások figyelhetők meg. Csökkenő szélsősebesség jellemzi Kecskemétet és Szegedet, mely minden bizonnyal a mérési körülmények megváltozásából ered. Erre a 3.4 fejezetben még visszatérünk, ahol három állomás hosszabb adatsorán megvizsgáljuk ezt a kérdést.

A szélsősebesség relatív gyakoriságai a legszelesebb és legszélcsendesebb hónapban: Elsőként az egyes állomások legszelesebb és legkevésbé szeles hónapjait vizsgáltuk. Kékestető kivételével minden állomáson az 1-2 m/s-os szelek a leggyakoribbak a legkisebb átlagsebességű hónapban. Ezek 20-40 % relatív gyakoriságúak, ami igen magasnak mondható. Azt mutatja, hogy hazánkra a gyenge szelek kifejezetten jellemzőek. Említést érdemel, hogy néhány állomáson milyen magas a szélcsendes időszakok (< 0,5 m/s) aránya. Kisvárdán ez az érték augusztusban majdnem 30 %. A legnagyobb átlagsebességű hónapra vonatkozó gyakorisági görbék – az elvárásnak megfelelően – a nagyobb szélsősebességek felé tolódnak el, az előforduló legnagyobb relatív gyakoriságok pedig kisebbek, mint az előző esetben. Itt már az 1-4 m/s-os szelek a leggyakoribbak 15-25 %-kal. Nem ez látható Siófokon, ahol a legnagyobb átlagsebességű hónapban (április) az 1 m/s-os szelek csaknem akkora gyakorisággal fordulnak elő mint a legkisebb átlagsebességű hónapban (január) a 2 m/s-osak. Ez azzal magyarázható, hogy áprilisban időnként jóval nagyobb szelek fújnak, mint januárban, ami jelentősen megnöveli az átlagsebességet. Külön kell szólnunk Kékestetőről, mivel itt 26 m magasan a felszín felett, a többitől nagyon eltérően novemberben jelentkezik a legnagyobb átlagos szélsősebesség. Ekkor a 8 m/s-os szelek 10 %-os gyakorisággal fordulnak elő.

3.3 Fajlagos széltejesítmények, s a Weibull paraméterek hazai értékei

Egy mérőhely, vagy egy kisebb térség hasznosítható szélenergiájának felmérésénél három alapvetően fontos paraméter: a fajlagos széltejesítmény, s a Weibull paraméterek, ezért ezek hazai értékeinek becsléseit foglaljuk össze az alábbiakban (1. táblázat).

Weibull paraméterek: A Weibull paraméterek becslésének egyik lényeges előfeltétele a vertikális extrapoláció (enélkül az eredmények összehasonlítása nem lehetséges), mely az alsó 100 méteres légrétegben az érdesség és a légköri stabilitás függvénye. Nincs

analitikus kifejezés a szélsősebesség magassággal való változására, mely minden stabilitási feltétel mellett érvényes lenne. *Civindi és Poje* (1988) összehasonlít három empirikus módszert, melyek egyikének sem teljesen megnyugtató a fizikai alapja. Eredményei ennek ellenére azt mutatják, hogy a kapott eredmények nem térnek el jelentősen egymástól, mely az empirikus közelítés alkalmazásának létjogosultságát igazolja. Mivel a légköri stabilitásról nem állnak mérésenként rendelkezésünkre kiegészítő információk, így itt *Justus és Amir* (1976) empirikus módszerét alkalmaztuk a Weibull paraméterek és a széltejesítmények extrapolálásához. E szerint A és k Weibull paraméterek a z szinten:

$$A(z) = A_a \left(\frac{z}{z_a} \right)^n \quad (3.2)$$

$$k(z) = k_a \frac{1 - 0,088 \ln \frac{z_a}{10}}{1 - 0,088 \ln \frac{z}{10}} \quad (3.3)$$

ahol A_a és k_a a mérési szinten (z_a) meghatározott paraméterek, az n kitevő pedig:

$$n = \frac{0,37 - 0,088 \ln A_a}{1 - 0,088 \ln \frac{z_a}{10}} \quad (3.4)$$

Az összes állomás paramétereit a 10 m-es magassági szintre extrapoláltuk. Az A paraméter értékei 2,24 (Kisvárdá) és 4,55 (Kékestető) között változnak, ami azt mutatja, hogy ebben nincs túlságosan nagy különbség az ország különböző részei között. (Egyes tengerparti állomásokon A paraméter akár 8-10-es értékeket is felvehet.) A k paraméterben a térségi változékonyság még kisebb: 1,06 m/s (Kisvárdá) a minimum és 1,82 m/s (Pécs) a maximum. Ahol az átlagos szélsősebesség a legnagyobb és a Weibull-eloszlás alakparamétere (k) a legkisebb, ott a legnagyobb a teljes fajlagos széltejesítmény (*Henessey, 1977*). Hazánkban a k értékek viszonylag alacsonyak, ha nemzetközi összehasonlításokat teszünk, de ehhez nem párosul nagy átlagos szélsősebesség, így nem magasak a fajlagos széltejesítmények sem. A nagy k értékek a széltejesítmény kis változékonyságát jelentenék.

Fajlagos széltejesítmények: Minden állomásra meghatároztuk a fajlagos rendelkezésre álló széltejesítményt, melyet a 1. táblázatban közlünk. E paraméter értékét két módszerrel is kiszámítottuk interpolációk alkalmazásával a 10 m-es, valamint az 50 m-es felszín feletti magasságban. A mért szélsősebesség értékek segítségével a fajlagos széltejesítmény az alábbi módon számítható:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 C \quad (3.5)$$

ahol C a lapátok által súrolt terület és ρ a levegő sűrűsége. Ha azonban a Weibull-eloszlás A és k paramétereit is ismerjük, a fajlagos teljesítményt a Γ függvény felhasználásával is definiálhatjuk:

$$P = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (3.6)$$

A két módszert összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy nincs nagy különbség az elméleti eloszlással számított és a közvetlenül a mérési eredményeket felhasználó módszer között. Mintegy 20 %-os az eltérés Budapesten, Szegeden és Szombathelyen, az összes többi állomáson szinte teljesen megegyeznek az értékek. Az eltérések nem egyirányúak, egyszer az egyik, másszor a másik módszer adott nagyobb értéket. A rendelkezésre álló teljesítmény a 10 m-es szinten az országban 23 W/m^2 (Nagykanizsa) és 158 W/m^2 (Szombathely) között változik, ami igen nagy különbségnek mondható. A jellemző átlagos mennyiségek $30\text{-}40 \text{ W/m}^2$ körül vannak, melyek így átlagértékben relatíve nagyon alacsonyak. Ha megvizsgáljuk az 50 m-re vonatkozó eredményeket, akkor megállapíthatjuk, hogy ebben a magasságban csaknem háromszor akkora értékeket találunk, mint 10 m-en: itt már 100 W/m^2 körüli széltejesítmények jellemzőek. Sőt Szombathely 350 W/m^2 -es teljesítménye a maximum. Azaz ebben a magasságban már sokkal kedvezőbbek az energiahasznosítás feltételei.

Állomás	k (m/s)	c	P_1 (W/m^2)	P_2 (W/m^2)	P_3 (W/m^2)
Békéscsaba	1,48	2,93	32,1	29,3	85,3
Budapest	1,72	3,32	41,0	32,9	97,9
Debrecen	1,52	3,32	45,0	40,2	113,5
Győr	1,41	3,21	39,7	42,0	116,0
Kecskemét	1,65	2,71	20,5	18,4	59,2
Kékes	1,61	4,55	167,4*	93,9	273,8
Keszthely	1,33	2,81	34,9	32,1	90,6
Kisvárd	1,06	2,24	27,6	30,8	82,5
Nagykanizsa	1,17	2,26	24,4	23,2	66,5
Pécs	1,82	3,71	49,3	42,6	123,2
Siófok	1,13	3,34	78,2	82,9	169,7
Szeged	1,60	3,70	60,2	50,9	140,51
Szombathely	1,23	4,49	193,6	158,4	350,9

1. táblázat: Weibull paraméterek és a fajlagos széltejesítmény.

P_1 fajlagos széltejesítmény a köbös átlagokkal (3.5 egyenlet) 10 m-en,
 P_2 és P_3 fajlagos széltejesítmény a Weibull-eloszlással (3.6 egyenlet) 10 m-en, illetve 50 m-en.
 (* ez az adat 26 m-re vonatkozik.)

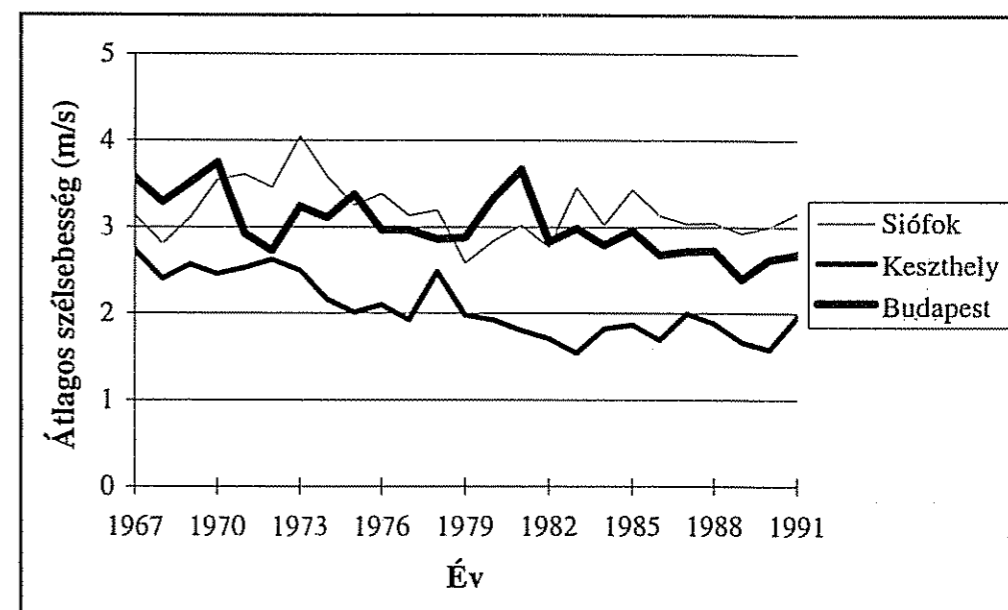
3.4 Hosszabb idősorokon végzett vizsgálatok

A kétéves adatsor összehasonlítása az ötévesssel: Budapest-Lőrinc és Szombathely állomásokra az 1982-1983-as évek alapján kiszámítottuk ugyanazokat a mennyiségeket (a szélirányeloszlás kivételével), mint az ötéves adatsorra. Az előbbi adatok napi 8 mérésből származnak, míg az utóbbiak – mint már a 3.1 fejezetben említettük – napi 24 mérésből. Érdekes tehát összehasonlítani ezeket olyan szempontból, hogy a mérés sűrűsége mennyire befolyásolja az általunk megvizsgált értékeket. *Lalas et al.* (1983) megállapította, hogy nincs nagy különbség, ha csak napi 3, 8 adat, vagy 24 mérési eredmény áll rendelkezésünkre. Különbség még a két adatsor között az értékek pontossága: a kétéves adatok 1 m/s, míg az ötévesek 0,1 m/s pontosságúak. Az összehasonlítást megnehezíti, hogy az adatok időben egymástól meglehetősen távol (10 év) helyezkednek el.

Mindkét állomásra megállapítható, hogy az átlagos szélesség és a köbös szélesség is kisebb az évkönyvekben közölt adatoknál. Ráadásul *Bacsó et al.* (1953) megerősíti, hogy 2-3 éves megfigyelés már elegendő hosszúságú egy terület szélklímájának feltérképezésére. Feltűnő, hogy a tavaszi hónapok milyen kicsi köbös

adatsorban. Megerősíti kételyeinket az, hogy Budapest-Lőrincen nem tapasztalható a tavaszi hónapokban ezek ily nagymértékű hiánya. Budapest-Lőrincen nincs ekkora különbség, csak kismértékű csökkenés tapasztalható. Az éves menet nagyjából megegyezik a két megfigyelési időszak esetén.

Az átlagsebességek csökkenése megjelenik az összes vizsgált mennyiség eloszlásában. A napi menetek természetesen sokkal durvábbak a napi 8 mérésnél. Itt a kis szélességek átlagos éves tartama és előfordulásuk relatív gyakoriságai sokkal nagyobbak. Így kisebbek az egyes szélességekben levő fajlagos széltejesítmények is. E mennyiség maximum értékei Budapesten egy kicsit a kisebb szélességek felé tolnak el: 8 m/s-ról 6 m/s-ra, míg Szombathelyen 14 m/s-nál marad. Budapesten a havi anomáliák továbbra is 1 m/s-on belül vannak, de a szombathelyi anomáliák – mint ahogy a szórás és a köbös átlag is mutatja – sokkal kisebbek, mint az ötéves adatsorban.

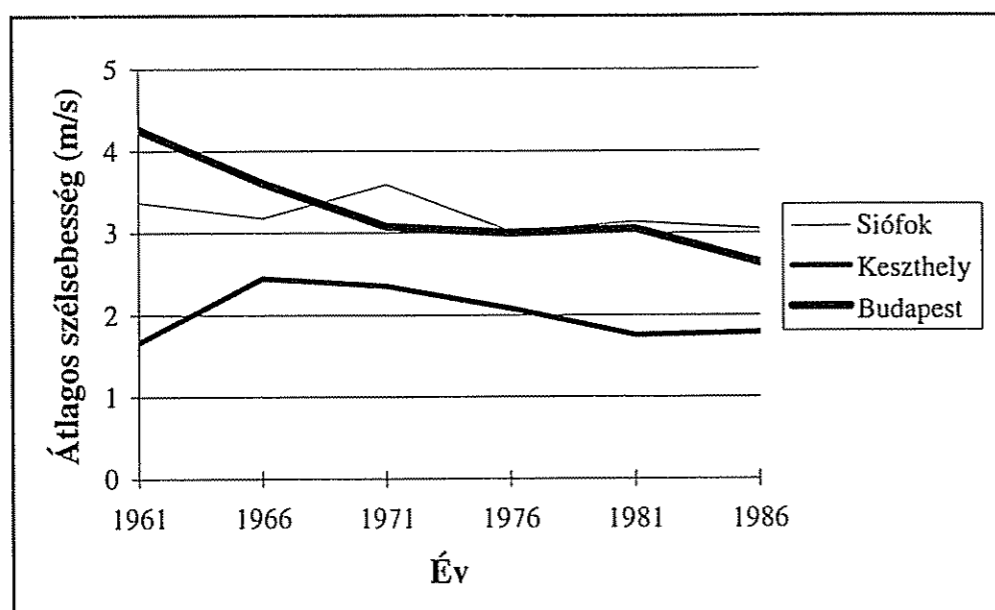


28. ábra: A szélesség éves átlagai Siófokon, Keszthelyen és Budapesten 1967 és 1991 között.

A szélesség 30 éves adatainak vizsgálata: Megvizsgáltuk az átlagos szélesség hosszú időre vonatkozó menetét három állomásra napi három, illetve két adatból. Egyrészt éves átlagokat számítottunk 1967 és 1991 között, melyet a 28. ábrán mutatunk be. Bár rendelkezésünkre álltak korábbi évek adatai is, az adathiányok miatt csak erre az időszakra mutatjuk be az eredményeket. Másrészt ötéves átlagokat számítottunk 1961 és 1991 közötti időszakokra. Az ezeket bemutató 29. ábrán az ötéves periódusok kezdőévéértük fel a vízszintes tengelyre. Célunk jelen vizsgálattal annak megállapítása, hogy van-e valamilyen hosszúidejű változás a szélességben, valamint mennyire ingadoznak az ötéves átlagok, elegendően hosszú-e az általunk használt ötéves alap adatbázis.

Az éves átlagokból megállapítható, hogy Siófokon trend jellegű változás nem figyelhető meg. Az évek közötti maximális eltérés majdnem 1,5 m/s, ez a körülbelül 3 m/s-os átlaghoz képest nagynak mondható. A másik két állomáson viszont az éves átlagos szélességek folyamatos csökkenése látható. A csökkenés mértéke csaknem 1 m/s. Keszthelyen például a kezdeti 2,5 m/s-os átlagokról 1,8 m/s-os értékre csökken az átlagos szélesség éves átlaga.

Hasonló változások figyelhetők meg az ötéves átlagokat bemutató ábrán is. Siófokon a 30 év alatt körülbelül 0,5 m/s-os a szélesebbesség ingadozása, ami alátámasztja azt, hogy a 13 állomásra vonatkozó öt éves adatsor nagyjából leírja az adott hely széllimáját. Keszthelyen és Budapesten viszont, mint ahogy feljebb is említettük, a szélesebbességben szinte folyamatos csökkenés tapasztalható. Lőrincen ez több mint 1 m/s a 30 év alatt. Ez az eredmény a mérési körülményekben bekövetkezett változások következménye lehet.



29. ábra: A szélesebbesség ötéves átlagai Siófokon, Keszthelyen és Budapesten 1961 és 1991 között.

Nem ismerjük az állomások pontos történetét, így csak sejteni lehet, hogy miből ered ez a változás. Arra gondolunk, hogy az állomások környékén, az eltelt több mint 20 év alatt, jelentősen megnöttek a fák és megváltozott a környék beépítettsége. A szélesebbességet Keszthelyen 15, míg Lőrincen 12 m-es felszín feletti magasságban mérik, amit egyes fafajok magasságban bizony jelentősen túlszárnyalhatnak, nagymértékben befolyásolva a szélesebbességet. A siófoki mérés a Viharjelző Observatórium tetején történik 20 m-es magasságban, közvetlenül a Balaton partján, így itt ezek a hatások kevésbé jelentkeznek.

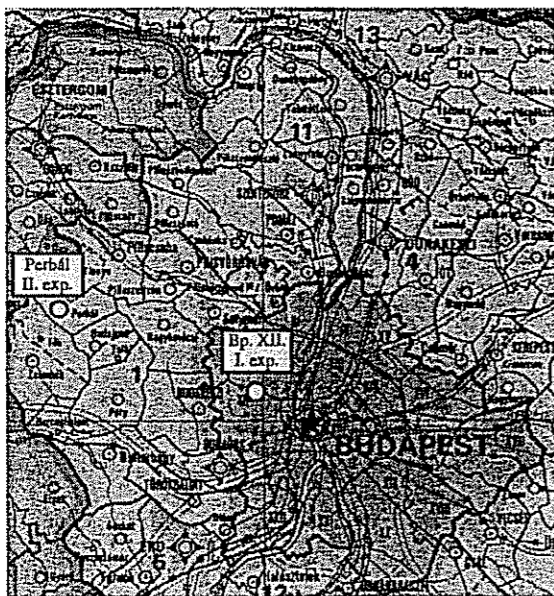
Mindezeket látva elmondhatjuk, hogy az általunk alap adatbázisként használt öt éves adatsor megfelelően reprezentálja egy adott hely széllimáját, ami az adatsor hosszát illeti. Azt viszont, hogy a mai helyzetet is jól írja le, nem lehet egyértelműen megválaszolni. Valószínű, hogy egyes állomásokon nem történt nagymértékű változás a mérési körülményekben, így ezek az adatok ma is aktuálisak. Siófok erre lehet példa. Más állomásokon viszont ezen körülmények jelentősen megváltoztak, más lett a felszín érdessége, a mérőműszer vagy az észlelő, stb. Így azokra a helyekre az 1968-1972-es adatok ma már nem megfelelőek. Fontos feladat lenne megválaszolni minden állomásra külön-külön ezeket a kérdéseket, az adatokra esetleg valamilyen korrekciót végrehajtani.

A kutatások e fázisának összegzésekként levonható az a következtetés, hogy Magyarországnak van kinyerhető szélenergia kincse, amit elődeink a kor technológiai szintjének megfelelően fel is használtak. Ma a kérdés az, hogy mikor válnak a fosszilis és egyéb energiahordozók elég drágává ahhoz, hogy a szélenergiát újra gazdaságosan ki

lehesen nyerni. Tudjuk, hogy a fosszilis tüzelőanyagok lassan elfogynak, az általuk okozott környezetszennyezés egyre elviselhetlenebb. Az atomenergia ellen nagy a társadalmi nyomás; Magyarország vízenergiában szegény. Így ha az emberiség nem kutat fel újabb energiaforrásokat, akkor a szélenergiánknak – a napenergia hasznosítása mellett – nagy szerepe lehet a jövőben. Ezirányú kutatásokat mindenképpen szükséges folytatni, elsősorban jól kiválasztott helyeken (pl. ahol régen szélmalom működött) méréseket kellene végezni: egyrészt a szélesebbességre, másrészt a felállított kísérleti szélerőművek által termelt energiára vonatkozóan.

4. Expedíciós szélenergetikai mérések, hibaforrások analízise

A kutatási program kezdeti szakaszában két expedíciós mérést hajtottunk végre: július-augusztusban Budapesten a XII. kerületben a Sárospatak utca egyik házának tetején és Perbálon. Az 30. ábrán láthatjuk a mérési pontok földrajzi elhelyezkedését. Mindkét mérést szónikus anemométerrel végeztük. A Budapesten felállított mérőműszer több kísérleti idő után 1 másodperc alatt 21 észlelést végzett, a Perbálon felállított műszer pedig 0,96 másodperc alatt 4-et. Mindkét műszer olyan koordináta rendszerben dolgozott, melyben a horizontális szél u komponense a déli iránnyal 30° -os szöget zárt be, a v komponens pedig a nyugati iránnyal zárt be 30° -os szöget. A nyári expedíció adatfile-jai a horizontális szélesebesség vektor u és v komponenseit, a vertikális szélesebességet tartalmazták század m/s pontossággal, és a horizontális szélesebesség irányát fokokban megadva. Az őszi expedíciós mérésekre a horizontális szélesebesség nagysága, a vertikális szélesebesség nagysága volt kiírva század m/s pontossággal, és szintén a horizontális szélesebesség iránya fokokban. Mindkét mérési sorozatra elmondható, hogy ritkán fújnak délies szelek az adott körzetben, és a leggyakoribb szélirány az északias. A perbáli mérések során még a keleties szelek is gyakoriak voltak. Szembetűnő, hogy az erősebb (4-5 m/s-nál nagyobb sebességű) szelek mindkét mérőponton kizárólag $290\text{-}340^\circ$ -ról, ÉNY-ről fújnak.



I. expedíció:
Időszak: 1996. júl.12 - aug. 18.
Helyszín: Budapest XII. Sárospatak u.
II. expedíció:
Időszak: 1996. szept.10 - nov. 10.
Helyszín: Perbál, Fő u.

30. ábra: A két expedíció földrajzi elhelyezkedése.

A két expedíciós mérés során több időátlagolással és különböző érzékenységyű mérőműszerekkel dolgoztunk. Az így nyert széladatok feldolgozása alapján (Vigh, 1996) megállapítottuk, hogy a hagyományos gyakorlatban alkalmazott szélmérésekkel nem lehetséges elegendő pontossággal megbecsülni az adott hely szélenergia készletét. Ehhez a speciális feladathoz sűrűbb mérésekre van szükség. Két szélgenerátor kiválasztásával a potenciális energiatermelés becslésére vonatkozó vizsgálatokat is elvégeztük.

A szélesebességek eloszlását a Weibull-eloszlással közelítjük, mint ahogy ez általános a szakirodalomban. A kétparaméteres Weibull-eloszlás eloszlásfüggvénye a következő formában írható fel:

$$F(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right), \quad (4.1)$$

a sűrűségfüggvény pedig:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right), \quad (4.2)$$

A -t skálaparaméternek, k -t alakparaméternek nevezik. Ha $k > 1$, akkor a sűrűségfüggvény egy maximummal rendelkezik, ellenkező esetben ($0 < k \leq 1$) a függvény monoton csökken. A Weibull-eloszlásnak van két speciális esete, melyeket külön névvel láttak el. Nevezetesen $k=1$ -nél exponenciális-, $k=2$ -nél pedig Rayleigh-eloszlásról beszélünk. Vizsgálatok azt mutatják, hogy általában a k paraméter 2 körüli értéket vesz fel, ezért gyakran a Rayleigh-eloszlással közelítik a széladatok gyakorisági eloszlását. A Weibull-eloszlás egyik tulajdonsága, hogy ha u szélesebesség A és k paraméterű Weibull-eloszlással jellemezhető, akkor u^m szintén Weibull-eloszlású A^m és k/m paraméterekkel (Troen és Petersen, 1989).

4.1 Különböző átlagolási idők összehasonlítása

Lehetséges hibaforrások:

1./ A meteorológiai gyakorlatban minden órára egy széladatot adnak meg állomásonként, ezzel az egy értékkel jellemezve az adott órát. Ehhez a légkézenfekvőbb módszer az lenne, hogy órás átlagot számoljanak. Azonban az egyszerűség kedvéért nem az egész órára, hanem csak annak az utolsó 10 percre veszik a szélesebességek átlagát (OMSZ, 1987). Az expedíciós szélenergetikai méréseinkre megvizsgáltuk, hogy mekkora hibát okoz, ha az órás átlagokat az órák utolsó 10 percre képzett átlagokkal helyettesítjük. Vizsgálataink alapján beigazolódott, hogy ez nem jelentős hibaforrás, hiszen mindössze 10^{-2} m/s nagyságrendű az eltérés köztük, ami két nagyságrenddel kisebb, mint maguk az átlagértékek.

2./ A meteorológiai állomásokon óránként egy széladatot olvasnak le, aminek az a következménye, hogy az egy óránál kisebb skálájú szélfluktuációkat az ilyen adatsorokban nem tudják figyelembe venni. Azonban a szélenergia hasznosításakor az ilyen kisebb skálájú folyamatok is fontos szerepet játszhatnak. Mivel sűrű méréseink lehetővé tették, összehasonlítottunk három különböző átlagolási időt: 1 perces, 10 perces és az órák utolsó 10 percre vonatkozó átlagolást. Hasonló hibaszámításokat végeztünk a szélesebességek köbeire, illetve a maximális széllekeésekre is. Az eredményeink alapján látható, hogy az eltérések a vizsgált mennyiségekhez képest két nagyságrenddel kisebbek. Például a különböző átlagolási idővel számolt köbös átlagok $10\text{-}100 \text{ m}^3/\text{s}^3$ nagyságúak, míg az eltéréseik $0,1\text{-}1 \text{ m}^3/\text{s}^3$ -osak. Azonban, ha megvizsgáljuk a legnagyobb különbségeket, akkor azt kell látnunk, hogy lényegesen nagyobb eltérések adódnak a három eset között. Például Perbálra az 1 perces átlagoknak és az órák utolsó 10 perces átlagainak a különbsége $2,09 \text{ m/s}$, míg ugyanez az érték Budapestre $3,14 \text{ m/s}$.

3./ Nem mindegy, hogy amikor a szélesebességek köbeivel számolunk, akkor a szélesebességek köbeit átlagoljuk, vagy az átlagokat emeljük harmadik hatványra. Az utóbbi esetben nem vesszük figyelembe az átlagolási időnél kisebb szélfluktuációkat, míg az elsőnél igen. A két expedíciós mérésre 1 és 10 perces átlagolásokra

megvizsgáltuk, hogy milyen különbségek adódnak. Az 1 perces átlagoláskor kisebb az eltérés a szélesség köbeinek átlaga és az átlagok köbe között, mint a 10 percesnél. Ez azért van így, mert az utóbbi esetben az átlagok köbeinek számításakor a 10 percnél kisebb skálájú, míg az 1 perces átlagoláskor csak az 1 percnél kisebb skálájú fluktuációkat nem vettük figyelembe.

Megfigyeltük expedíciós mérésorozatunk alapján a szélességek köbeinek 10 perces átlaga és a 10 perces átlagok köbe közötti eltéréseket. Amikor nagyok a szélességek és ezért nagyok a köbeik is, akkor a különbségre is nagy értékeket kapunk. A köbös szélességek átlaga általában csak 2/3-3/4 része az átlagok köbeinek. Tehát jelentősek az eltérések köztük. Levonhatjuk azt a következtetést, hogy mivel az energetikai becslésekhez a szélességek köbével számolunk, ezért nem mindegy, hogy milyen sűrű mérési sorozattal rendelkezünk, illetve hogy milyen sorrendben köbölünk és átlagolunk.

A fentiekből látszik, hogy még ilyen apró számítási illetve koncepcionális pontatlanságok is mennyire komoly energetikai becslési hibákhoz vezethetnek, s az egész energia felhasználási tervezésünket megingathatják.

4.2 A szél teljesítmény paraméterei, becslési technikák

A szél mind időben, mind térben erősen ingadozik, egy véletlenszerű komponenst foglal magában. Mivel egy szélturbina általi energiatermelés a rotort hajtó széllal változik, az energiaoutput is időben fluktuáló lesz. A szélenergia érzékenyebb a topográfiai és időjárási jellemzők változására, mint a napenergia, a fosszilis tüzelőanyagok energiaoutputja pedig egyáltalán nem tartalmaz véletlen fluktuációkat.

A termelt energiát a lapátok forgástengelyének magasságában levő szélesség határozza meg. Az energiatermelés függését a forgástengely magasságában levő szélességtől konvencionálisan teljesítménygörbének hívják.

Az 31. ábra egy teljesítménygörbét mutat be. Látható, hogy amikor a szélesség kisebb, mint a bekapcsolási szélesség (v_{cut-in}), akkor a turbina nem képes energiát termelni, míg ha a szélesség felülmúlja ezt a sebességet, akkor a teljesítmény output a növekvő szélességgel emelkedik egy maximális értékig, a névleges teljesítményig (P_{rated}). E felett az output majdnem állandó. A leállási sebességnél ($v_{cut-out}$) nagyobb szélességeknél a szél turbina leáll, hogy a szerkezeti sérülések veszélyeit csökkentse.

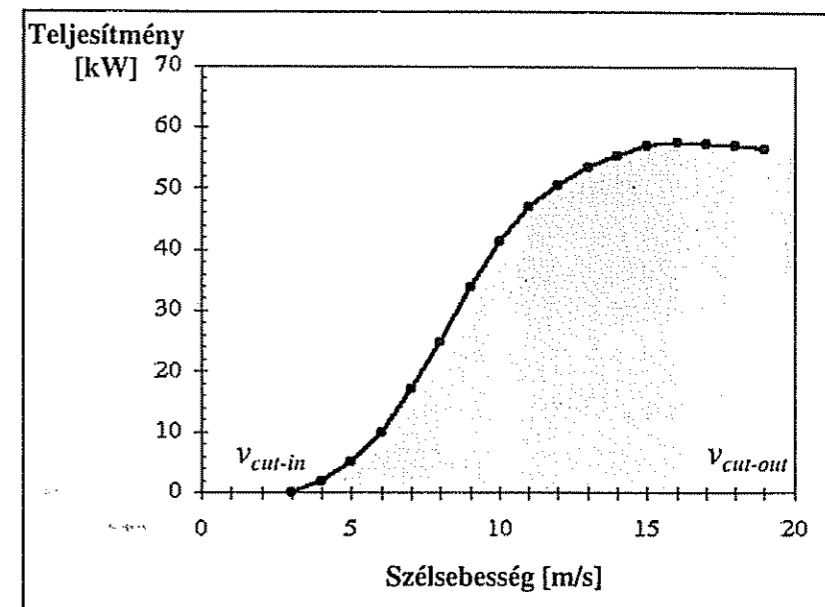
Közepes teljesítményoutput: Egy szélturbina $P(u)$ teljesítménygörbéjének és a forgástengely magasságában levő szélesség $Pr(u)$ valószínűségi sűrűségfüggvényének ismeretében a P közepes energiatermelést a következőképpen becsülhetjük meg (Troen és Petersen, 1989):

$$P = \int_0^{\infty} Pr(u) P(u) du. \quad (4.3)$$

Ha a $Pr(u)$ valószínűségi sűrűségfüggvény Weibull közelítéssel van megadva, akkor a közepes energiatermelés kifejezése az alábbi alakot ölti:

$$P = \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A} \left(\frac{u}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{A} \right)^k \right) \right) P(u) du. \quad (4.4)$$

Ez az integrál általában nem számolható ki analitikusan, ezért numerikus megoldásokat kell alkalmaznunk.



31. ábra: Egy 55 kW-os szél gép teljesítménygörbéje.

A gyakorlatban a teljesítménygörbék meglehetősen simák, és szakaszonként lineáris függvénnyel, néhány csomópont beiktatásával jól közelíthetőek. Ezt a közelítést használva a teljesítményt így írhatjuk:

$$P(u) = \frac{P_{i+1} - P_i}{u_{i+1} - u_i} (u - u_i) + P_i, \quad u_i \leq u < u_{i+1} \quad (4.5)$$

amit a 4.4 egyenletbe helyettesítve azt kapjuk, hogy:

$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} (G_k(\alpha_{i+1}) - G_k(\alpha_i)) \quad (4.6)$$

ahol $\alpha_i = u_i/A$ és $G_k(\alpha)$ az $1/k$ és az α^k argumentumú nem teljes gamma függvény $1/k$ -szorososa, vagyis:

$$G_k(\alpha) = \frac{1}{k} \cdot \Gamma(1/k, \alpha^k) = \frac{1}{k} \cdot \int_0^{\alpha^k} t^{\frac{1}{k}-1} e^{-t} dt. \quad (4.7)$$

A leállási sebességnél szakadás található a teljesítménygörbében: előtte a teljesítmény a névleges teljesítménnyel egyenlő, utána pedig nulla. Egy $u_i = u_{i+1}$ -nél levő, P_i -ről P_{i+1} -re történő teljesítmény ugrás hozzájárulása az összeghez:

$$(P_{i+1} - P_i) \cdot \exp(-\alpha_i^k). \quad (4.8)$$

A 4.6 és 4.8 egyenleteket használva a közepes teljesítmény elméletileg minden teljesítménygörbére kiszámítható elegendő számú lineáris szakaszra való felosztással. A gyakorlatban a módszer csak akkor használható, ha a teljesítménygörbe néhány lineáris szakasszal közelíthető.

Sok szélturbinánál a teljesítménygörbe helyettesíthető egy egyszerű alakkal, melyet a 4.6 és 4.8 egyenletek adnak meg az alábbiak szerint:

$$P = \frac{P_{max}}{\alpha_{rated} - \alpha_{cut-in}} \{ G_k(\alpha_{rated}) - G_k(\alpha_{cut-in}) - \exp(-\alpha_{cut-out}^k) \} \quad (4.9)$$

A gyakorlatban az utolsó tag legtöbbször elhanyagolható, mivel a nagyon erős szélsébségek, amelyeknél a turbinának le kell állnia, nagyon ritkán fordulnak elő.

A rendelkezésre álló és a kinyerhető szélenergia fogalma: A szélnek, mint erőforrásnak a jellemzésére két mennyiséget definiálhatunk. Ha a potenciális generátor helyek egymáshoz való viszonyára vagyunk kíváncsiak, függetlenül a szélenergia kinyerési eszköztől, akkor célszerű a rendelkezésre álló szélteljesítményt vizsgálnunk. Ez egyenlő a v sebességgel mozgó széláramra merőleges A felületen vett kinetikus energia árammal (Justus, 1985):

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) (v) (A) = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (4.10)$$

ahol ρ a légsűrűség.

A szélkeréken áthaladó levegő energiáját azonban nem tudjuk teljesen kihasználni, ugyanis ehhez a szélnek teljesen le kellene fékeződnie a rotorfelületen. Ez lehetetlen, mert a légtömegnek tovább kell mozognia, hogy helyet adhasson az utána következő levegőnek. A szélkerék csak azt az energiát tudja kihasználni, ami az előtte levő és mögötte levő sebességek különbségének megfelel (Czelnai, 1953). Tehát ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy szélturbinával mekkora teljesítményt érhetünk el egy adott helyen, akkor figyelembe kell vennünk a gép tulajdonságait is és a kinyerhető szélteljesítménnyel kell számolnunk, mely függ a rendelkezésre álló szélteljesítménytől és a kinyerési eszköztől (Justus, 1985):

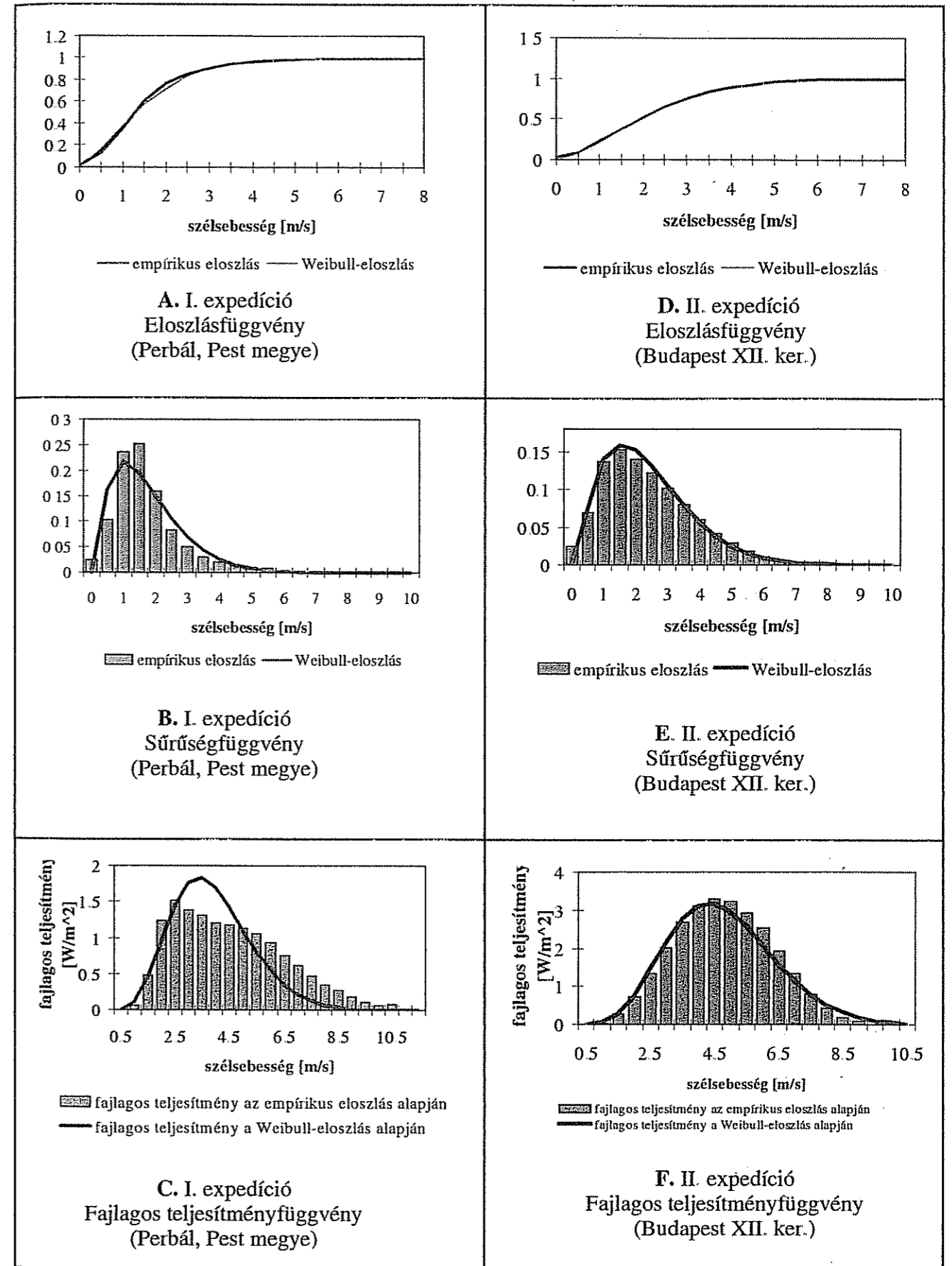
$$P_k = P \cdot C_p = \frac{1}{2} C_p \rho v^3 A \quad (4.11)$$

A C_p faktort teljesítmény együtthatónak vagy hatásfoknak hívjuk. Értéke függ a szélsébségtől és jellemző az adott szélturbinára. Az elvben elérhető maximális hatásfok

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0,59, \quad (4.12)$$

vagyis a rendelkezésre álló szélteljesítmény legalább 40%-a elvész. A C_{pmax} állandót Betz-határnak vagy Betz-limitnek nevezzük. Ezt az értéket egyetlen szélenergia átalakító rendszer sem képes felülmúlni (Civindi és Poje, 1988).

Eloszlásvizsgálatok: Az expedíciós mérésorozat adataiból a szélsébségekre eloszláskontroll vizsgálatot végeztünk. Weibull-eloszlást illesztettünk a mérési sorra. A Weibull paramétereiket két különböző módszerrel is kiszámítottuk (Justus et al., 1978): a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával és a szélsébségek átlagának és szórásának segítségével. A két módszer által számított paraméterek közül azt fogadtuk el, amelyhez tartozó eloszlásfüggvénynek az empirikus eloszlásfüggvénytől vett négyzetes eltérése kisebb volt. Esetünkben a második módszer szolgáltatta mindkét expedíciós mérésre a jobb eredményt. A 32. ábrán a két expedícióra vonatkozó eloszlásfüggvényeket (A és D) és sűrűségfüggvényeket (B és E) mutatjuk be. A Budapesti adatsorra jobb közelítést adott a Weibull-eloszlás, de a perbáli értékek sem térnek el nagyon egymástól.



32. ábra: A két mérési expedíció során mért adatok alapján becsült, illetve számított eloszlás-, sűrűség- és fajlagos teljesítményfüggvények.

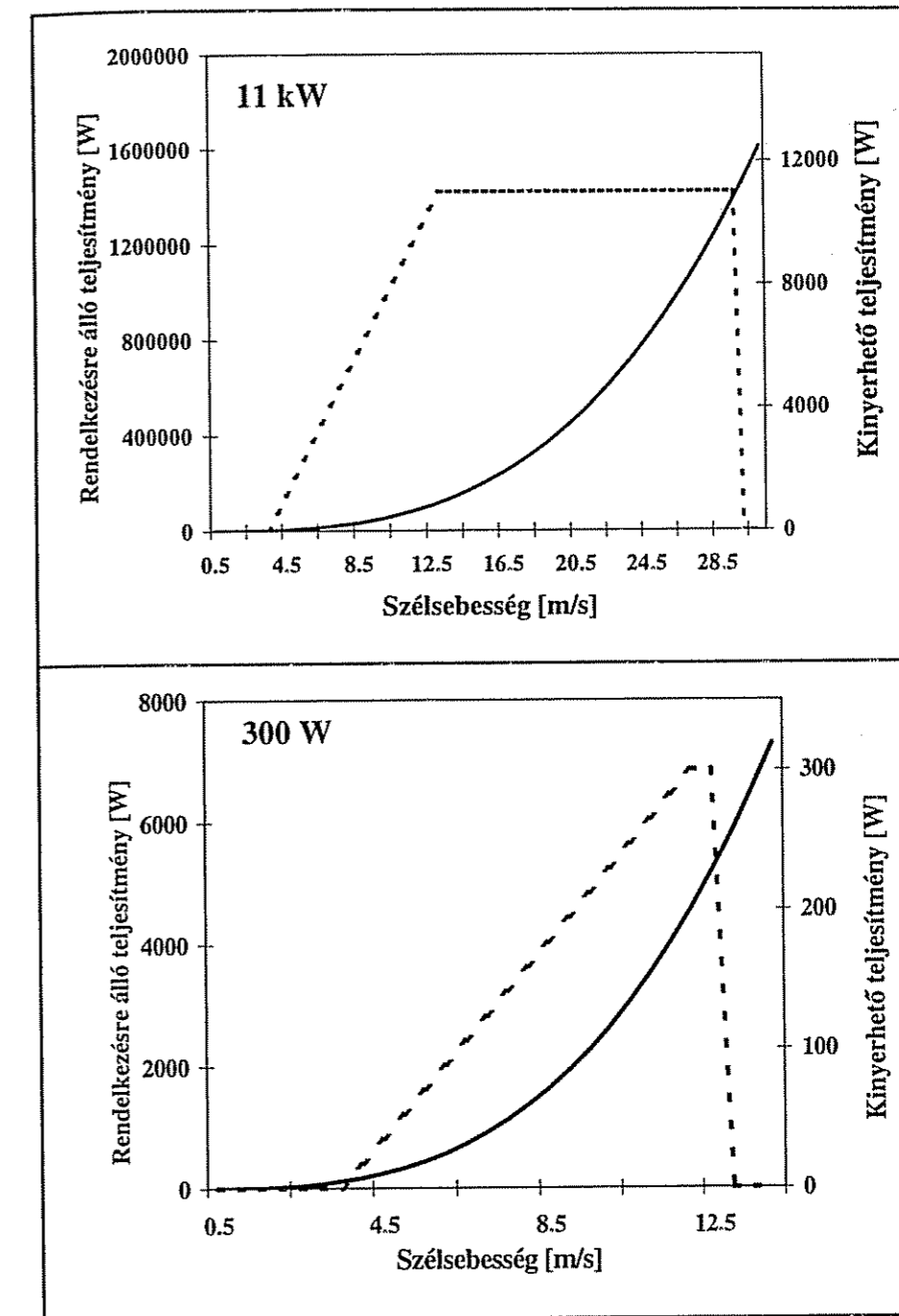
A számított fajlagos teljesítményfüggvények: A fajlagos teljesítményfüggvény mutatja, hogy mely szélességek játszanak nagy szerepet a közepes energiatermelésnél. Meghatároztuk a fajlagos teljesítményfüggvényeket a két expedíciós mérési időszak alapján az adott helyszínekre az empirikus eloszlás és a Weibull-eloszlás alapján, mely diagramokat a 32. ábra C és F kivágatain mutatunk be. A Perbálra vonatkozó értékekben nagy eltérések vannak a két eloszlás alapján számolt fajlagos teljesítmények között. Amíg az empirikus esetben a függvény 2,5 m/s-nál veszi fel a maximumát, addig a Weibull közelítéssel kapott görbe legnagyobb értéke 3,5 m/s-nál van. Az ábráról látható, hogy a két görbe menete is eléggé eltér. Tehát a Weibull-eloszlás nem adott elég pontos közelítést a perbáli mérésekre. A budapesti expedíciós adatok alapján végzett számítások eredményeinél láthatjuk, hogy az empirikus és a Weibull közelítéssel számolt fajlagos teljesítményfüggvények jól együtt futnak. Maximumukat egyszerre veszik fel 4,5 m/s-nál, ami azt jelenti, hogy a mérés helyén az e körüli szélességek járulnak leginkább hozzá a szél közepes energiájához. Megállapíthatjuk, hogy itt a Weibull-eloszlás valóban jó közelítésnek bizonyult.

<i>Rotor átmérő</i>	10,6 m	2,35 m
<i>névleges teljesítmény</i>	11 kW	300 W
<i>bekapcsolási sebesség</i>	3,5 m/s	3,5 m/s
<i>névleges sebesség</i>	13 m/s	12 m/s
<i>leállási sebesség</i>	30 m/s	13 m/s
<i>túlélési sebesség</i>	50 m/s	40 m/s

2. táblázat: Egy 300 W-os és egy 11 kW-os szélturbina jellemző paraméterei.

Teljesítmény outputok: A két expedíciós mérés alapján öt kiválasztott szélgenerátorra végeztünk vizsgálatokat (Schmid és Palz, 1986). A teljesítmény meghatározására a korábban bemutatott egyszerű lineáris közelítést alkalmaztuk. Az öt gép közül csak kettőre volt elfogadható ez a közelítés, a többire irreális hatások adódtak. Ezekre a gépekre finomabb felbontással kellene a közelítést elvégezni. A következőkben csak a reális eredményeket adó gépekkel foglalkozunk. A két turbina jellemző paramétereit a 2. táblázatban foglaljuk össze. A 11 kW-os géppel például Hollandiában találkozhatunk, a 300 W-ossal pedig világszerte, de jellemzően Németországban (Schmid és Palz, 1986). Mint ahogyan várható is, a túlélési sebességeket megközelítő sebességek nem fordultak elő az expedíciós mérések során.

A rendelkezésre álló és a kinyerhető szélenergia mennyiségének becslése, összehasonlítása: A rendelkezésre álló teljesítményt az $1,225 \text{ kgm}^{-3}$ -es standard légsűrűség esetére számítottuk, mivel nem álltak rendelkezésünkre sem napi sűrűség, sem hőmérséklet, sem nyomás adatok. E közelítés elfogadott a szakirodalomban, s elhanyagolhatóan kis hibát eredményez. A 33. ábrán látható a 11 kW-os és a 300 W-os gép teljesítménygörbéje. Az ábrákon a bal oldali skálák a rendelkezésre álló teljesítményre vonatkoznak, a jobb oldaliak pedig a kinyerhetőre. A két ábrán a rendelkezésre álló teljesítmény eltérő értékeket vesz fel, hiszen különböző a rotorlapátok által sírolt felület.



33. ábra: A 11 kW-os (A.) és a 300 W-os (B.) generátor teljesítménygörbéje.

Érdekes megvizsgálni, hogy milyen eltérések mutatkoznak a teljesítményekben és a teljesítmény együtthatókban, ha különböző átlagolási idővel számolunk. Szintén 1 perces, 10 perces és az órák utolsó 10 perceire vonatkozó átlagokat számítottunk. Ha az 1 perces átlagokat vettük, akkor a teljesítmény együttható sokszor elérte maximális értékét. Mikor azonban 10 perces vagy az órák utolsó 10 perceire vonatkozó átlagolást használtuk, a görbe a maximális értéktől legtöbbször távol maradt. A 3. táblázatban az időszakokra számolt átlagos hatásfokokat tüntetjük fel.

Érdekes, hogy a budapesti adatokra az utolsó 10 perces átlagok alapján számolt átlagos hatásfok nagyobb, mint amit az 1 és a 10 perces átlagok alapján kaptunk. Ez azzal magyarázható, hogy a vizsgált időszakban jellemzően nőtt a szélesség. Ennek következtében, amikor az órák értékeit az óra utolsó 10 percre vonatkozó értékekkel helyettesítjük, felülbecslést végzünk.

PERBÁL	1 perces átlag	10 perces átlag	az órák utolsó 10 perces átlagai
11 kW-os gép	0,066	0,066	0,039
300 W-os gép	0,041	0,041	0,024
BUDAPEST	1 perces átlag	10 perces átlag	az órák utolsó 10 perces átlagai
11 kW-os gép	0,034	0,027	0,043
300 W-os gép	0,021	0,017	0,027

3. táblázat: Egy 300 W-os és egy 11 KW-os szélturbina jellemző paraméterei.

A 4. táblázat Perbálra és Budapestre vonatkozóan az átlagos rendelkezésre álló és az átlagos kinyerhető teljesítményt tartalmazza a kétféle gépre. Ha a táblázat értékeit megfigyeljük, azt láthatjuk, hogy a különböző átlagolásokkal kapott értékek átlagai nem elhanyagolhatóan kis mértékben térnek el egymástól. Az eltérés mindenütt egy-fél nagyságrendű. Ebből tehát levonható az a következtetés, hogy a teljesítmények becslésénél sem mindegy, hogy milyen minőségű, illetve sűrűségű méréseink vannak, hogy milyen adatokkal dolgozunk.

PERBÁL 11 kW-os gép	1 perces átlagok átlaga	10 perces átlagok átlaga	az órák utolsó 10 perces átlagainak átlaga
rend. álló telj.	2297,5	2086,8	1788,7
kinyerhető telj.	349,4	269,8	132,0
PERBÁL 300 W-os gép	1 perces átlagok átlaga	10 perces átlagok átlaga	az órák utolsó 10 perces átlagainak átlaga
rend. álló telj.	112,9	102,6	87,9
kinyerhető telj.	10,65	8,22	4,02
BUDAPEST 11 kW-os gép	1 perces átlagok átlaga	10 perces átlagok átlaga	az órák utolsó 10 perces átlagainak átlaga
rend. álló telj.	1345,1	1208,1	1427,9
kinyerhető telj.	152,7	86,2	129,3
BUDAPEST 300 W-os gép	1 perces átlagok átlaga	10 perces átlagok átlaga	az órák utolsó 10 perces átlagainak átlaga
rend. álló telj.	66,1	59,4	70,2
kinyerhető telj.	4,7	2,6	3,9

4. táblázat: Rendelkezésre álló és kinyerhető szélteljesítmények a vizsgált két szélturbina esetén.

Összefoglaló: Az alternatív energiaforrások sok szempontból előnyben vannak a hagyományos energiaforrásokkal szemben. Tisztában kell lennünk azzal, hogy az energiaigényeket a hagyományos technikák nélkül ma nem lehet kielégíteni, de a nemzetközi trendek arra mutatnak, hogy a megújuló energiaforrások egyre nagyobb részesedést képeznek az energiatermelésben.

Az alternatív energiaforrások egyike a szél, melynek nagy előnye, hogy mindenütt jelen van kisebb-nagyobb mértékben. A szélenergia sokféle felhasználása ismert és más országokban sikerrel alkalmazzák őket. Az egyik alkalmazás az elektromos áram termelés, amely helyileg felhasználható, de elektromos hálózatba is betáplálható.

Bár Magyarország nem tartozik a kifejezetten szeles vidékek közé, nálunk sem reménytelen a szélenergia hasznosítása, gondoljunk csak a régebbi idők szélmalmaira. Vannak az országnak olyan pontjai, ahol kifejezetten szükséges lenne olyan energiaforrás telepítése, mely a helyi igények kielégítésére termelne energiát. Ilyenek például a villamos energiát nélkülöző tanyák, mezőgazdasági, illetve agrár létesítmények. Ebben a fejezetben áttekintettük a szélenergia helyzetét más erőforrásokhoz képest, a szélenergia hasznosításának fejlődését a világban és hazánkban, és röviden jellemeztük a korszerű szélturbinákat. Két expedíciós mérés széladatai alapján megállapítottuk, hogy a hagyományos gyakorlatban alkalmazott szélmérésekkel nem tudjuk elég pontosan megbecsülni az adott hely szélenergia készletét. Ehhez a speciális feladathoz sűrűbb mérésekre van szükség. Két szélgenerátor kiválasztásával a potenciális energiatermelés becslésére vonatkozó vizsgálatokat végeztünk el.

5. Elméleti háttér

A szélenergia szempontjából lényeges légköri tartomány a légköri határreteg. Ez a réteg a troposféra legalsó része, melyet a földfelszín jelenléte befolyásol, s mely a felszíni kényszerekre (mint például a szenibilis hőáram) kisebb, mint egy óras időskálán válaszol. A határreteg vastagsága nagy változékonyságot mutat szárazföldek felett: tiszta éjszakákon kis szélesség mellett akár 100 méterre is lecsökkenhet, azonban meleg nyári napokon a 2 km-t is elérheti. A hőmérséklet vertikális változása alapján a határreteg több részre osztható (Stull, 1988). A szélenergia termelés szempontjából a legfontosabb a felszínközeli réteg, mely általában 10-100 m vastag. Az ebben a rétegben érvényes alaptörvényeket a hasonlósági elv alkalmazásával Monin és Obukhov vezette le (1954), melyek egyike a logaritmikus széltörvény. Ez a szélenergia becsléseknél felhasznált egyik legfontosabb összefüggés. Sima terepet feltételezve a felszínközeli rétegben uralkodó szélviszonyok jól közelíthetők a logaritmikus szélprofilal:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (5.1)$$

ahol $U(z)$ a szélesség a z magasságban, z_0 a felszíni érdességi magasság, κ a Kármán konstans és u_* a dinamikai sebesség. A dinamikai sebesség a nyírófeszültséggel (τ) arányos:

$$\tau = \rho \cdot u_*^2 \quad (5.2)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége. A felszínközeli rétegben 10 és 100 m között mind a nyírófeszültség, mind a sűrűség állandónak tekinthető.

A logaritmikus széltörvény csak neutrális légrétegződés esetén érvényes, mint például erős szélességek és borult idő alkalmával, amikor a felszíni réteg jól átkevert és a besugárzás nagyon kicsi. Neutrális rétegződés a valóságban nagyon ritkán fordul elő. Ez a képlet (5.1) azonban szélenergetikai számításokra mégis alkalmas, mivel a szélturbinák csak nagy szélességeknél (3 m/s - 20 m/s) működnek, amikor a stabilitási viszonyok hatása nem erős. Egy turbina teljes energiatermelésének számítása során – mely a szélesség köbével arányos – a stabilitás hatását sokszor el is hanyagolják.

Nem neutrális rétegződés esetén stabilitási korrekció alkalmazásával pontosabb logaritmikus széltörvényhez juthatunk (Högström és Smedman, 1989):

$$\bar{u}_z = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \cdot \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \quad (5.3)$$

$$\Phi_m = \left(1 - 19 \frac{z}{L} \right)^{-1/4} \text{ instabilis rétegződés esetén}$$

$$\Phi_m = 1 + 6 \frac{z}{L} \text{ stabilis viszonyoknál}$$

$$L = - \frac{u_*^3 \cdot T_0}{g \kappa \cdot w' \Theta'} \text{ a Monin-Obukhov hossz} \quad (5.4)$$

ahol T_0 az abszolút hőmérséklet, g a gravitációs gyorsulás, $\overline{w'\Theta'}$ pedig a vertikális szélesség és a potenciális hőmérséklet kovarianciája.

5.1 A geosztrofikus erőtvény és a geosztrofikus szél

A geosztrofikus szél a Coriolis és a nyomási erő egyensúlya, melyet a nyugati szelek övében mozgó ciklonok és anticiklonok által előidézett nyomási gradiens határoz meg. Ideális esetben – stacionaritást, homogenitást és barotrópiát feltételezve – ez az egyensúly könnyen számítható. A geosztrofikus erőtvény a dinamikai sebesség, a Coriolis paraméter (f) és az érdességi magasság függvényében definiálja a geosztrofikus szelet (Clarke és Hess, 1974; Yamada, 1976). E törvény segítségével a különböző magasságokban végzett felszíni mérésekből a geosztrofikus szél számítható, mely neutrális esetben az alábbi módon írható:

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left(\ln \left(\frac{u_*}{f z_0} \right) - A \right)^2 + B^2} \quad (5.5)$$

ahol G a geosztrofikus szél, A és B pedig empirikus konstansok. (Általában $A=1,1-1,9$ és $B=3,0-4,3$ értékeket használnak.) Nem neutrális esetet feltételezve a konstansok a stabilitási paraméter egyszerű függvényei lesznek.

A szél magassággal való elfordulását a következő képlettel számoljuk:

$$\sin \alpha = - \frac{B u_*}{G \kappa} \quad (5.6)$$

ahol α a felszíni és a geosztrofikus szél által bezárt szög.

6. A WAsP modell

Az általunk használt WAsP - Wind Atlas Analysis and Application Program - a széladatok horizontális és vertikális extrapolációjára szolgáló lineáris, spektrális modell (Mortensen et al., 1993), melyet Dániában, Roskilde-ben (RisØ National Laboratory) fejlesztettek ki. Ezen modell felhasználásával készült el az Európai Szélatlasz (Troen és Petersen, 1989) is. A WAsP alkalmas a domborzati és érdességi adatok alapján egy terület szélklimájának becslésére, az átlagos szél teljes energiájának számítására, és a rendelkezésre álló teljesítménygörbék segítségével a szélturbina közepes teljesítmény outputjának meghatározására. A modell adaptálása során bemenő adatként felszíni szélmérések idősorát, illetve rádiószondás mérésekből és a talaj menti légnyomás analíziséből származtatott geosztrofikus széladatokat használtunk. Három – az érdesség, a domborzat és az árnyékoló objektumok hatását elemző – almodell segítségével elvégzett transzformáció (mely a geosztrofikus erőtvényen alapszik) az adott terület szélklimájának leírását adja. Ezek az úgynevezett széltérkép statisztikák, melyek segítségével a vizsgált terület bármely pontjára jellemző szélmező meghatározható. Vizsgálataink során egy és több pontszerű input adatsor alapján kisebb, majd nagyobb térségekre számoltunk szélmező statisztikákat.

6.1 A szélmező modellezésének korlátai

A felszín tulajdonságainak megváltozása nagymértékben befolyásolja a turbulens áramlási viszonyokat, a szélességet és a szélirányt. Alapvetően négy paraméter felelős a talaj közeli szélmező alakulásáért:

- a felszíni érdesség,
- a topográfia,
- az árnyékoló objektumok jelenléte (épületek, fák),
- a felszín hőmérsékleti és nedvességi karakterisztikái.

Mérsékelt és erősen szeles vidékeken a hőmérsékleti hatások elhanyagolhatóak. A felhasznált modell közel kiegyenlített, semleges légrétegződést tételez fel, mivel a szélenergia termelés szempontjából a nagy szélességek lényegesek. Így a logaritmikus széltörvényt (5.1) használja, azonban a logaritmikus szélprofil egyenletére a felszíni hőfluxus klimatológiai átlagai és négyzetes középértékei alapján stabilitási korrekciót alkalmaz.

A topográfia mind a szélesség, mind a vertikális szélprofil helyről-helyre történő változását előidézi. Lankás vidéken ezeket a változásokat a modell tökéletesen képes követni. Meredek domboldalak, völgyek esetén azonban a nem-lineáris hatások meghatározóvá válnak, az áramlás szeparálódik. A domborzat hőmérsékleti hatások révén is befolyásolhatja az áramlási mezőt (például hegy-völgyi szélrendszer). A modellezés várhatóan legnagyobb hibái összetett terepekhez kötődnek. A korlátos számítógép kapacitás miatt az egyszerűbb modellek gyakran elhanyagolják ezeket a nemlineáris és hőmérsékleti hatásokat, amely azt jelenti, hogy a modellt a planetáris határréteg semleges rétegződésére és nem túl meredek terep vizsgálatára korlátozzák.

6.2 A széltérkép statisztika

A széltérkép statisztikák létrehozásának főbb lépései az 34. ábrán láthatóak (Troen és Petersen, 1989). Abban az esetben, ha bemenő adatként a szélirány és szélesség

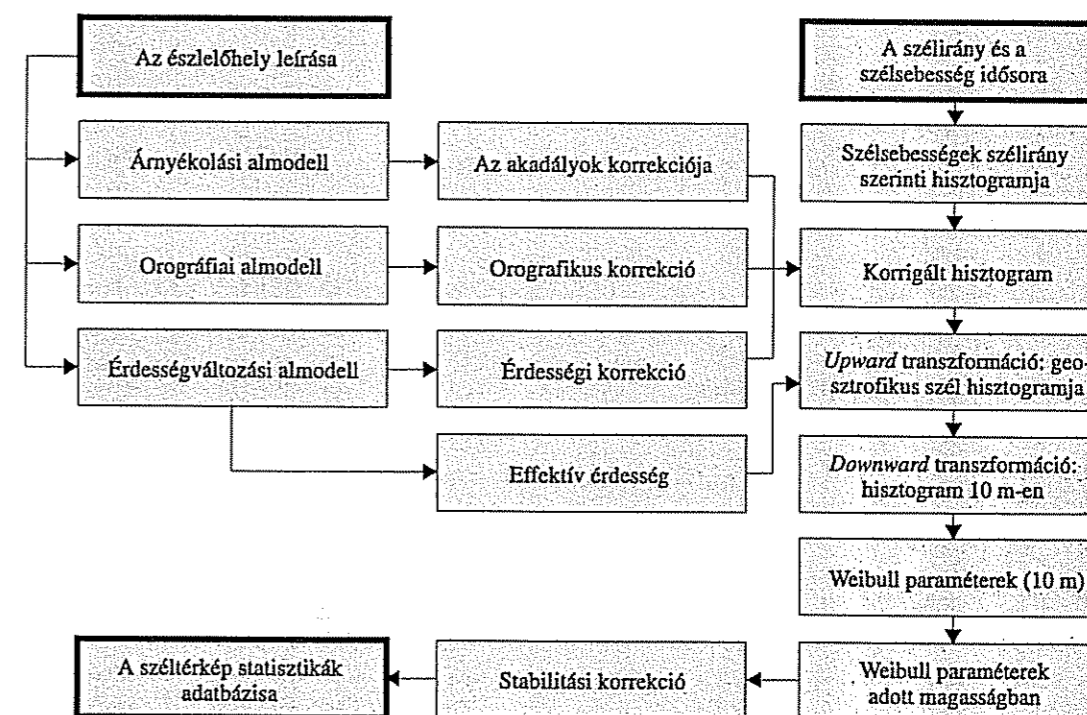
mérések idősorát használjuk fel, első lépésként a 12 szélirányszektorra (egyenként 30°-osak) bontott szélességi értékek hisztogramjának meghatározása történik. Mivel a szélességek eloszlását általában Weibull-eloszlással közelítik, az alkalmazott módszerrel az átlagos szél szektoronkénti eloszlását jellemző Weibull paramétereket kaphatjuk meg. A kétparaméteres Weibull-eloszlás sűrűségfüggvénye az alábbi módon írható fel:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (6.1)$$

ahol a két paramétert: A-t és k-t skála-, illetve alakparaméternek nevezik. Az alakparaméter értékétől függően három speciális esetet különböztetünk meg:

- ha k=1, akkor az exponenciális,
- ha k=2, akkor a Rayleigh,
- ha k=3,5, akkor megközelítőleg a normál eloszlást kapjuk.

A k értéke általában 1,5 és 3 közé esik, de az esetek többségében megközelíti a kettőt, ezért gyakran Rayleigh eloszlással közelítik a széladatok gyakorisági eloszlását.



34. ábra: A széltérkép statisztikák létrehozásának sematikus diagramja.

Ahogy már korábban említettük, a vizsgált területet jellemző szélmezőt a terep három fontos tulajdonsága befolyásolja, nevezetesen az érdesség, a domborzat és az áramlásnak akadályt képező objektumok jelenléte. A WAsP modellben a fenti módosító hatások által okozott változásokat három almodell segítségével közelítik. Ezek az almodellek függetlenek, de a futtatás során hatással vannak egymásra. Minden egyes almodell korrekciós tényezőket számol a különböző szektorokra. Az így számolt korrekciókat alkalmazva a környezeti hatásoktól mentes adatbázishoz jutunk.

a./ Érdességi almodell

Összetett érdességű terület vizsgálata esetén az áramlásra minden egyes új felszín befolyással van. Tekintsük a legegyszerűbb esetet, érdesről sima felületre történő áramláskor (például szárazföldről a tenger felé) a felszín közelében a stressz hirtelen lecsökken, mely a talaj menti rétegben az áramlás sebességének felgyorsulásához, viszont a függőleges szélnyírás csökkenéséhez vezet. Az érdesség megváltozásának helyétől távolodva ez a belső határrétegnek nevezett módosult áramlási réteg egyre vastagabb lesz, azonban a felette fekvő rétegekben a fizikai viszonyok állandóak maradnak, a szélprofil nem változik. A WAsP a szélességek modellezéséhez érdességváltozási vonalakat használ, melyeket a domborzati térképpel együtt is megadhatunk. A számításoknál a modell egy adott irányban maximum 10 érdességváltozási vonalat értelmez. Az érdesség megváltozásának helyétől x távolságra a belső határréteg h magassága (Panofsky, 1973):

$$\frac{h}{z_0} \left(\ln \frac{h}{z_0} - 1 \right) = konst \cdot \frac{x}{z_0} \quad (6.2)$$

$$z_0' = \max(z_{01}, z_{02})$$

ahol z_{01} és z_{02} a két eltérő felszín érdességi magassága. A konstans értéke a WAsP-ban 0,9. A felszíni érdesség megváltozása miatt a dinamikai sebesség is változik. A modellben az alábbi empirikus összefüggés definiálja ezt a változást:

$$\frac{u_{*2}}{u_{*1}} = \frac{\ln(h/z_{01})}{\ln(h/z_{02})} \quad (6.3)$$

A belső határrétegben az áramlás módosulása miatt a logaritmusos szélprofil egyenlete már nem használható. Mérési és modellezési eredmények (Rao et al., 1974; Sempreviva et al., 1990) azt mutatják, hogy ebben a rétegben a szélprofil három különböző logaritmusos rész segítségével közelíthető:

$$\begin{aligned} \text{ha } c_1 h \leq z & \quad u(z) = u' \frac{\ln(z/z_{01})}{\ln(c_1 h/z_{01})} \\ \text{ha } c_2 \leq z \leq c_1 h & \quad u(z) = u'' + (u' - u'') \frac{\ln(z/c_2 h)}{\ln(c_1/c_2)} \\ \text{ha } c_2 h \leq z & \quad u(z) = u'' \frac{\ln(z/z_{02})}{\ln(c_2 h/z_{02})} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\text{ahol: } u' = (u_{*1} / \kappa) \ln(c_1 h / z_{01})$$

$$u'' = (u_{*2} / \kappa) \ln(c_2 h / z_{02})$$

$$c_1 = \frac{1}{3}, \quad c_2 = \frac{1}{15}$$

A WAsP-ban felhasznált értékek: $c_1=0,3$, $c_2=0,09$. Az egyenletek többszöri alkalmazásával összetett felszínhasználatú rendelkező terepek is modellezhetőek, de szektoronként összesen 10 érdesség változás paraméterezhető.

b./ Domborzati almodell

Összetett terep felett kialakuló áramlási mező leírása lényegében két alapelv segítségével közelíthető:

- Dombtető felett az átlagos szélesség akár 80%-kal is nagyobb lehet, mint ugyanazon magasságban (Δz) a zavartalan áramlás átlagos sebessége.
- A luv és lee oldalon azonban 20-40%-os csökkenés tapasztalható.

Az így fellépő relatív sebességváltozás (azonos felszín feletti magasságot tekintve) az alábbi egyenlettel definiálható:

$$\Delta S = \frac{u_2(\Delta z) - u_1(\Delta z)}{u_1(\Delta z)} \quad (6.5)$$

u_1 = a zavartalan szélesség,

u_2 = a módosított szélesség,

Δz = felszín feletti magasság.

Az alkalmazott domborzati almodell egy a Jackson-Hunt (1975) elméletre alapozott lineáris spektrális modell. Az áramlásban egy külső és egy belső réteget különít el. A külső réteg nem viszkózus, benne a turbulens hőcsere elhanyagolható, a szélnyírás kicsi. A külső réteg tetejénél már megközelítőleg a zavartalan szélprofil érvényes. A belső réteg vastagsága l , melyre erős szélnyírás jellemző. A réteg vastagságát Jackson és Hunt az alábbi képlettel adta meg:

$$\frac{1}{L} \ln \left(\frac{l}{z_0} \right) = 2 \kappa^2 \quad (6.6)$$

ahol logaritmusos szélprofil tételnek fel. Jensen (1984) szerint a belső réteg vastagsága jobban közelíti a megfigyeléseket, ha az alábbi összefüggést használjuk:

$$l = 0.3 \cdot z_0 \left(\frac{L}{z_0} \right)^{0.67} \quad (6.7)$$

Ez az a képlet, melyet a WAsP modell is használ. A külső rétegben, ahol a turbulens momentum átvitelt elhanyagoljuk, a domborzat által okozott perturbációkat a potenciális áramlás elve szerint számítjuk.

A WAsP zooming rácsot használ, ahol radiális irányban a rács távolság a középpontban a legkisebb, és kifelé $\Delta r_{j+1} = 1,06 \Delta r_j$ faktossal növekszik. A rács 100 sugárirányú pontból áll, mely 10 km-es sugár esetén 2 m-es, 50 km-es sugár esetén pedig körülbelül 10 m-es felbontást jelent a középpontban.

c./ Árnyékolási almodell

Egy akadály jelenléte erősen befolyásolja az áramlási mezőt, mely hatás a széliránnyal ellentétes oldalon a szélesség relatív csökkenésében nyilvánul meg. Ez a sebességváltozás vertikálisan az akadály magasságának körülbelül háromszorosáig, horizontálisan (az akadály mögött) 30-40-szereséig terjed. Ha a vizsgált pont ezen, az úgynevezett leárnyékolás területén belül fekszik, akkor az objektum részletes leírása szükséges, ellenkező esetben csak érdességi elemként kell figyelembe venni. Az árnyékoló hatás jelenléte az akadálytól való távolságtól (x), az akadály magasságától (h), a vizsgált pont felszín feletti magasságától (z_0), az akadály hosszától (L) és

porozitásától (P) függ. Egy egyszerű kétdimenziós akadály esetére – mint egy hosszú fasor, vagy fal – szélcsatornás kísérletek alapján *Perera* (1981) írta fel az alábbi kifejezést:

$$\frac{\Delta u(z_a)}{u(z_a)} = 9,75 \left(\frac{h}{z_a} \right)^n \frac{h}{x} (1-P) \eta \exp(-0,67\eta^{1,5}) \quad (6.8)$$

$$\text{ahol: } \eta = \frac{z_a}{h} \left(\frac{0,32}{\ln(h/z_0)} \cdot \frac{x}{h} \right)^{\frac{1}{n+2}}$$

és $n=0,14$ a WAsP-ban.

(Felhívjuk a figyelmet, hogy ez az egyenlet hibásan szerepel az Európai Szélatlaszban (*Troen és Petersen, 1989*.) A WAsP modellben különféle típusú akadályok különböztethetők meg, melyeket relatív helyzetük, dimenziójuk és porozitásuk jellemez. A porozitás az akadály anyagától függ, amit a nyitott és a teljes felszín hányadosa ad. Épületek porozitása közel nulla, a fák esetében 0,5-es értékkel számolhatunk. Figyelembe kell venni azonban a fák porozitásának évszakos változását, azaz ekkor – az érdességi magassághoz hasonlóan – a porozitás is klimatológiai paraméterként kezelendő.

Ez az almodell nem ad kielégítő eredményeket az akadály közvetlen közelében, ahol a turbulencia erős és az áramlás kifejezetten összetett. Azonban egy tipikus árnyékoló objektum szélességre gyakorolt hatása csak néhány százalékra tehető, ami azt jelenti, hogy még az itt előforduló nagy hibák is csak csekély mértékben befolyásolják a szélmező elemzését.

6.3 Modell számítások

A WAsP számításai a szélesség értékek szektoronkénti eloszlásának transzformációján alapulnak. Először a széladatokban szereplő helyi hatások kiküszöbölése történik az úgynevezett upward transzformációban, ezt követi a downward transzformáció, mely műveleteket az alábbiakban részletezzük.

Upward transzformáció: Minden szektorban a geosztrofikus erőtvényt felhasználva meghatározható az adott területre jellemző geosztrofikus szélklíma. A geosztrofikus erőtvényben (5.5) szereplő A és B empirikus konstansok értéke a modell alapbeállítása szerint: $A=1,8$ és $B=4,5$, természetesen az értékek megváltoztathatóak. Ezt a folyamatot upward transzformációnak hívjuk.

Downward transzformáció: A következő lépésben a kapott geosztrofikus szél kisebb magasságokra történő leskálázása történik, miközben az érdességet az egész területre nézve állandónak tekintjük. Ebben az úgynevezett downward transzformációban a megfelelő szélklíma osztály meghatározása történik. A geosztrofikus erőtvény (5.5) és a logaritmusos szélprofil (5.1) felhasználásával, valamint öt standard magassági és négy standard érdességi kategória bevezetésével összesen 20 különböző adategyüttest kapunk. Alapbeállítás szerint a felhasznált magasságok: 10, 25, 50, 100 és 200 méter, a felhasznált érdességek: 0,0002, 0,03, 0,1 és 0,4 méter. Első lépésként a 10 méteres magassághoz tartozó értékeket számítjuk, majd ebből a felszíni hőfluxus hatását figyelembe véve határozzuk meg a magasabb szintekre vonatkozó Weibull

paramétereket. A hőfluxust a klimatológiai átlaggal és a négyzetes középpel jellemezzük, melyek szárazföld és tengerek felett az alábbi értékeket veszik fel:

$$\begin{aligned} \text{Átlagos hőfluxus szárazföld felett} &= -40 \text{ W/m}^2 \\ \text{Átlagos hőfluxus tenger felett} &= 15 \text{ W/m}^2 \\ \text{Hőfluxus négyzetes közepe szárazföld felett} &= 100 \text{ W/m}^2 \\ \text{Hőfluxus négyzetes közepe tenger felett} &= 30 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

A fenti eljárással kiszámítottuk a standard magasságokra és érdességi osztályokra vonatkozó Weibull paramétereket. Az így kapott széltérkép statisztikák alkalmasak a vizsgált terület más pontjait jellemző szélmező meghatározására.

6.4 A széltérkép statisztikák alkalmazása

A létrehozott széltérkép statisztikák segítségével az adott terület más pontjaira is megbecsülhettük a szélirányok és szélességek eloszlását a vizsgált mérési időtartamra vonatkozóan. Ekkor – ugyanazokat az almodelleket felhasználva – fordított sorrendben végeztük el a széltérkép statisztikák létrehozásánál tett lépéseket. A vizsgálandó pont (a szélturbina tervezett helye) kiválasztásával a bemenő adatok is változtak, hiszen minden esetben az új térséget lefedő terepmodell alkalmazására volt szükség. A korrekciós tényezők kiszámítása után az új helyszín széleloszlására jellemző Weibull paramétereket, az átlagos szélességet és a rendelkezésre álló energiát kaptuk eredményül.

7. Modellek adaptálása, hazánk szélenergia készletének felmérése

Magyarországon a szélmérő műszerek elhelyezésének konvencionális magassága 10 m. Azonban a szélgenerátorok – melyek felállítására és gazdaságos működtetésére az újabb vizsgálatok eredményeként talán hazánkban is van remény – átlagos magassága ennél lényegesen nagyobb. (Kisteljesítményű generátorok esetén: 12-20 m, nagyteljesítményű szélérőművek esetén 30-60 m.) A hazai mérési idősorok felhasználásával a működési szint szélenergia készletét vertikális extrapoláció segítségével becsülhetjük, de sokkal pontosabb értékeket kapunk, ha az adott magasságban elhelyezett mérőműszerek adataival dolgozunk. Elsőként a rendelkezésünkre álló 17 m-es magasságban mért svéd állomáshálózat adatain végeztünk esettanulmányt, hogy megvizsgáljuk a felhasznált modell adott területre vonatkozó adaptálhatóságát. Ezen vizsgálatok egyben azt is hivatottak tesztelni, hogy a WASP modell mennyire megbízhatóan alkalmazható hegyvidéki területekre, vagy csak dombvidéken és sík térségeken nyújt kielégítő eredményt.

7.1 Svédországi terepre végzett esettanulmányok eredményeinek összefoglalása

Hivatkozva korábbi megállapításainkra, a modellfuttatások legnagyobb hibái várhatóan összetett terepek vizsgálatánál jelentkeznek. A modellezés korlátainak feltárása érdekében végzett kutatásaink során lehetőségünk nyílt a WASP modell egy svédországi terepen való tesztelésére. A vizsgált terület az Akkajaure tó völgye (35. ábra), mely Svédország északi részén, a Sjöfallets Nemzeti Parkban fekszik. Domborzata erősen tagolt. Az év jelentős részében a területet hó fedi, mely az egyes felszíntípusok érdességi különbségeit jelentősen tompítja. A mély folyóvölgyet meredek sziklafal kíséri, melyben négy szélmérőtorony működik.



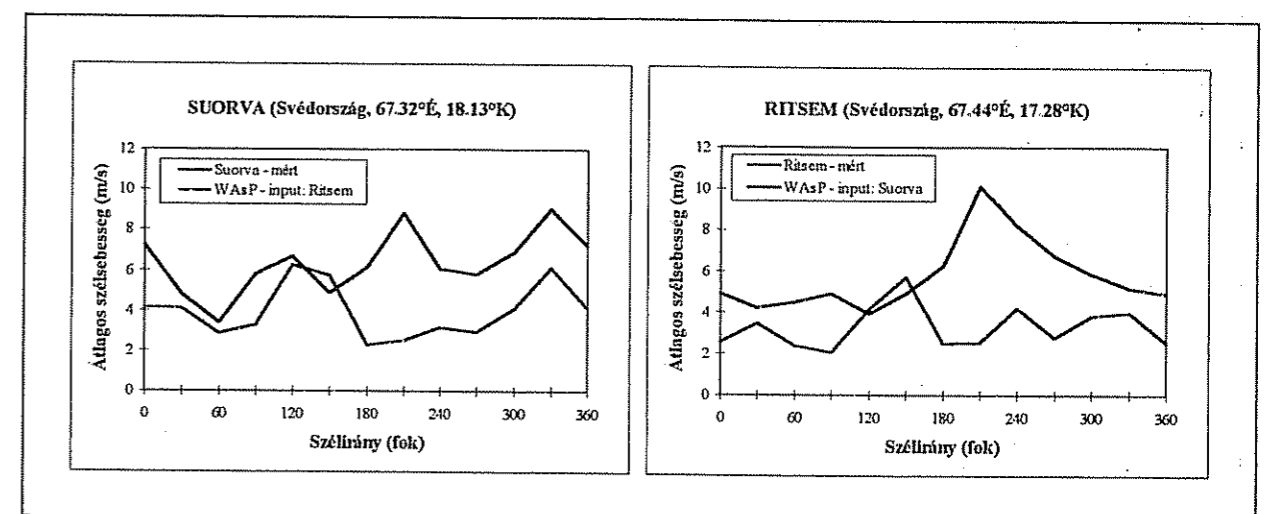
35. ábra: Mérőhelyek a svédországi Akkajaure tó völgyében.

A felhasznált adatsorok mérési időtartama az egyes állomások esetén különböző:

Ritsem	1981.03.01 - 1995.10.31
Suorva	1995.11.14 - 1996.11.13
Vietas	1996.02.02 - 1998.03.31
Juobmotjakká	1997.05.15 - 1998.09.10

Míg Suorváról 10 perces, addig Vietas és Juobmotjakká esetén órás, Ritsem állomásról pedig három órás átlagértékek álltak rendelkezésünkre. Az egyes állomások körül 50×50 km-es terület domborzati viszonyait vettük figyelembe 100 méterenként megrajzolt szintvonalak felhasználásával. Az érdességváltozási zónákat egy matematikai algoritmus segítségével számítottuk ki, s a különböző típusú felszínek érdességi magasságait a szakirodalom által ajánlott értékek figyelembevételével rögzítettük (örökzöld erdők: 0,8 m; zárt bokros területek: 0,2 m; nyitott bokros területek: 0,1 m; füves puszták: 0,01 m; kopár sziklák, jég- és hófelszínek: 0,001 m; vízfelszínek: 0,0001 m). A mérőhelyek közelében épület, vagy egyéb áramlást befolyásoló objektum nem található.

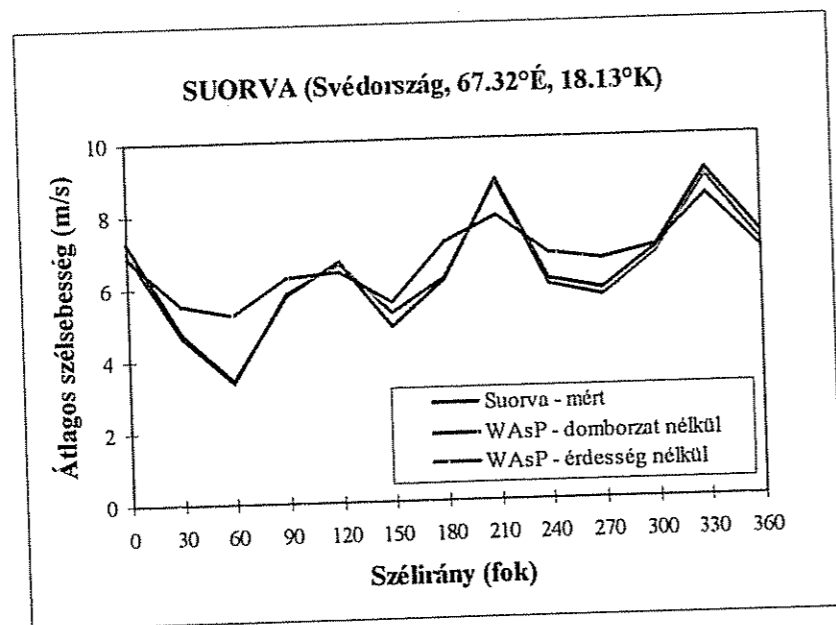
Első lépésként Ritsem és Suorva állomásról származó 17 m-es magasságban mért, többéves adatsorokat használtuk fel. Míg Ritsem egy lankásabb, addig Suorva két meredek hegyoldallal körbevett völgyszakaszban fekszik. A Ritsem állomásról származó méréseket bemenő adatként használva Suorva szélklímáját modelleztük, s a tizenkét szektorra számított átlagos szélesebességeket és a mért értékeket a 36. ábrán tüntettük fel. A modellezett átlagos szélesebesség 3,96 m/s, amely 37 %-kal kisebb, mint a mért 6,31 m/s-os érték. Általánosságban elmondható, hogy a modellezett értékek mindig a mért átlagos szélesebességek alatt maradtak, s jelentős különbség mutatkozik a nyugatias irányú szelek esetén. A legkisebb hibát a 135° és a 315° körül kaptuk, mely irányok megegyeznek a völgy fekvésének irányával. A modellezett értékek maximumai és minimumai nem esnek egy szektorba a mért adatok szélsőértékeivel.



36. ábra: Mért és modellezett szélesebességek összehasonlítása Suorva és Ritsem esetén.

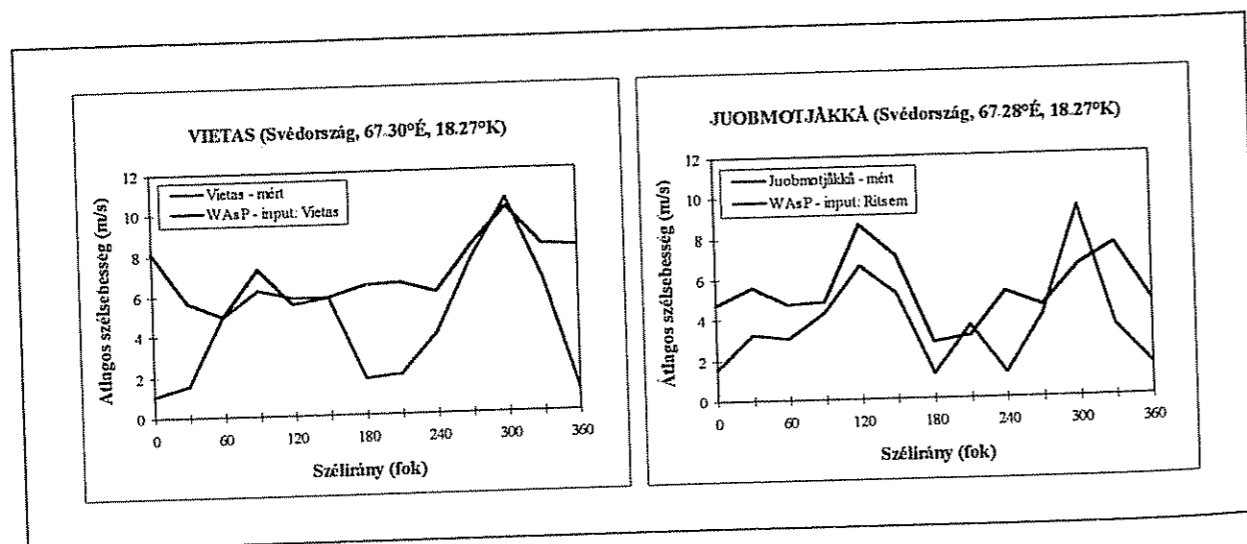
Ellenőrzésképpen a szimulációt fordítva is elvégeztük, Suorva mért adataiból állítottuk elő Ritsem szélklímáját (36. ábra). A modellezett átlagos szélesebesség 5,83 m/s. Ezzel szemben a mért átlagos szélesebesség ennél 42 %-kal kisebb, 3,36 m/s. A

modellezett értékek ebben az esetben általában túl magasak, de a legnagyobb eltérések iránya megegyezik az előző szimulációban említett iránnyal.



37. ábra: Mért és modellezett szélességi értékek összehasonlítása Suorva esetén.

A fenti probléma feltárása érdekében folytatott modellezéseinket az 37. ábrán foglaltuk össze. Az összetettebb domborzati kép miatt elsőként a Suorván mért adatokat használtuk fel az állomáson uralkodó átlagos szélességek regenerálására, és egyik esetben eltekintettünk a domborzat, másodszor az érdesség áramlámódosító hatásáról (Sandström, 1994). A domborzatot síknak tekintve a modellezett átlagos szélesség 6,26 m/s, mely jó egyezésben áll a mért 6,31 m/s-os értékkel. Ez a két görbe alig tér el egymástól. A másik esetben a szimuláció átlagos szélessége 6,63 m/s, ami elfogadható, de bizonyos szektorok esetén már nagyobb eltérések is mutatkoznak. A lankás, kevésbé meredek völgyszakaszban fekvő Ritsem állomásra elvégzett hasonló vizsgálat azonban nem mutatott jelentős eltérést a különböző feltételekkel végzett futtatások esetén. Azaz, a WAsP szimulációk nagy hibáiért a domborzat áramlámódosító hatása felelős.

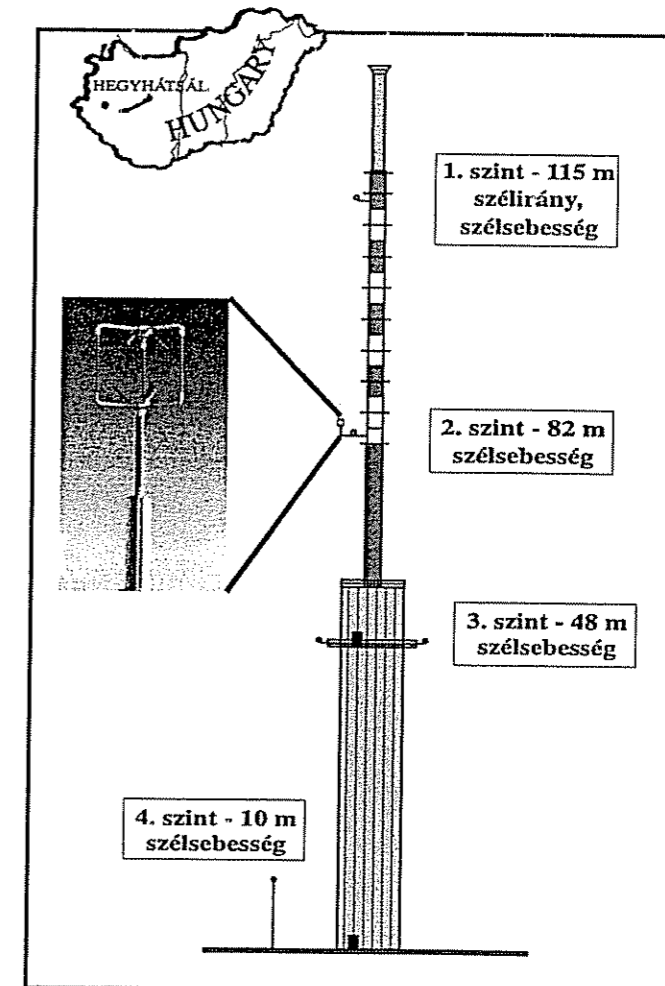


38. ábra: Mért és modellezett szélességek összehasonlítása Vietas és Juobmotjåkkå esetén.

A modellezett és a mért értékek közti nagy eltérések miatt még két állomás - Vietas és Juobmotjåkkå - vizsgálatát is elvégeztük. A 38. ábrán az egyes állomásokon mért széladatok regenerálásának eredményei láthatóak. Vietas esetében a modellezett átlagos szélesség 6,93 m/s, mely 43 %-kal magasabb, mint a mért 4,84 m/s. A völgy fekvésének irányára merőlegesen a két érték közti különbség eléri a 7 m/s-ot. Míg a maximumok azonos szélirányszektorban találhatóak, a minimumokról ez már nem mondható el. Juobmotjåkkå esetén már lényegesen jobb összefüggést találunk az átlagos szélességek között, bár a modellezett nyugatias szelek túl erősek. A modellezett szélesség (4,54 m/s) 16 %-kal nagyobb, mint a mért 3,92 m/s-os érték. A két állomás közti különbség ebben az esetben is a domborzati adottságok eltérő voltából adódik. Míg Vietas egy meredek hegyoldalon, addig Juobmotjåkkå a völgy ellaposodó végében található. Látható tehát, hogy a modell szimulációk nagy hibáiért a domborzat hatása felelős. Így összetett terep vizsgálata esetén a WAsP domborzati almodellje különös figyelmet igényel.

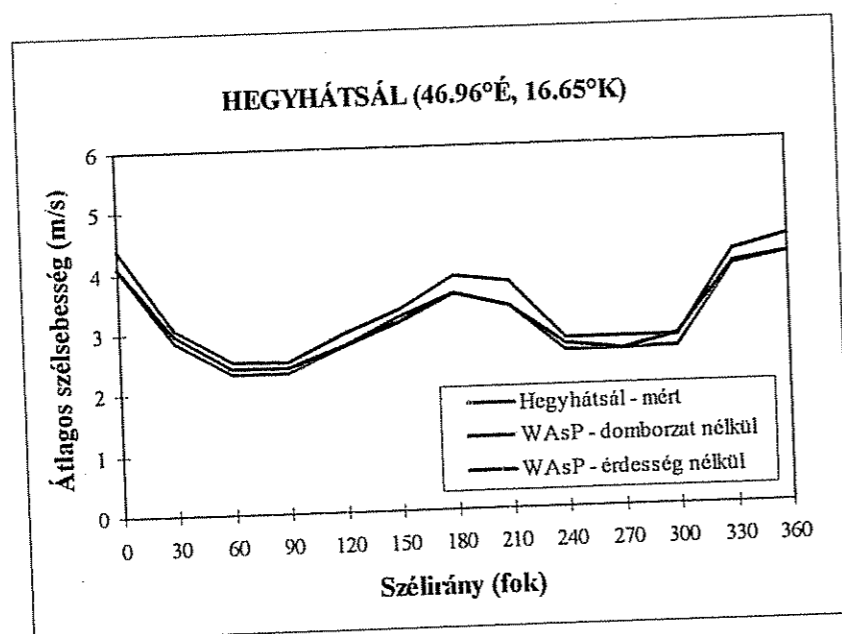
7.2 A hegyhátsági expedíciós mérésorozat elemzése

A modell korlátainak feltárása után a hazai alkalmazási lehetőségek felmérésére fordítottuk figyelmünket. Célunk az ország különböző területein mért széladatok felhasználásával a hasznosítható szélenergia szempontjából hazánk leggazdaságosabb területeinek meghatározása volt.



39. ábra: A hegyhátsági mérőhely.

1994 szeptembere óta az Antenna Hungaria tulajdonában lévő hegyhátsáli átjátszó tornyon végzünk szélirány és szélesség méréseket (Haszpra et al., 2001) 4 szinten (39. ábra). A torony tengerszint feletti magassága 248 m. A környező területeken döntően mezőgazdasági termelés folyik, a legközelebbi falu 1 km-re található. Összehasonlításként, s hogy igazoljuk a WAsP modell magyarországi adaptálhatóságát, a svéd Suorva állomás esetén tárgyalt futtatásokat a hegyhátsáli állomás 10 m-en mért adataira is elvégeztük, melynek eredményei a 40. ábrán láthatóak.



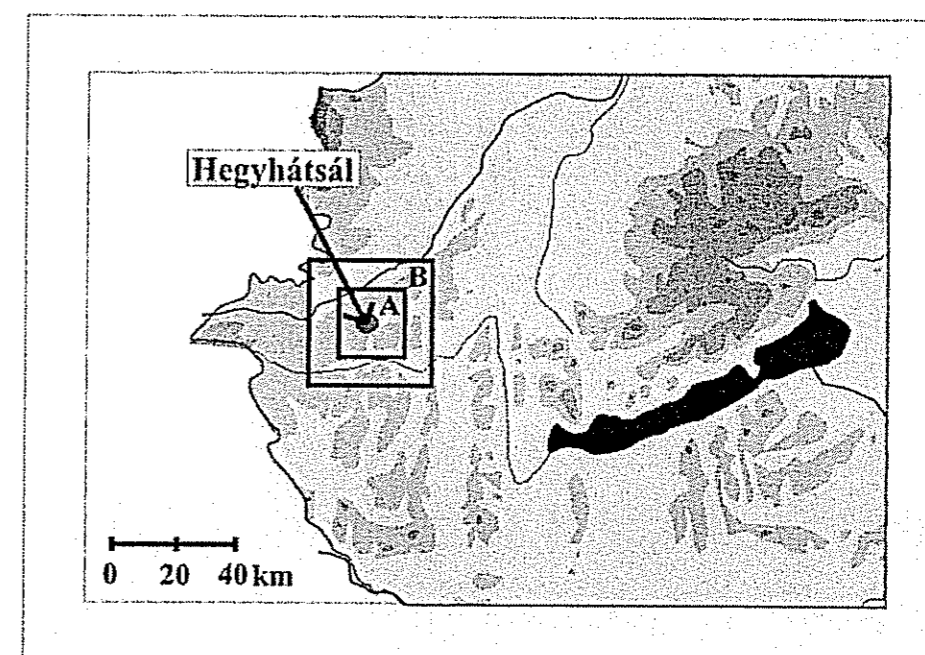
40. ábra: Mért és modellezett szélességi értékek összehasonlítása Hegyhátsál esetén.

A vizsgált területet síknak tekintve a modellezett átlagos szélesség 3,02 m/s-nak adódott, míg eltekintve az érdesség áramlámódosító hatásától a modellezett átlagos szélesség 3,06 m/s. Ezen értékek jó egyezésben állnak a mért 3,23 m/s-os értékkel. A 40. ábrán megfigyelhető, hogy a három görbe futása hasonló, a szélesség és szélirány értékek alig térnek el egymástól. Így – ellentétben a svédországi hegyvidéki kísérlettel – levonhatjuk azt a következtetést, hogy a dombvidéki terület orográfiai viszonyai nem okoznak jelentősebb modellezési hibát, a mért, a domborzat, valamint az érdesség áramlámódosító hatásának elhanyagolásával modellezett értékek között nincs számottevő különbség. Így lehetőségünk nyílt a hegyhátsáli adatok extrapolálásával a környező terület áramlási viszonyainak meghatározására.

A hegyhátsáli mérőtorony és a szélpotenciál becsléséhez használt két körzet (A és B) földrajzi elhelyezkedését a 41. ábrán mutatjuk be. A 42. ábrán Hegyhátsál 20×20 km-es körzetére (41. ábra: A mező) 1 km-es ráctávolságot használva a kisteljesítményű generátorok átlagos elhelyezésének megfelelő 18 méteres magasságra számított átlagos szélességi és potenciális szélenergia értékek térképe látható. Bemelő paraméterként az állomás 50×50 km-es körzetének orográfiai viszonyait 25 méterenként rajzolt izovonalas, digitális térképpel adtuk meg. A felszín érdességét a modell számára négy érdességi paraméter osztály bevezetésével érzékeltettük: 0.0001 m (vízfelszínek), 0.1 m (mezőgazdasági területek, tagolt felszín, kistelepülések), 0.5 m (sarjerdők, falvak) és 1 m-es értékkel (városok, erdők).

Összehasonlításként a 43. ábrán a 40×40 km-es körzet (41. ábra: B mező) 5 km-es felbontásban modellezett eredményeit tüntettük fel. Látható, hogy lényegesen durvább

felbontás ellenére az átlagos szélességű és szélpotenciálú területek jól megfeleltethetők egymásnak. Mivel a kinyerhető szélenergia értéke nagyon gyorsan növekszik a szélesség növekedésével – hiszen a szélturbina teljesítménye a szélesség köbével arányos – az átlagos szélesség kismértékű változása esetén lényegesen nagyobb változás mutatkozik a potenciális szélenergia értékében. A két térképet összehasonlítva észrevehető, hogy a nagyobb felbontással készült térkép elmosza a részleteket, a szélenergia hasznosítása szempontjából fontos területek kijelölése lényegesen bizonytalanabb. Nem finomítható azonban tetszőlegesen a felbontás, hiszen a terepmodell 1 km-es felbontása határt szab a ráctávolság megválasztásának. Ennél kisebb felbontásban a domborzati és érdességi viszonyok már nem tükrözik a valóságos állapotokat.



41. ábra: A hegyhátsáli mérőtorony és a szélpotenciál becsléséhez használt két körzet földrajzi elhelyezkedése.

A nagyobb teljesítményű szélenergia készletének energiatermelésének becslésekor a 30-70 méteres szintek szélviszonyai alapján kell számolnunk. A 44. ábra a nagyteljesítményű szélturbinák átlagos magasságának megfelelő 50 m-es magasságban a 40×40 km-es körzet (41. ábra: B mező) 1 km-es felbontásban modellezett eredményeit mutatja be. Az alacsonyabb légrétegek szél és teljesítmény térképeivel jó egyezést láthatunk. Ebben a magasságban már nem érzékelhetők a mikroklimatikus zavaró hatások, s így szignifikánsabban jelentkezik a Kemenes-hát északi lejtőjén és a Rába-völgyben a szélmaximum. Általánosan megjegyezhetjük, hogy ezen a szinten – a 18 méteres szinthez képest – már közel kétszeres szélenergia mennyiséget találhatunk.

7.3 Hazánk szélenergia készletének feltérképezése

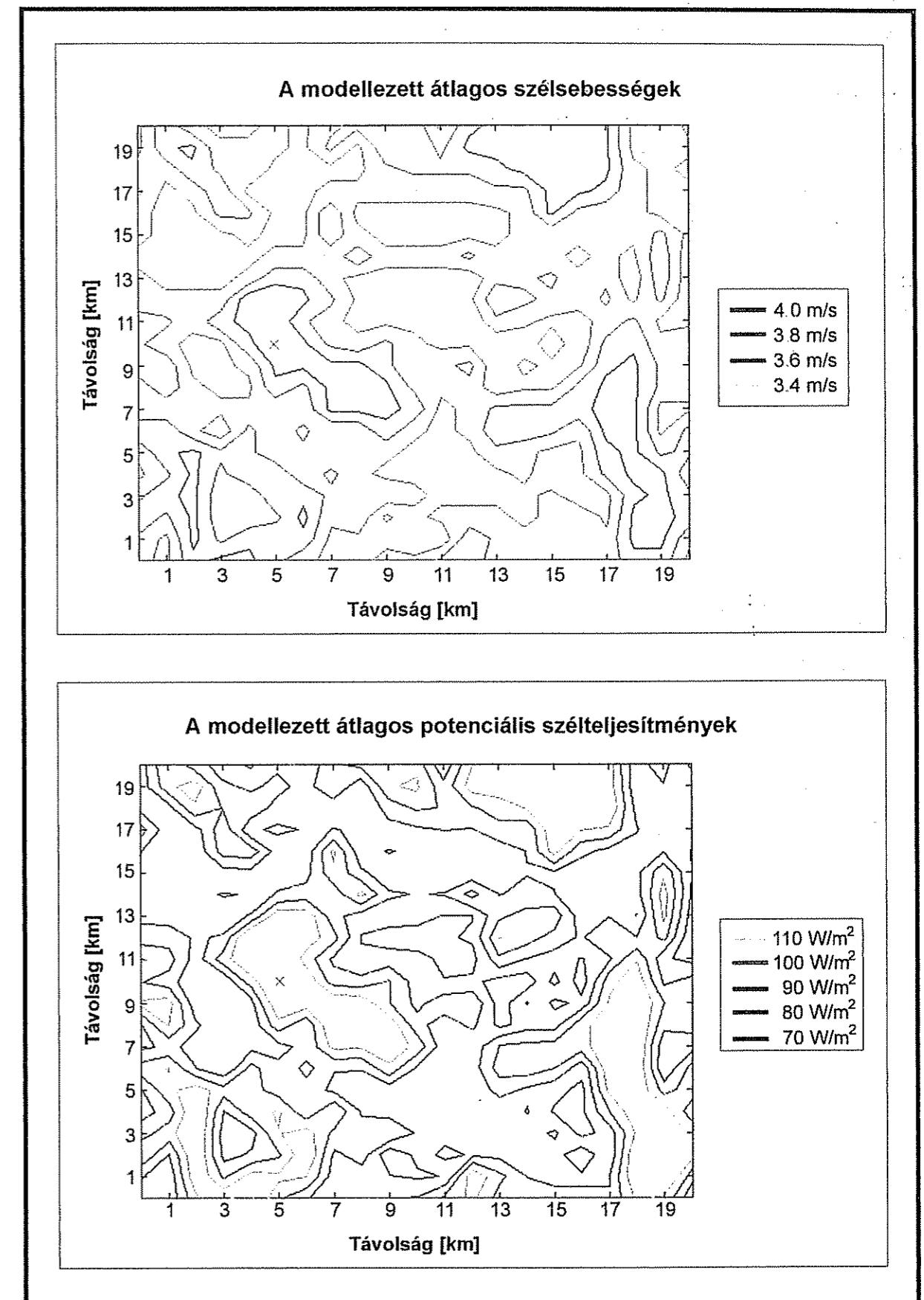
A WAsP modell és a digitális terepmodellek segítségével lehetőség nyílik hazánk szélenergia készletének felmérésére, az ország szélenergia hasznosíthatóság szempontjából történő regionalizálására. Mivel a mért adatok extrapolálásakor csak a mérőhely nem túl távoli (80-120 km-es) körzetében kapunk elfogadható eredményt, a teljes Magyarország évszakos bontású és megfelelő pontosságú szélenergia térképének

megrajzolása akadályokba ütközik. Növeli a nehézségeket az, hogy precíziós, nagyfrekvenciás mérőműszerek (GILL Research Sonic Anemometer) hosszabb idősoraira lenne szükség a szélenergetikai becslések pontosításához. A nemzeti szolgálatok klímaállomásain végzett hagyományos szélmérési technikának szinte áthidalhatatlan hiányossága az óránkénti 10 perces átlagok archiválása, mely az energetikai számításoknál – a harmadik hatványok miatt – nagy hibát eredményez.

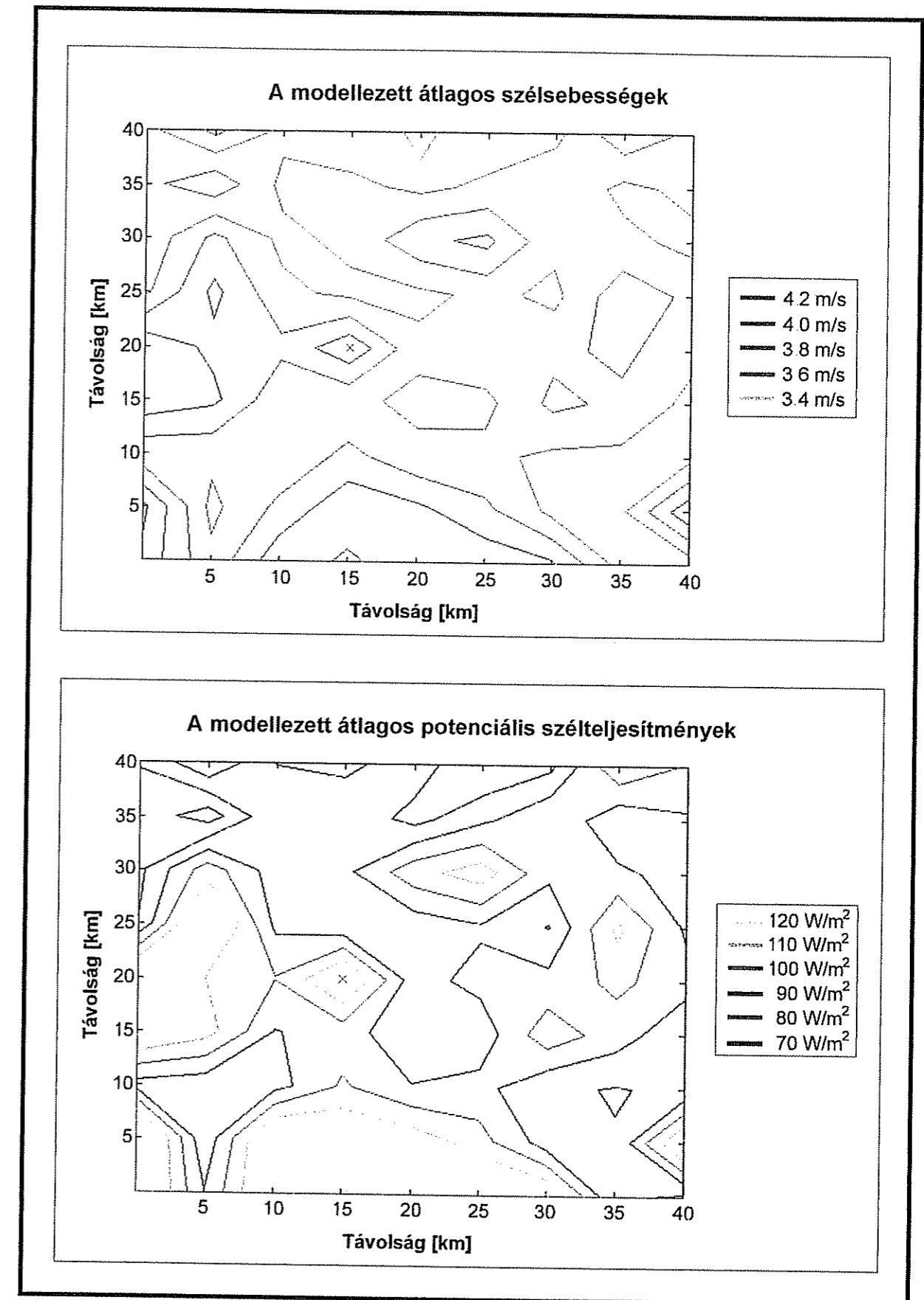
A széltérképek és szélpotenciálok fentiekben ismertetett eljárás segítségével történő számításához és megfelelő felbontású területi ábrázolásához elengedhetetlen a rendelkezésünkre állónál lényegesen több mérőhely, hosszú és elegendően gyakori időközönként észlelt széladatsor. Ezek hiányában ma Magyarországon nem készíthető hazánk egész területét lefedő, megfelelő felbontású szélpotenciál térkép. A rendelkezésünkre álló 13 klímaállomás 5 éves, órás idősoraival becsléseket és szélenergetikai térképeket készítettünk. Megvizsgáltuk, hogy az ötéves idősor használata mekkora hibafaktort hoz a számításainkba. Az adatbázis fenti hiányosságai a kapott széltérképek korlátait is természetesen magukban hordozzák, azonban a módszer alkalmazhatósága tekintetében nem merültek fel kételyek.

E tanulmányból, s az eddig elvégzett munkák bemutatásából kitűnik, hogy ezen a területen még sokéves kutatómunkára van szükség ahhoz, hogy felelősséggel nyilatkozni lehessen Magyarország szélenergetikai erőforrásairól, ezek területi eloszlásáról, illetve a kitermelés gazdaságosságáról. Hazánk régiónkénti szélenergetikai elemzését tervezzük, különös tekintettel:

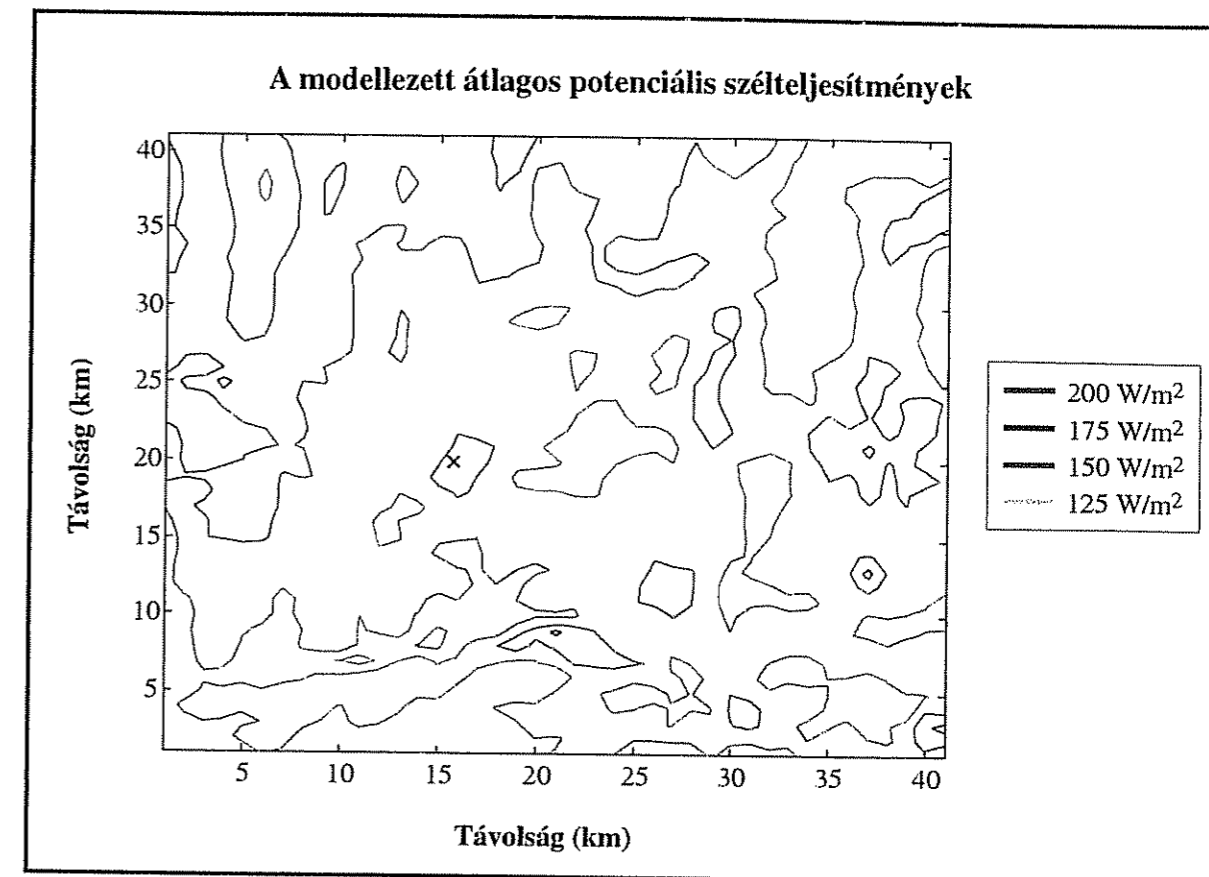
- a finomabb felbontású (DTM 200) terepmodellek alkalmazására,
- a létesítendő szélturbinák rotormagasságához igazodó energetikai modellbecslések elkészítésére,
- a rendelkezésre álló, hosszabb, többszintű toronymérési adatok felhasználásával készítenő vertikális szélprofil becslésekre,
- valamint az ország teljes területi lefedését biztosító adatbázis létrehozására.



42. ábra: A hegyhátsági mérőhely 20x20 km-es körzetének átlagos szélességei és átlagos potenciális szélteljesítmény értékei 18 méteres magasságban.



43. ábra: A hegyhátsági mérőhely 40x40 km-es körzetének átlagos szélességei és átlagos potenciális szélteljesítmény értékei 18 méteres magasságban.



44. ábra: A hegyhátsági mérőhely 40x40 km-es körzetének átlagos potenciális szélteljesítmény értékei 50 méteres magasságban.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki *Vigh Gabriellának* és *Kovács Attilának* kutatásaink első szakaszában végzett feltáró munkájukért, melynek eredményeit szakdolgozataikban is dokumentálták.

Vizsgálataink egy részét az Uppsalai Egyetem Meteorológiai Tanszékén működő Mountain Wind Energy project keretében végeztük. Köszönjük *Hans Bergström* és *Birgitta Kallstrand* hasznos tanácsait, a WAsP modell, valamint a széladatbázis használatának lehetőségét.

Köszönetünket fejezzük ki *Haszpra Lászlónak* (Országos Meteorológiai Szolgálat) és az OTKA T23811 programnak a hegyhátsági mérési eredményekért, *Tar Károlynak* (Debreceni Egyetem) az ötéves (1968-1972) széladatsorért, valamint *Weidinger Tamásnak* a digitális terepmodellek használatának lehetőségéért. Ezen adatbázisok használata nélkül nem lett nyílt volna lehetőségünk kutatásaink elvégzésére, az elemzések elkészítésére.

Továbbá köszönjük *Barcza Zoltán*, *Mészáros Róbert* és *Pongrácz Rita* hasznos észrevételeit, számítástechnikai tanácsait, a grafikai munkákban való részvételüket, mellyel a projekt sikeres befejezéséhez nagymértékben hozzájárultak.

Külön köszönjük *Weidinger Tamásnak*, *Barcza Zoltánnak* és *Mészáros Róbertnek* az expedíciós mérések szervezésében, kivitelezésében, valamint az adatgyűjtési és adatrögzítési feladatok ellátásában nyújtott segítséget.

Kutatásainkhoz anyagi segítséget nyújtottak az OTKA T26629, T15707 és T25803 pályázatok, valamint az FKFP-0193 program.

Felhasznált irodalom

- Bacsó N., Kakas J. and Takács L. (1953): Magyarország éghajlata. *OMI Hiv. Kiadv.* XVII. 45-59.
- Civindi, B. and Poje, D. (1988): Assesment of wind energy potencial in Croatia. *Solar Energy* 41, 543-554.
- Clarke, R. H. and Hess, G. D. (1974): Geostrophic departure and the functions A and B of Rossby-number similarity theory. *Boundary-Layer Meteorol.* 7, 267-287.
- Czelnai L. (1953): A szélenergia felhasználásának néhány elméleti kérdése és lehetőségei hazánkban. *Időjárás* 57, 221-227.
- Haszpra L., Barcza Z., Bakwin, P. S., Berger, B. W., Davis, K. J. and Weidinger T. (2001): Measuring system for the long-term monitoring of biosphere/atmosphere exchange of carbon dioxide. *J. Geophys. Res.* Vol. 106, No. D3, 3057-3070.
- Heier, S. and Kleinkauf, W. (2000): Wind energy usage in Germany. *Proceedings of the Conference on Renewable Energy Resources of Hungary*, Budapest, 353-368.
- Henessey, J. P. (1977): Some aspects of wind power statistisc. *Journ. of Appl. Met.* 16, 119-128.
- Högstöm, U. and Smedman, A. S. (1989): *Kompendium i atmosfärens gränsskikt del I.* (svédül). Department of Meteorology, Uppsala University.
- Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R. (1975): Turbulent wind flow over a low hill. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 101, 929-955.
- Jensen, N. O., Petersen, E. L. and Troen I. (1984): Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications. *WMO, WCP-86.*
- Justus, C. G. and Amir M. (1976): Height variation of wind speed and wind distribution statistics. *Geophys. Res. Lett.* 3, 261-264.
- Justus, C. G., Hargraves, W. R., Amir M. and Graber, D. (1978): Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journ. of Appl. Met.* 17, 350-353.
- Justus, C. G. (1985): Wind energy, in: *Handbook of applied meteorology*, Ed. Houghton D.D. John Wiley and Sons, New York.
- Kovács A. (1996): *Magyarország szélklímájának sajátosságai a szélenergia hasznosíthatóságának szempontjából.* Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék.
- Lalas, D. P., Tselepidaki, I. and Theoharatos, G. (1983): An analysis of wind power potential in Greece. *Solar Energy* 30, 497-505.
- Mezősi M. and Simon A. (1981): A meteorológiai szélmérés elmélete és gyakorlata. *Meteorológiai tanulmányok* 36.
- Monin, A. S. and Obukhov, A. M. (1954): Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Geophys. Inst., Acad. Sci. USSR* 24, No. 151, 163-187.
- Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I. and Petersen, E. L. (1993): *Wind Atlas Analysis and Application Program.* RisØ National Laboratory, Roskilde.
- OMSZ (1987): *Meteorológiai megfigyelések kézikönyve.* Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Panofsky, H. A. (1973): Tower microclimatology. In: *Workshop on micrometeorology.* Ed. Haugen, D. A. American Meteorological Society, Boston, 151-176.
- Perera, M. D. (1981): Shelter behind two-dimensional solid and porous fences. *J. Wind Engin. and Industrial Aerodyn.* 8, 93-104.

- Rao, K. S., Wyngaard, J. C. and Coté, O. R. (1974): The structure of the two-dimensional internal boundary layer over a sudden change of surface roughness. *J. Atmos. Sci.* 31, 738-746.
- Sandström, S. (1994): WAsP – A comparison between model simulations and measurements. *Wind Energy Report*, WE 94:2, Uppsala University.
- Schmid, J. and Palz, W. (1986): *European Wind Energy Technology.* D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Sempreviva, A. M., Larsen, S. E., Mortensen, N. G. and Troen, I. (1990): Response of neutral boundary layers to change of roughness. *Boundary-Layer Meteorol.* 50, 205-225.
- Stull, R. B. (1988): *An introduction to boundary layer meteorology.* Kluwer Academic Publishers.
- Tar K. (1991): Magyarország szélklímájának komplex statisztikai elemzése. *OMSZ Kisebb Kiadv.* 67.
- Troen, I. and Petersen, E. L. (1989): *European Wind Atlas.* RisØ National Laboratory, Roskilde.
- Vigh G. (1986): *A szélenergia hasznosításának lehetőségei régen és ma.* Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék.
- Yamada, T. (1976): On the similarity functions A, B and C of the planetary boundary layer. *J. Atmosph. Sciences*, 33, 781-793.

Publikációs lista

I. Referált és egyéb tudományos folyóiratokban megjelent cikkek:

Bartholy J., Pálvölgyi T., Matyasovszky I., Weidinger T., Bogárdi I. (1995): Overview, status and perspectives of numerical climate researches at the Eötvös University, Budapest. WMO/ICSU/IOC Report Volume on "Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling", edited by A. Staniforth, Report No. 21. WMO/TD-No. 665. 7.1-7.3

Bartholy J., Barcza Z., Matyasovszky I. (1995): Large-scale changes - Regional consequences. Methodological study on regional climate change predictions. *Annales Geophysicae*, Supplement II. to Vol. 13. C333.

Matyasovszky I., Bogárdi I., Bartholy J. (1995): Downscaling T21 and T42 resolution versions of the GCM of Max Planck Institute. *Annales Geophysicae*, Supplement II. to Vol. 13. C335.

Mika J., Ambrózy P., Bartholy J., Nemes Cs., Pálvölgyi T. (1995): Az Alföld éghajlata és változási tendenciái. *Vízügyi Közlemények*, 1995. 3-4. sz.

Mészáros R., Bartholy J., Weidinger T., Barcza Z. (1996): A Meteorológiai Tanszék részvétele különböző mérési programokban. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 8, 55-58.

Bartholy J. (1997): A felszín-légkör kölcsönhatások éghajlatalakító szerepe. A felszín-légkör kölcsönhatások és szerepük az időjárás, illetve az éghajlat alakításában kötetben. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 10, 44-49.

Radics K. (1997): Kísérletek az ECMWF modell előrejelzett szélmezőinek hazai szinoptikus állomáshálózatra való leskálázására. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 10, 138-140.

Radics K., Iványi Zs. (1998): Óceán-légkör kölcsönhatások, az óceán feletti határreteg szerkezeté. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 11, 57-61.

Radics K. (1999): Mért és modellezett szélmezők összehasonlító elemzése. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 13, 57-62.

Radics K., Bartholy J. (1999): Hazai szélenergia-hasznosítási kísérletek. *Hatékony Energia*, (megjelenés alatt).

Bartholy J., Pongrácz R., Radics K. (2000): Új trendek megjelenése az alkalmazott klimatológiai kutatásban. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 15, 10-14.

Bartholy J., Radics K. (2000): Selected characteristics of wind climate and the potential use of wind energy in Hungary, Part I. *Időjárás*, (megjelenés alatt).

II. Önálló tudományos könyv, tankönyv, egyetemi jegyzet, azok részletei:

Bartholy J., Weidinger T., Mészáros R., Barcza Z. (1997): Pannon Enciklopédia. Magyarország földje. Az éghajlat, a vizek, a talaj és az élővilág földrajza fejezet. *Kertek 2000*, Budapest, 224-237.

Bartholy J., (1998): Az éghajlat, mint rendszer, globális klímaváltozások. (Önálló fejezet a Humánökológia: A természetvédelem, a környezetvédelem és az embervédelem tudományos alapjai című könyvben. Szerkesztő: Nánási Irén.) *Medicina Kiadó*, 177-203.

III. Konferencia kiadványok (részletesebb cikkel), konferencia összefoglalók (rövid absztraktokkal), intézeti évkönyvek:

Bartholy J., Weidinger T., Barcza Z., Bogárdi I., Pálvölgyi T. (1995): Methodological overview of regional climate change predictions and case studies for Hungary. *Proceedings of the Regional Climate Change in Central-East Europe Workshop*. Budapest, 2-10.

Bartholy J., Weidinger T., Mészáros R. (1995): Regional climate simulations for Hungary. *Proceedings of the Regional Climate Change in Central-East Europe Workshop*. Budapest, 36-44.

Bartholy J., Weidinger T., Horváth L. (1995): Nyírjes 1991-93. Fenyőállomány felett végzett toronymérések adatainak elemzése: vertikális szerkezet, szezonális. *KLTE Debrecen*, 72-79.

Bartholy J. (1995): Climate changes, regional impacts (Methodological study on regional climate change predictions, with case studies)/Les changements climatiques Impacts au niveau regional Etude methodologique du climat regional- Prevision de changement - Etude de cas. *Proceedings of the 2nd European Conference on Applications of Meteorology, ECAM95*, 231-237.

Bartholy J., Mészáros R., Barcza Z., Weidinger T., Horváth L., Haszpra L. (1996): Participation of the Department of Meteorology, Eötvös Loránd University in the Hungarian and international micrometeorological measurement programs. *Proceedings of International Conference Meteorological Processes in the Boundary Layer of the Atmosphere, Stara Lesná, Slovakia, October 7-11, 1996*, 85-90.

Bartholy J., Weidinger T., Mészáros R., Barcza Z., Vígh G. (1996): Micrometeorological measurement system for study of energy budget components and wind energy potential. *Proceedings of 17th International Conference on Carpathian Meteorology, Visegrád, October 14-18, 1996*, 233-238.

Bartholy J., Mika J. (1998): Éghajlatelőrejelzés, bizonyosságok, kételyek. Az éghajlatváltozás és következménye kötetben. *OMSZ, Budapest*, 19-33.

Radics K., Bartholy J., Vígh G. (1998): The study of the wind energy potential over Hungary. *Abstract of participants, European Research Course on Atmospheres, Grenoble, 1998*, 25.

Bartholy J. (1998): Meteorológiai mezők objektív osztályozása. *Emlék-kötet Gulyás Ottó halálának 10. évfordulójára (szerkesztők: Matyasovszky I. és Mika J.)*. *OMSZ, Budapest*, 33-39.

Radics K., Bartholy J. (1998): Possibilities of application of renewable wind energy in Hungary. *European Conference on Applied Climatology, Climate and Renewable Energy Sources* szekció. CD kiadvány.

Radics K. (1998): Szélprofil illesztés a kinyerhető szélenergia becslésére. *Előadás összefoglalók, Pro Scientia Aranyérmesek IV. Konferenciája*, 167-171.

Bartholy J., Radics K. (2000): Természetes felszínek áramlásmódosító hatásai. *III. Erdő és Klíma Konferencia*, 121-131.

Radics K., Bartholy J. (2000): Hazai szélpotenciál mezők, új közelítésben. *HUNGEO 2000, D8*.

Radics K. (2000): Magyarország szélklímája, a szélenergia hasznosítása. *Pro Scientia Aranyérmesek V. Konferenciája* (megjelenés alatt).

Radics K., Bartholy J. (2000): A survey on the assessment of wind energy resources of Hungary. *European Conference on Applied Climatology*. CD kiadvány.

IV. Disszertációk, nem publikált tudományos jelentések:

Bartholy J. (1995): Összefoglaló szakirodalmi áttekintés az Alföld éghajlatáról és változásai tendenciájáról. 2.2. A klímaváltozás tendenciái és jövőbeni alakulása. Várható jövőbeni éghajlati változások az Alföldön. *Tanulmány a Környezetvédelmi és területfejlesztési Minisztérium megbízásából*.

Bartholy J. (1995): Lehetséges éghajlati scenáriók áttekintése Magyarország területére (A Duna vízrendszer területén, ill. a Tisza vízgyűjtőterületén). *Tanulmány a VITUKI megbízásából*.

Tantervi ajánlások meteorológiából a magyarországi felsőoktatási intézményekben jelenleg folyó és a jövőben beinduló képzésekhez (Recommendations for a course of meteorology in the high education) (A tematikát összeállította: Bartholy J., a meteorológiai gyakorlatok tematikáját készítette: Weidinger T.,), *MTA Meteorológiai Tudományos Bizottság szakanyaga*, Budapest, 1995.

Kovács A. (1996): Magyarország szélklímájának sajátosságai a szélenergia hasznosíthatóságának szempontjából. *Diplomamunka*. (Témavezető: Bartholy Judit)

Vígh G. (1996): A szélenergia hasznosíthatóságának lehetőségei régen és ma. *Diplomamunka*. (Témavezető: Bartholy Judit)

Radics K. (1997): A domborzat áramlásmódosító hatásának modellezése. *Diplomamunka*. (Témavezető: Török László, Bartholy Judit)

Bartholy J., Radics K. (1999): Magyarország szélklímája, a szélenergia hasznosítása. *OTKA T0157707 Kutatási Beszámoló*.

V. Népszerűsítő cikkek:

Bartholy J. (1996): Global warming. Researchers find Plains at risk for climate change. *Water Current, University of Nebraska, USA*, 1996. April, Vol. 28, No. 2., 4-5.

Bartholy J., Weidinger T. (1997): Hazánk éghajlati képe. *Élet és Tudomány*, LII. évf., No. 16, XCI-XCII.

Bartholy J., Matyasovszky I. (1997): Éghajlatunk jövője. *Élet és Tudomány*, LII. évf., No. 19, CXVI.

Bartholy J. (1997): Oktatás, kutatás, PhD iskola az ELTE Meteorológiai tanszéken. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 10, 21-24.

Bartholy J., Mészáros R. (1998): A tél művészete. *Természet Búvár*, 53.6.16-17.

Bartholy J., Mészáros R. (1999): Éghajlatmódosító nagyvárosok. *Természet Búvár*, 54. 1.18-19.

VI. Tudományos intézményekben, konferenciákon tartott szakmai előadások:

Bartholy J., Weidinger T., Ács F., Barcza Z. (1995): Mikrometeorológiai mérőrendszerek fejlesztése az ELTE Meteorológiai Tanszéken. 1995. évi *Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest 1995. November 16-17.

Bartholy J. (1995): A földi klíma jelene, jövője, előrejelezhetősége. *ELTE TTK, Gólyavári esték sorozat*, 1995. február 23. Budapest

Bartholy J. (1995): Climate changes, regional impacts (Methodological study on regional climate change predictions, with case studies). *2nd European Conference on Applications of Meteorology, ECAM95*, Toulouse, France, 25-29 september 1995.

Bartholy J., Mika J., Nemes Cs., Pálvölgyi T. (1995): A nagytérségű környezetváltozás megismerése és megfigyelése: kihívások, lehetőségek és kétségek. *1995. évi Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest 1995. November 16-17.

Bartholy J., Barcza Z., Matyasovszky I. (1995): Large-scale changes - regional consequences. Methodological study on regional climate change predictions. *European Geophysical Society XX. General Assembly*, Hamburg, 3-7 April 1995.

Matyasovszky I., Bogárdi I., Bartholy J. (1995): Downscaling T21 and T42 resolution versions of the GCM of Max Planck Institute. *European Geophysical Society XX. General Assembly*, Hamburg, 3-7 April 1995.

Mészáros R., Barcza Z., Bartholy J., Weidinger T. 1995: Extreme events of trace gases concentration during field experiments in a pine forest (Hungary Mátra Mountain - 1991-93), *European Geophysical Society XX. General Assembly*, Hamburg, 3-7 April, 1995.

Bartholy J., Barcza Z. (1996): Climatological aspects of the Sun-Earth relationship; antropogenic effects. *The Interaction of Stars with their Environment, International Conference*, Visegrád, May 23-25, 1996.

Bartholy J., Mészáros R., Barcza Z., Weidinger T., Horváth L., Haszpra L. (1996): Participation of the Department of Meteorology, Eötvös Loránd University in the hungarian and international micrometeorological measurement programs, *International Conference Meteorological Processes in the Boundary Layer of the Atmosphere*, Stara Lesná, Slovakia, October 7-11, 1996.

Bartholy J., Weidinger T., Mészáros R., Barcza Z., Vígh G. (1996): Micrometeorological measurement system for study of energy budget components and wind energy potential. *The 17th International Conference on Carpathian Meteorology*, Visegrád, October 14-18, 1996.

Bartholy J., Weidinger T., Mészáros R., Barcza Z. (1996): a./ A Meteorológiai Tanszék fontosabb kutatási területei. b./ Nemzetközi mérési programokban való részvétel. *Mérés modellezés és a meteorológiai információk felhasználása. ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája*, Balatonalmádi, 1996 szeptember 2-5.

Bartholy J. (1997): Methodological research and case studies on regional climate change prediction. *Seminar series of the School of Meteorology, College of Geosciences, University of Oklahoma*, Norman, Oklahoma, USA. 1997. March 11.

Pongrácz R., Bartholy J. (1997): Éghajlati távkapcsolatok elemzése a Kárpát-medence térségére. II. *Erdő és Klíma Konferencia*, Sopron, 1997. június 4-6.

Bartholy J. (1997): A felszín-légkör kölcsönhatások éghajlatalakító szerepe. *A felszín-légkör kölcsönhatások és szerepük az időjárás, illetve az éghajlat alakításában. I. Országos PhD konferencia*. Balatonalmádi, 1997. szeptember 1-5.

Bartholy J., Mika J. (1997): Éghajlatelőrejelzés, bizonyosságok, kételyek. *Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest, 1997. november 20-21.

- Bartholy J., Pongrácz R. (1997): ENSO-szignálok értékelése az Atlanti-Európai térségben és a Kárpát-medencében. *Meteorológiai Tudományos Napok* Budapest, 1997. november 20-21.
- Radics K. (1997): Statisztikai kapcsolatok vizsgálata a szinoptikus meteorológiai állomásokon megfigyelt és a domborzat figyelembevételével előrejelzett szélmező között. *XXIII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia*, Nyíregyháza, 1997. április.
- Radics K., Bartholy J., Vígh G. (1998): The study of the wind energy potential over Hungary. *European Research Course on Atmospheres (poster)*, Grenoble (Franciaország), 1998. január 12 - február 11.
- Radics K., Bartholy J., Vígh G. (1998): A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. *Bolyai Konferencia*, Budapest, 1998. február 28.
- Bartholy J. (1998): Éghajlatváltozások és az ENSO jelenség. *A természetes környezet és az ember, II. Országos Konferencia*, Budapest, 1998. január 22-23.
- Bartholy J. (1998): Megújuló energiaforrások: a szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon. *A természetes környezet és az ember, II. Országos Konferencia*, Budapest, 1998. január 22-23.
- Bartholy, J. (1998): Retrospective summary of long-range forecasting in the Central European region. *7th International Meeting on Statistical Climatology*, Whistler, British Columbia, Canada, May 25-29, 1998.
- Bartholy J. (1998): Az ELTE Meteorológiai tanszék helyzete, kutatási és fejlesztési stratégiája. *Az óceán időjárás- és éghajlatalkító szerepe. ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája*, Balatonalmádi, 1998. szeptember 7-10.
- Bartholy J. (1998): Az El Nino - Déli Oszcilláció jelenségkör és lehetséges hatása Közép-Európa éghajlatára. *Az óceán időjárás- és éghajlatalkító szerepe. ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája*, Balatonalmádi, 1998. szeptember 7-10.
- Bartholy J. (1998): Meteorológiai mezők objektív osztályozása. *Gulyás Ottó emlékkéte. Budapest 1998. szeptember 10.*
- Bartholy J. (1998): On ENSO (El Nino - Southern Oscillation) complex and its influence on the climate in the Carpathian Basin. Tuesday Lectures at the Geodetic and Geophysical Research Institute in Sopron, 1998 October 8.
- Bartholy J., Pongrácz, R. (1998): ENSO related PNA/NAO signal comparison *European Conference on Applied Climatology, Extreme events and their role in climate application* szekció. Bécs, Ausztria, 1998 október 19-23.
- Bartholy J., Pongrácz, R. (1998): Evaluation of extreme precipitation events in the Carpathian Basin. *European conference on Applied Climatology, Extreme events and their role in climate application* szekció. Bécs, Ausztria, 1998 október 19-23.
- Radics K. (1998): Possibilities of wind energy usage in Hungary. *European Science Foundation Summer School on "Dynamical systems aspects of transport and diffusion in the atmosphere and the ocean"*, Bornö, Svédország, 1998. július 27 - augusztus 1.
- Radics K., Iványi Zs. (1998): Óceán-légkör kölcsönhatások, az óceán feletti határreteg szerkezete. *Meteorológiai Nyári Iskola*, Balatomalmádi, 1998. szeptember.
- Bartholy J., Radics, K. (1998): Possibilities of application of renewable wind energy in Hungary. *European Conference on Applied Climatology, Climate and Renewable Energy Sources* szekció. Bécs, Ausztria, 1998. október 19-23.
- Bartholy J., Matyasovszky I., (1998): Statisztikai módszerek a klimatológiában. *Száva-Kovács József születésének 100. évfordulójára rendezett emlékülés*, Budapest 1998. november 5.
- Radics K. (1998): Szélprofil illesztés a kinyerhető szélenergia becslésére. *Pro Scientia Aranyérmesek IV. Konferenciája*, Szeged, 1998. november 6-7.
- Radics K. (1999): Comparison between WASP simulations and measurements. *European Science Foundation, TAO Study Centre*, Palma de Mallorca, Spanyolország, 1999. szeptember 6-18.
- Radics K. (1999): Mért és modellezett szélmezők összehasonlító elemzése. *Meteorológiai PhD Konferencia*. 1999. szeptember 20-21.
- Radics K. (1999): A szélenergia hasznosításának lehetőségei hazánkban. *ELTE Bolyai Kollégium*. 1999. december 16.
- Radics K. (2000): Nagyvárosok éghajlatát befolyásoló antropogén tényezők. *Bolyai Konferencia*, Budapest. 2000. március 4.
- Radics K., Bartholy J. (2000): Szélklimatológiai és szélenergetikai vizsgálatok Magyarország éghajlati körzeteire. *Megújuló energiaforrások - Információs Nap* (poszter), Kecskemét. 2000. március 30.
- Bartholy J., Radics K. (2000): Természetes felszínnek áramlásmódosító hatásai. *III. Erdő és Klíma Konferencia*, Debrecen. 2000. június 7-9.
- Radics K., Bartholy J. (2000): Hazai szélpotenciál mezők, új közelítésben. *HUNGEO 2000*, Piliscsaba. 2000. augusztus 15-29.
- Radics K., Bartholy J. (2000): Az elmúlt évtized szélenergia kutatásai az ELTE Meteorológiai Tanszékén. *AGRO-FOOD 2000, A szélenergia hasznosítása - Kerekasztal tanácskozás*, Nyíregyháza. 2000. szeptember 22.
- Radics K., Bartholy J. (2000): A survey on the assessment of wind energy resources of Hungary. *European Conference on Applied Climatology*, Pisa (Olaszország). 2000. október 16-20.

Az EGYETEMI METEOROLÓGIAI FÜZETEK
eddig megjelent kötetei

- No. 1. RÁKÓCZI FERENC és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1990): A II. Planetáris Határreteg Szeminárium előadásai. Debrecen, 1989. szept. 14-15.
- No. 2. MATYASOVSKY ISTVÁN, WEIDINGER TAMÁS és GYURÓ GYÖRGY szerkesztők (1990): Különböző típusú előrejelzések. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. Balatonalmádi, 1990. augusztus 29-31. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 3. GYURÓ GYÖRGY (1990): Rövidtávú előrejelzések egy háromparaméteres modellcsaláddal.
- No. 4. GYURÓ GYÖRGY, BOZÓ LÁSZLÓ, MATYASOVSKY ISTVÁN és WEIDINGER TAMÁS (1992): Szakköri tematika középiskolásoknak meteorológiából és levegőkörnyezetvédelemből.
- No. 5. BARTHOLY JUDIT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1992): A felszín-légkör kölcsönhatások, környezetvédelem. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1992. szeptember 2-4. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 6. SZUNYOGH ISTVÁN szerkesztő (1992): Emlékkötet Makainé Császár Margit, Erdős László és Felméry László docensek tiszteletére, I-II.
- No. 7. BARTHOLY JUDIT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1994): Nemzetközi tudományos együttműködések a meteorológiában. Magyarország részvétele a kutatási projekteknél. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1994. szeptember 5-7. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 8. BARTHOLY JUDIT, MÉSZÁROS RÓBERT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1996): Mérés, modellezés és a meteorológiai információk felhasználása. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1996. szeptember 2-5. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 9. PONGRÁCZ RITA és TÓTH ÁGNES szerkesztők (1997): A meteorológus PhD-hallgatók I. országos konferenciája. 1996. november 26-27. Az előadások összefoglalói.
- No. 10. MÉSZÁROS RÓBERT, WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT és TÓTH ÁGNES szerkesztők (1997): A felszín-légkör kölcsönhatások és szerepük az időjárás, illetve az éghajlat alakításában. A PhD-hallgatók I. Nyári Iskolája. 1997. szeptember 1-5. Az előadások összefoglalói.
- No. 11. RADICS KORNÉLIA, WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT és MÉSZÁROS RÓBERT szerkesztők (1998): Az óceán időjárás- és éghajlat-alakító szerepe. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1998. szeptember 7-10. Az előadások összefoglalói.
- No. 12. PONGRÁCZ RITA és SZANDÁNYI EMESE szerkesztők (1999): Megújuló tantárgypedagógiák és módszertan a meteorológiai felsőoktatásban. 1999. május 31-június 1. Az előadások összefoglalói.
- No. 13. KIRCSI ANDREA és PONGRÁCZ RITA szerkesztők (1999): A meteorológus PhD-hallgatók II. országos konferenciája. 1999. szeptember 20-21. Az előadások összefoglalói.
- No. 14. BARTHOLY JUDIT és RADICS KORNÉLIA (2000): A szélenergia hasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében.