

Koppán András

**A fatörzsön kialakuló
természetes elektromos potenciálkülönbség-változások
és összefüggésük a xylemnedv-áramlással**

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:

**Dr. habil Szarka László
a MTA (földtudomány) doktora**

**Nyugat-Magyarországi Egyetem
Kitaibel Pál Doktori Iskola**

Sopron, 2004

**A fatörzsön kialakuló
természetes elektromos potenciálkülönbség-változások
és összefüggésük a xylemnedv-áramlással**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében,
a Nyugat-Magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar
Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskolája,
Geokörnyezettudomány (K2) programjához tartozóan.

Írta:
Koppán András

Témavezető: Dr. Szarka László

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Sopron,

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron,

.....
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDT elnöke

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	5
2. A téma nemzetközi és hazai irodalmának áttekintése.....	7
2.1. A téma nemzetközi irodalmának áttekintése.....	7
2.2. A hazai irodalom áttekintése.....	10
2.3. A témával kapcsolatos korábbi saját tevékenység.....	11
3. Mérési metodika, mérőrendszerek, eszközök, adatfeldolgozási eljárások.....	12
3.1. Kísérleti helyszín, kísérleti alany:.....	12
3.2. Elektromos potenciálkülönbség mérés.....	13
3.3. Fanedváramlás mérés.....	15
3.4. Környezeti paraméterek mérése.....	16
3.5. Az adatfeldolgozás során alkalmazott fontosabb matematikai-statisztikai módszerek.....	18
3.5.1. Idősor-elemzés az elektromos potenciálkülönbség és a themometriás nedvaram-sebesség adatsorok feldolgozásában.....	18
3.5.1.1. Konvolúciós szűrő.....	18
3.5.1.2. Fourier-analízis.....	19
3.5.2. Faktoranalízis az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti paraméterek közötti kapcsolatrendszer elemzésére.....	22
3.5.3. Lineáris regresszió-analízis az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti paraméterek közötti összefüggések kimutatására.....	23
4. A fatörzsön mért elektromos potenciálkülönbség adatsor elemzése.....	26
4.1. A vizsgálat szempontjai.....	26
4.2. Az elektromos potenciálkülönbség-adatsor spektrális elemzése.....	27
4.2.1. Az elektromos potenciálkülönbség adatsor idősor-elemzése.....	27
4.2.1.1. A közép és hosszúperiódusú változások vizsgálat.....	28
4.2.1.2. A rövidperiódusú változások vizsgálata.....	34
4.2.2. A tapasztalt jelenségek fizikai-biológiai okai.....	38
4.3. Az 1 napos változások vizsgálata.....	39
4.3.1. Az 1 napos járás évszakos változása.....	43
4.4. Tranziensváltozások az elektromos potenciálkülönbség adatsorban.....	46
4.5. Az egyes csatornák összehasonlítása.....	47
5. A themometriás nedvaramlás adatsor elemzése.....	57
5.1. A fák vízszállítása.....	57
5.2. A növények nedvaramlásának mérésére használatos módszerek áttekintése.....	65
5.2.1. A törzs(szár)-hőegyensúly eljárás (SHBM – stem heat balance method).....	66
5.2.2. Törzs-szektor hőegyensúly eljárás (TSHBM – trunk sector heat balance method).....	68
5.2.3. A hő-impulzus eljárás (HPM - heat-pulse method).....	69
5.2.4. A hődisszipációs eljárás (radiális hőárammérés).....	71
5.3. A themometriás nedvaramlás adatsor spektrális elemzése.....	73
5.3.1. A napi járás vizsgálata.....	76
5.4. Az elektromos potenciálkülönbség és a themometriás adatsorok összehasonlítása.....	79
6. Az elektromos potenciálkülönbségek kapcsolata a belső folyamatokkal és a környezeti tényezőkkel.....	84
6.1. Az elektromos potenciálkülönbség kialakulása.....	85
6.1.1. Elektrokinetikai jelenségek, áramlási potenciál.....	85
6.1.2. Elektródpotenciálok.....	87

6.1.3. Koncentrációs potenciálok	88
6.2. A xylem-nedv ásványianyag-tartalma és ennek mérési lehetőségei	90
6.2.1. Roncsoló eljárások	90
6.2.1.1. Gyökér-exudáció	90
6.2.1.2. Szabályozott áramlású gyökér-exudáció	91
6.2.1.3. Mintavétel más növényrészről	91
6.2.2. Roncsolásmentes eljárások	92
6.2.2.1. Xylem nyomáspróba	92
6.2.2.2. Xylem-evő rovarok	92
6.2.2.3. Gyökér-nyomáskamra	92
6.3. Az elektromos potenciálkülönbséget befolyásoló környezeti tényezők	96
6.3.1. Meteorológiai paraméterek	96
6.3.1.1. Napsugárzás	96
6.3.1.2. Hőmérséklet	96
6.3.1.3. Relatív páratartalom	97
6.3.1.4. Szél	97
6.3.1.5. Csapadék és talajnedvesség	98
6.3.2. Geofizikai paraméterek	101
6.3.2.1. Légköri elektromos potenciál gradiens	101
6.3.2.2. Geomágneses tér, telluráramok	101
6.3.2.3. Gravitáció	102
6.4. Empirikus modell felállítása	105
6.4.1. Az elektromos potenciálkülönbség adatok és a környezeti paraméterek közötti kapcsolatrendszer feltárása faktoranalízissel	105
6.4.1.1. Adatrendszerek	105
6.4.1.2. Az 1. adatrendszer faktoranalízise	106
6.4.1.2. A 2. adatrendszer analízise	110
6.4.2. Többváltozós regressziós modellek	113
6.4.2.1. Az 1. adatrendszer regresszió-analízise	113
6.4.2.2. A 2. adatrendszer regresszió-analízise	119
6.4.2.3. A modellek validálása	123
6.4.3. Tapasztalati modell a nedvzárlás becslésére	124
7. Összefoglalás	129
7.1. Az eredmények összefoglalása	129
7.2. A kutatási eredmények hasznosítása	132
7.3. További kutatási irányok	133
Köszönetnyilvánítás	134
Felhasznált irodalom	135

1. Bevezetés

Az élőlények növekedését, életműködését sok külső környezeti tényező alakítja és befolyásolja. E tényezők hatásaival az ember többé-kevésbé tisztában van, jelentős részüket már kapcsolatba hozták a növény- és állatvilág legkülönbözőbb biológiai jelenségeivel. E tényezők egyike az elektromosság. Az elektromosság azonban nem csak befolyásoló tényezőként van jelen az élő szervezetekben, hanem sokszor az életműködés hatására jelenik meg, ez az ún. bioelektromosság. A bioelektromos jelenségekkel igen sokan foglalkoztak az elmúlt két évszázad során (köztük nem kisebb egyéniségek, mint például Nernst). Az állatok bioelektromos jelenségei jelenleg sokkal jobban ismertek. A bioáramok mérését manapság széleskörűen felhasználják, mint például az emberi szervezet esetében, ahol orvosi-diagnosztikai célokra rutinszerűen alkalmazzák.

Időről-időre felmerül az igény a növények esetében is, hogy az életjelenségeket valamilyen egyszerű módon monitorozni lehessen, akár egyetlen paraméter mérésével információt lehessen nyerni az egészségi állapotról, életfolyamatokról. Azonban a növények esetében a szervezet életműködését kísérő, az egész növényre vonatkozó (tehát nem sejt, hanem annál magasabb, szöveti, szervezeti szinten jelentkező) elektromos tér mérési módszere kevésbé kidolgozott. Bár első megközelítésre nem tűnik bonyolult feladatnak, megvalósítása mégis számos nehézségbe ütközik, nemkülönben az értelmezés, így vizsgálata az utóbbi időben mindinkább háttérbe szorult. Számos növényen – esetleg különböző szövetekben – mértek már elektromos potenciált (vagy épp különbségeket), valamint ezeknek változásait számos esetben össze is vetették valamely környezeti paraméter változásaival, mégis elmondható, hogy a tapasztalt jelenségek egy jelentős részére mindmáig csupán hipotéziseket fogalmaztak meg. A növényi elektromos jelenségek komplexitásából fakadóan természetesen nagyon nehéz olyan elméletet leírni, amely valamennyi megfigyelést egyforma érvénnyel magyarázna, és sok esetben a hipotézisek egyértelmű bizonyítása is hiányzik (leginkább a potenciálkülönbségek eredetére vonatkozó elméletek esetében). Éppen ezért van manapság is létjogosultsága azoknak a vizsgálatoknak, amelyeknél a fákat környezetükkel együtt, egy egységes rendszerben vizsgálják.

Jelen dolgozatom tárgya – a fatörzsön mérhető, szervezeti szintű, elektromos potenciálkülönbség változások vizsgálata – egyike a rendkívül kevés számú, fákön – in vivo – végzett elektromos potenciálkülönbség mérési kísérletnek. A téma alapvetően interdiszciplináris, érinti többek között a biológia, biofizika, biokémia, fizika, geofizika különböző tématerületeit. Érdekesség, hogy a kutatásom közvetlen előzményének számító, Pierre Morat, Jean-Louis Le Mouél és André Granier által a Párizsi Földfizikai Intézetben, 1992-ben elvégzett kísérletet is pusztán geofizikai indíttatásból végezték el, ugyanis azt a régi geofizikai tapasztalatot igyekeztek bizonyítani, hogy ha tellurikus, magneto-tellurikus mérések során fa közelébe rakják az elektródokat, az hamis mérési eredményekhez vezethet. Lényegében a Morat féle kísérlet alapján merült fel bennünk az a kérdés is, hogy a geokörnyezet mennyiben befolyásolja a fatörzsön kialakuló természetes elektromos potenciálkülönbségeket.

Kutatásom megtervezése során, az elsődlegesen megfogalmazott célkitűzés az volt, hogy megvizsgáljuk, hogyan változnak a fatörzsön mért elektromos potenciálkülönbségek időben és térben. Ezzel kapcsolatban arra is megoldást kellett találni, hogy ezeket a változásokat mi módon figyelhetjük meg, ugyanis az irodalom és a korábbi, hasonló témájú kísérletünk alapján nyilvánvalóvá vált, hogy a két elektród páros elrendezés nem megfelelő egy ilyen vizsgálat elvégzésére.

Az elektromos potenciálkülönbségek változásának, és ezek jellegzetességeinek meghatározása után a következő lépés, hogy meghatározzuk, mik azok a belső folyamatok, jelenségek, amelyek okai lehetnek a potenciálkülönbségek kialakulásának és változásainak.

Milyen összefüggés van például az elektromos potenciálkülönbség és a xylemnedv-áramlás között?

Feladatként fogalmazódott meg annak kiderítése, hogy amennyiben ezek a belső folyamatok nem fedik le teljesen az elektromos potenciálkülönbség változásait, milyen környezeti paraméterek lehetnek hatással az elektromos potenciálkülönbségekre. Ez lényegében a fa – környezet kapcsolatrendszer feltárását jelenti.

2. A téma nemzetközi és hazai irodalmának áttekintése

2.1. A téma nemzetközi irodalmának áttekintése

A növényi elektromos jelenségekkel kapcsolatban már a XIX. században megjelentek írások. Kunkel már 1878-ban felvetette, hogy a víztranszport okozza a növények elektromosságát (1878, 1879). Ezt követően, 1892-ben Haake feltételezte, hogy a növényi „bio-potenciálokat” a respiráció vagy az asszimiláció okozza, de nem talált korrelációt a transzspiráció és a mért áramerősség között.

A növényi bioelektromossággal kapcsolatos korai publikációk közül származik Lewakowski-nak, a pétervári Akadémia tanárának 1886-ban megjelent értekezése is, aki *Mimosa pudica* metszeteket vizsgált, közvetlenül egy galvanométerrel mérve az észlelhető áramokat. 1907-ben jelent meg Bose összefoglaló jellegű műve a "Comparative Elektro-Physiology". Vizsgálatai során periódikus (vibrációs) mechanikai és fizikai behatásokat alkalmazott főleg elkülönített növényi részekben, és ecsetelektródok segítségével mérte a különböző részek között jelentkező potenciálkülönbségeket. 1924-ben jelent meg egy nagyobb összefoglaló mű Stern tollából: "Elektrophysiologie der Pflanzen" címmel, melyben a szerző az elektrotaxis, az elektrotropizmus és az elektronasztia jelenségeivel foglalkozott, valamint vizsgálta az elektromos impulzusoknak a szövetekben való terjedésének problémáit. Foglalkozott a statikus elektromosság élőlényekre gyakorolt hatásával. Ő írta le először a klasszikus vizsgálatnak számító "almaszelet" kísérletet (elektródokat érintett az almaszelet két különböző szövetű részéhez, és galvanométeres kompenzátorral meghatározta a keletkezett galvánelem elektromotoros erejét, s ezt, mint bioelektromos potenciált említette).

A 1930-as években az elektromos potenciálkülönbség és a transzspiráció összefüggésének elmélete új lendületet kapott Lund (1928, 1929, 1930, 1931a, 1931b, 1931c, 1932), Marsh (1935, 1937) Stamm (1926), Marinesco (1931) és Heyl (1933) munkáitól, bár a közölt beszámolók nem mutattak ki nyilvánvaló korrelációt a transzspiráció és a potenciálok között.

A második világháború alatt és az azt követő évtizedben megindul a tudományterület differenciálódása. Vizsgálták a sejten belüli potenciálviszonyokat (Spanner, 1952), a membrán- és diffúziós jelenségeket (Arens, 1949; Neihof és Sollner, 1956), valamint foglalkoztak a bioelektromos áramokkal és bioelektromos potenciálokkal (Vervelde, 1948; Scott, 1955).

Ezekből az évekből elsősorban Fensom és Burr nevét kell kiemelni. Fensom a membránjelenségekkel, membránpotenciálokkal foglalkozott, valamint vizsgálta a vízáramlás és a bioelektromos potenciálok közötti kapcsolatot (1957, 1958, 1959, 1961, 1963).

Burr (1944, 1945, 1947, 1956) juharrákon mért elektromos potenciálkülönbségeket két, a törzs kambiumába ültetett Ag-AgCl elektród segítségével. A két elektród közötti függőleges távolság 3 láb (kb. 90 cm) volt. A mért potenciálkülönbség napi, havi és évszakos változásokat mutatott. Burr összefüggést feltételezett a potenciálkülönbség és a napfoltaktivitás között, ezért párhuzamosan geoelektromos méréseket is végzett. Vihar során azt tapasztalta, hogy a földbe helyezett É-D tájolású Ag-AgCl elektródpáron mért potenciálkülönbség és a törzsön mért potenciálkülönbség változása hasonló (1944b, 1947b). (Fensom és Burr eredményeit – amelyek munkám elkezdésekor se számomra, se francia elődeim számára nem voltak ismertek – részletesebben nem írom le ebben a fejezetben, mivel azokat referenciaként alkalmaztam, és a saját kísérletem vonatkozó eredményeinek ismertetésekor mutatom be őket.)

A 70-es, 80-as években viszonylag kevesen publikáltak a szervezet ill. növény szintű bioelektromos potenciálok témájában. Közéjük sorolható például Sakamoto és munkatársai (1984), akik fiatal, fás szerkezetű növények (*Cryptomeria japonica* és *Populus nigra*) bioelektromos potenciálját mérték mikroelektródos módszerrel. A kísérletük során azt

tapasztalták, hogy a fény befolyásolta a fiatal hajtások, a levélnyelek és a levelek potenciálját. A potenciálváltozások a legnagyobb érzékenységet a levelekben mutatták. Goldstein és Gensler (1981) mérőrendszert fejlesztettek ki, hogy in vivo mérjék a növényi szövetek redox potenciálját. 250 μm átmérőjű nemesfém elektródot ültettek a vizsgálandó növényi részekbe, s egy referencia elektródhoz képest mérték az elektródpotenciált, melynek időbeli változását – saját terminológiájuk szerint – elektrofotogramként regisztrálták. Megemlítendő még Leach (1987), aki *Phaseolus vulgaris* L., *Cucumis sativus* L. és *Prunus sativus* L. levelein mért felületi elektromos potenciált, 3-4 napos, szép időjárású periódusokban. A potenciálokban napi járást talált, és ezt a napi ritmust különböző meteorológiai paraméterekkel vetette össze. Azt tapasztalta, hogy leginkább a radiáció és a levél felületi hőmérséklete köthető az elektromos változásokhoz. Vizsgálta továbbá a levelek leválasztásának hatását is a potenciálra, bár az ennek kapcsán tapasztalt változásokra nem talált választ.

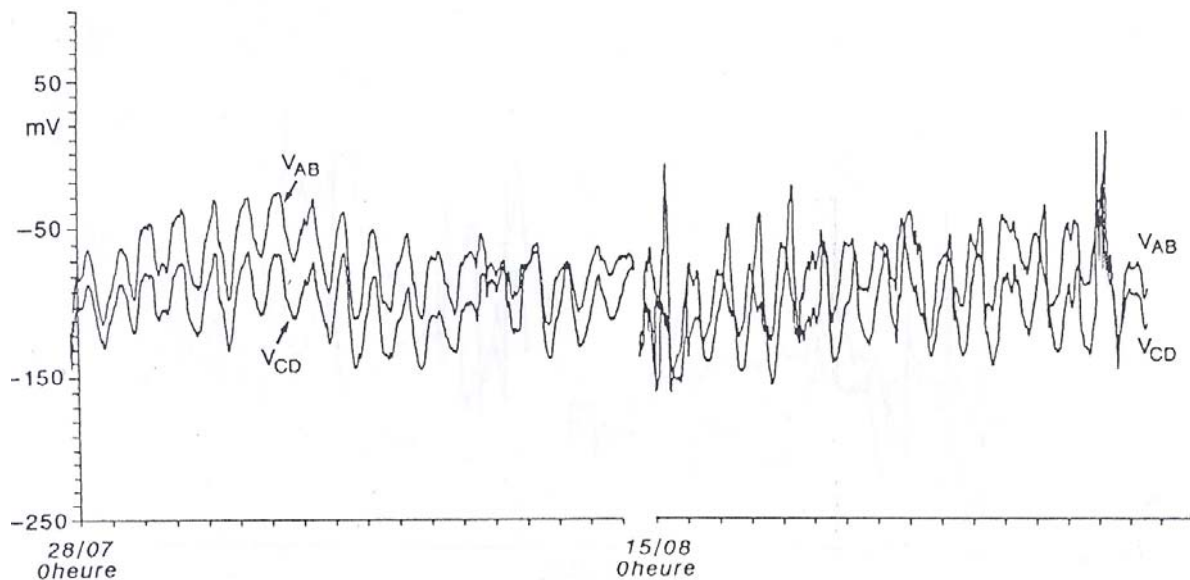
A 90-es években a magasabbrendű növények felszínén történő, sejten kívüli potenciálmérések reneszánszukat élték, ugyanis ezzel a módszerrel akciós potenciálokat, lassú depolarizációs hullámokat vizsgáltak számos növényfajon, mint például *Helianthus annuus* (Zawadzki et al., 1995), *Bidens pilosa* (Frachisse-Stoilkovic – Julien, 1993) és *Salix viminalis* (Fromm és Spanswick, 1993). Shabala és munkatársai (1991) a kukorica és a paradicsom levelein figyeltek meg ritmikus változást a bioelektromos potenciálban (4-8 percig tartó periódusok néhány órán keresztül). Kimutatták, hogy a bioelektromos potenciál oszcillálása abból ered, hogy a gyökér nem egyenletesen, hanem ritmikusan veszi fel a vizet. Eschrich és Fromm (1993) *Salix viminalis* párologtatásának és fotoszintézisének változását tanulmányozták. Üvegházban hidroponikusan (13.12 mM mannitol oldatban) nevelt 20 éves fák gyökérrendszerére referencia elektródot helyeztek, és amikor a membrán potenciál stabilizálódott, változásokat idéztek elő benne azáltal, hogy a gyökereket körülvevő közeget megváltoztatták (csapvíz, különböző tápoldatok, auxin, citokinin és különböző pH-jú oldatok alkalmazásával). A leveleken megmérték a klorofill fluoreszcenciát, a fotoszintetikus oxigén képződés sebességét és a gázcserét, mérték továbbá a szár-felület elektromos aktivitását. A gyökér stimulálásának hatására a fűzfában elektromos potenciál keletkezett, amely 2-5 cm/s sebességgel haladt át a növényen. A jel megérkezését a levelekbe a CO_2 , O_2 és víz csere mutatta. Uchida és munkatársai (1991) spenótlevélen mérték bioelektromos potenciált. A vizsgálatok célja az volt, hogy egy környezetvédelmi ellenőrző rendszert alakítsanak ki a növények válaszreakciói alapján. Elektródokkal vizsgálták a bioelektromos potenciál fényhatásra bekövetkező változásait. A vizsgálatok során megállapították, hogy a változásokat a környezeti és növekedési körülmények határozzák meg, elsősorban pl. a hőmérséklet, nedvesség, széndioxid-koncentráció, fényintenzitás és a fejlettségi állapot.

A 90-es évektől tapasztalható a tudományok közötti határterületek művelésének a bevezetőben említett fellendülése is. A geofizika és a növénytan közötti interdiszciplináris kutatások sorába illeszkedik Matteucig és Toriyama (1992) cikke is. A szerzők a nápolyi állatkertben található *Albizia julibrissin* fákön mérték bioelektromos potenciált. Dél-Olaszországban sokszor van kisméretű földrengés. 1991. május 26.-án egy közepes méretű földrengés ($M=4.6$) volt Lucania tartományban. Május 25.-én, egy nappal az esemény előtt az említett fákön anomáliás bioelektromos potenciált mérték. A szerzők szerint a több tudományterületen végzett, interdiszciplináris tanulmányok (pl. fizika, geofizika, geokémia, növényélettan és állattan stb.) alkalmasak lehetnek földrengések előrejelzésére.

Ugyanebbe a kategóriába sorolható a kutatásom közvetlen előzményének számító a Párizsi Földfizikai Intézetben (Institut de Physique du Globe de Paris, IGP) Morat, Le Mouël és Granier (1994) által elvégzett elektromos potenciálkülönbség-mérési kísérlet is, amit fontossága miatt az alábbiakban részletesebben ismertetek.

A geofizikusok gyakran állították, állítják azt, hogy bizonyos természetes térgerjesztésű elektromos, például tellurikus, magneto-tellurikus mérések során az elektródot nem szabad fa

közvetlen közelébe telepíteni, mert az itt mért adatok félrevezetők lehetnek. A tellurikus (földi-áram) változások a néhány másodperc - néhány óra periódusidejű tartományban körülbelül néhány tíz mV/km nagyságrendű elektromos térváltozásként jelentkeznek. Ha mérőelektródokat teszünk olyan helyre, amelynek közelében két-három nagyságrenddel nagyobb, lokális elektromos mező van, az nyilvánvalóan zavart okozhat. Ráadásul régóta ismert jelenség az, hogy porózus testekben (pl. porózus kőzet) a folyadék áramlása elektromos mezőt hoz létre. Ebből a szempontból a fák is porózus testeknek számítanak, hiszen nedv áramlik a gyökerektől a törzsön keresztül a levelekig. Ezért kézenfekvőnek látszott az a feltételezés, hogy a fában keringő nedv olyan elektromos mezőt hoz létre, amely zavarhatja a geofizikai méréseket. E megfontolások alapján a szerzők 1992-ben elektromos műszert szereltek egy kb. 80 éves vadgesztenyefa törzsére. Két elektród párt ültettek a fába a kérgen keresztül. Az elektródok 30 mm hosszú rozsdamentes acélcsőből készültek, külső átmérőjük 3 mm, a belső 2 mm volt, és 5 mm mélyen hatolt be a xylémbe. Az elektród párt két tagja között a távolság függőlegesen 100 cm, vízszintesen 5 cm volt. Az elektromos potenciálkülönbséget egy dipólus két elektródja között nagy impedanciájú (100 M Ω) voltmérővel mérték, és az értékeket óránként jegyezték fel. A méréseket négy hónapon keresztül végezték.

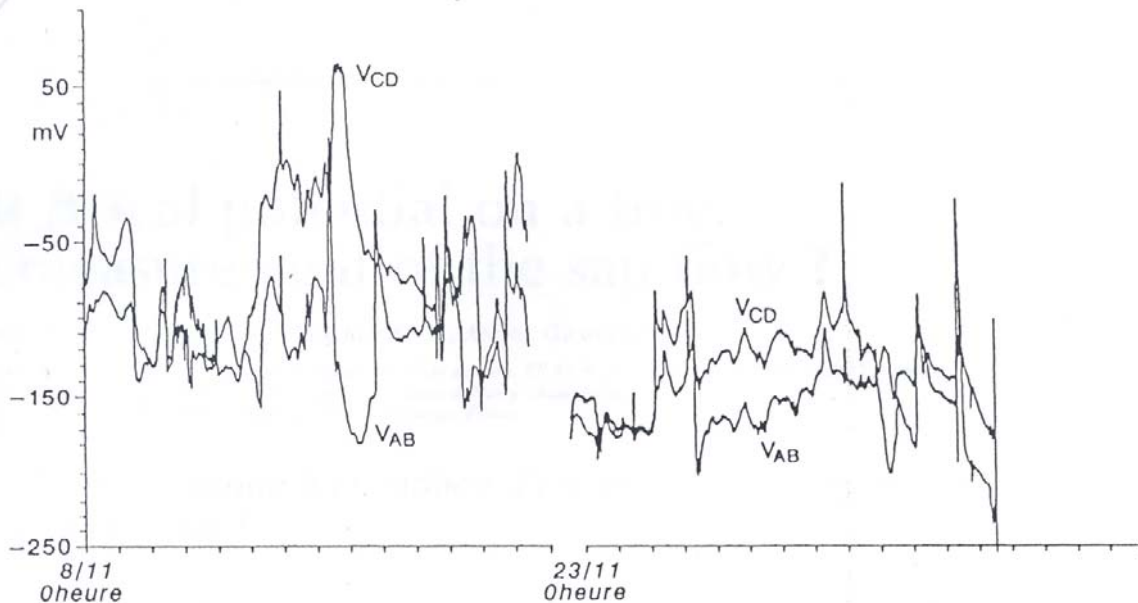


2.1. ábra. Elektromos potenciálkülönbség-mérés vadgesztenye törzsön, 1993.07.28.-08.31. (Morat et al., 1994)

Mivel az elektródokat semmilyen módon nem védték, azt várták, hogy a szél, az eső, a gyors időjárás-változások jellegzetes potenciálkülönbséget hoznak létre. Ezért két eltérő környezeti paraméterekkel jellemezhető időszak eredményeit ragadták ki. Az első időszak július 28. és augusztus 31. között volt: nyugodt, szép idő, eső és szél nélkül (2.1. ábra). A második időszakot (november 8. és december 5. között) csapadékos időjárás jellemezte, esővel, széllel és viharokkal (2.2. ábra). A nyári időszakban a potenciálkülönbség görbék futása egymáshoz nagyon hasonló volt, és egy napon belül szabályos néhány tíz mV amplitúdójú változást figyeltek meg.

Az eredmények értékelésénél úgy gondolták, hogy a legvalószínűbb magyarázat az általuk megfigyelt napi változásokra a nedv törzsön belüli áramlássűrűségében bekövetkező változás. Ennek az áramlásnak a napi ingadozása jól ismert és számos mérési módszerrel (ld. 5.2. fejezet) egyszerűen meghatározható.

Amennyiben a napi változásokat a törzsön áthaladó nedváramlás változásai okozzák, akkor ezeknek a jeleknek meg kell szünniük lombhulláskor. Amint a 2.2. ábrán látható, valóban ez történik. November 8. és december 5. között a mérések hosszú távú változásokat és szabálytalan gyors ingadozásokat mutatnak, amelyek nagyon hasonlóan alakulnak a két görbén. A fa heterogenitása következtében nem várható egyszerűen leírható potenciál eloszlás a törzs felületén. Ezt jelzik a V_{BA} és V_{DC} dipólusok által adott értékek különbségei is, pedig az elektródok csak 5 cm-re vannak egymástól.



2.2. ábra. Elektromos potenciálkülönbség-mérés vadgesztenye törzsön, 1993.11.08.-12.05. (Morat et al., 1994).

2.2 A hazai irodalom áttekintése

Az első hazai cikk 1837-ben jelent meg Mócsi Mihály tollából "Villamosság az életműves lényekben" címmel. Magyarországon az 1900-as évek első felében az volt a jellemző, hogy a szerzők leginkább olyan kísérletekkel foglalkoztak, amelyek során valamilyen módon vagy a növényhez (a növényt olyan táptalajon növesztik, melyen át áramot vezetnek) vagy a növénybe vezettek elektromos áramot különböző elektródok (pl. ecsetelektród) segítségével, s vizsgálták ennek különféle hatásait.

Mivel Magyarországon nem sokan tettek közzé olyan értekezéseket, amelyek élő fákon, természetes körülmények között vizsgált bioelektromos jelenségekről számolnának be, külön ki kell emelnem Csanády Etele "Fák elektromos potenciáljai" című munkáját (1969), amelyben egy 1964-65-ben végzett ilyen kísérletet ismertet. Fontossága miatt érdemes bővebben foglalkozni vele.

Két magyarországi fafaj biofizikai és biokémiai vizsgálatával kapcsolatban végzett kutatómunka alapvetően arra irányult, hogy a fa növekedése és a fatestben mérhető elektromos potenciálok értéke között fennálló feltételezett összefüggéseket meghatározza. A szerző a kísérlet során 5-15 éves erdeifenyő és lucfenyő egyedeken, terepen mérte a saját elnevezése szerinti „fitoelektromos” potenciált (definícióját ld. lentebb). A munka alapvető célkitűzései a következők voltak:

- kimutatni: van-e egyértelmű összefüggés az évszakok hőmérsékleti viszonyainak alakulása és a mérhető fitoelektromos potenciál között;

- kimutatható-e az egyes években jelentkező hőmérsékleti szélsőségek hatása a potenciál értékekből;
- van-e jól definiálható összefüggés a fitoelektromos potenciálok és a növekedés között;
- kimutathatók-e bioelektromos ill. fitoelektromos szempontból különbségek az egyes fenyőfajok között.

A „fitoelektromos potenciál mérése és definíciója Csanády szerint a következő: "a fákon mért fitoelektromos potenciál azon platinaelektród valamely összehasonlító elektródhoz viszonyított potenciálmaximuma, mely platinaelektrodot élő sejtben helyezük el, és az általa, valamint az összehasonlító elektród és az elektrolit által alkotott galvánelemet a mérés előtt adott ideig rövidzárt állapotban tartottuk." A két évig tartó kísérlet eredményeit a következőkben lehet összefoglalni:

- összefüggést talált a hőmérséklet növekedése és az egyes szövetek „fitoelektromos” potenciáljai között;
- legkifejezettebb hőmérséklet-potenciál együttfutás a tavaszi, ún. indukciós periódusban, közvetlenül a rügyfakadást követő időszakban figyelhető meg;
- a fitoelektromos potenciálok értéke függ a mérés helyétől, azonos szövet vizsgálatánál is;
- a tavasszal mért potenciálok esetében szignifikáns különbséget talált a két fafaj között.

A mérések alapján a szerző szerint a lucfenyő és az erdeifenyő egyes klimatikus jellemzői gazdagíthatók, így például a lucfenyő rendkívüli tavaszi és őszi csapadékérzékenysége, vagy az erdeifenyő ugyancsak kiemelkedő kora nyári csapadékérzékenysége fitoelektromos úton kimutatható volt.

2.3. A témával kapcsolatos korábbi saját tevékenység

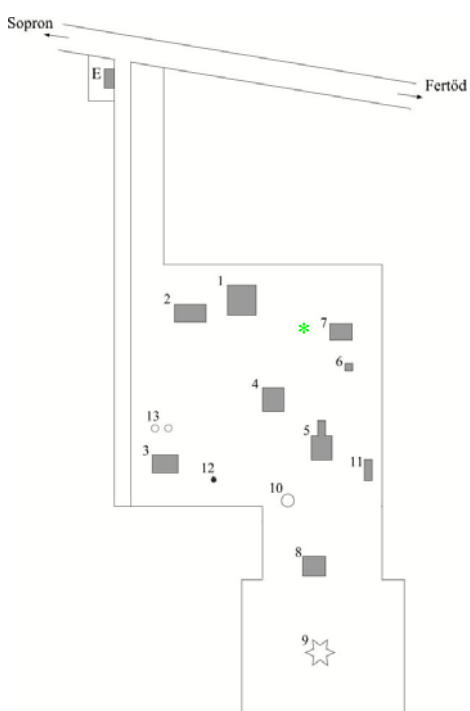
A fák elektromos terével kapcsolatos kutatásaimat 1995-ben kezdtem el, amikor a Morat et al. (1994) cikkben leírt kísérletet rekonstruáltam a Soproni Egyetem botanikus kertjében (Koppán, 1996 és Koppán et al., 1999). A rekonstruálás célja az volt, hogy az elektromos potenciálkülönbségek napi és évszakos változásaiban meghatározzam a szabályszerűségeket. Egy 14 cm mellmagassági átmérőjű közönséges bükk (*Fagus sylvatica* L.) törzsébe ültettem 2 pár rozsdamentes acél elektródát a francia kísérlettel megegyező elrendezésben, és mértem az elektromos potenciálkülönbségeket 13 hónapon keresztül. A kísérlet során elsősorban tavasszal voltak megfigyelhető karakterisztikus napi változások maximum 10 mV amplitúdóval. A közel szinuszos változások maximuma helyi téli időszámítás szerint délelőtt 6 és 8 óra, míg a minimum délután 18 óra táján jelentkezett.

3. Mérési metodika, mérőrendszerek, eszközök, adatfeldolgozási eljárások

A 2. fejezetben említett 1995-96-os, bükkfás kísérlet során, két csatornán mértem az elektromos potenciálkülönbségeket. Az elektródparók vízszintes távolsága 5 cm, a függőleges elektródtávolság 1 m volt. Az alsó elektródok 1.3 m magasságban helyezkedtek el. Az elektródok rozsdamentes acélból készültek és facsavarszerű kialakításúak voltak. Az elektródokat a kérgen és a háncon keresztül csavartuk be a fatörzsbe, és semmilyen módon nem voltak védettek a külső hatásoktól, zavaroktól. A rendszer a környező épületektől, kábelektől sok elektromos zajt szedett össze, ami megnehezítette az adatok értékelését. További nehézségeket okozott a két csatorna sokszor ellentmondásos volta. A napi három meteorológia észlelés pedig nem tette lehetővé a részletekbe menő vizsgálatokat. E tapasztalatok alapján terveztük újra a jelen dolgozat tárgyául szolgáló kutatás kísérletét.

3.1. Kísérleti helyszín, kísérleti alanyok

A kísérlet helyszínének a MTA GGKI Széchenyi István Geofizikai Observatóriumát (továbbiakban: Observatórium) választottam (3.1. ábra) a következő szempontok alapján. A területnek biztonságosnak, védettnek kellett lennie, megakadályozandó a berendezés megrongálását, illetve egyes részeinek ellopását. Az Observatórium területe gyakorlatilag elektromosan zajmentesnek tekinthető. Számos épület van, ahol (szükség esetén fűthető) helyiségekben lehetséges a vezérlő számítógép elhelyezése. Az Observatórium területén, a kísérlet közvetlen közelében folyik a környezeti paraméterek, a légköri elektromos tér potenciál-gradiensének valamint a Föld elektromágneses terének változása indukálta földi áram mérése.



3.1. ábra. A Széchenyi István Geofizikai Observatórium térképe (a csillag az 1. sz. kísérleti alanyt jelöli)



3.2. ábra. Az 1. számú kísérleti alany, a felszerelt mérőrendszerrel

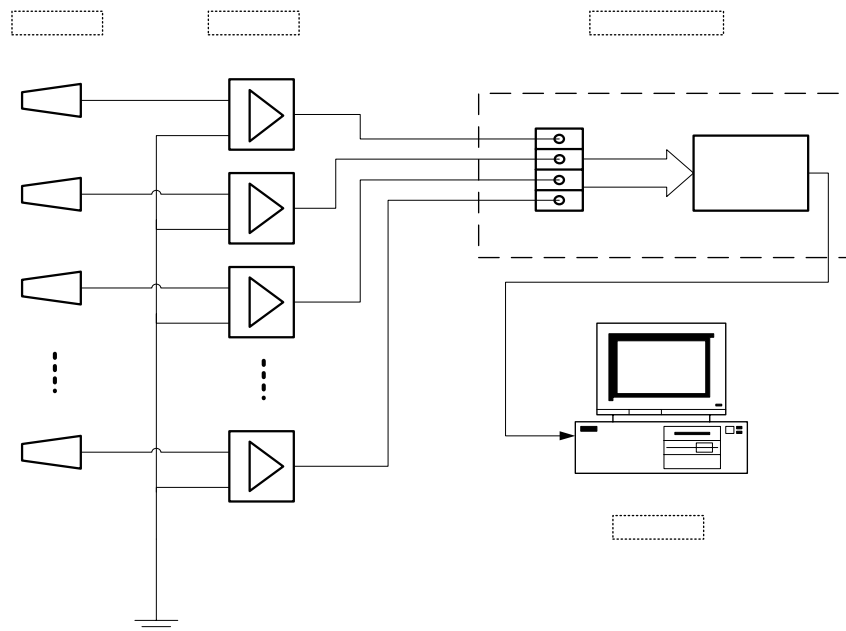
Az Observatórium ÉK-i részén található 1-es (gondnoki lakás) és 7-es (számítóközpont) épületek között számos cser, szelídgesztenye, madárcseresznye, nyír és erdeifenyő, mint lehetséges kísérleti alany áll, ligetszerűen szétszórva. A különböző fafajok közül a

legnagyobb egyedszámmal jelenlévő cserét választottam. A kísérlet szempontjából a lombos fák előnyösebbek, mivel egyes fenyőféléknél a gyantafolyás nagyban akadályozhatja a mérést. A cser további előnye, hogy tág lumenű edényekkel rendelkezik, mivel a szűk üregű edényekkel rendelkező fák esetében a nedvzáramlás kevésbé intenzív. A fő kísérleti alany (továbbiakban: 1. fa, 3.2. ábra) egy fagylécektől és látható sérülésektől mentes cser (magassága: 20 m, mellmagassági átmérője: 31cm), míg kontroll fának (továbbiakban: 2.f.) az 1. fától 3 m-rel D-re álló, hasonló méretű cserét választottam. Fanedvzáramlás mérést az 1. fától 5m-rel É-ra álló cser egyeden végeztem.

3.2. Elektromos potenciálkülönbség mérés

A mérőrendszer:

A mérőrendszernek (3.3. ábra) a következő igényeket kellett kielégítenie: több éven keresztül, különböző időjárási körülmények között is működőképes maradjon; a mérés folyamatosan történjen; a mérés megbízható legyen; a mérőrendszer költséghatékony legyen; a mérési pontosság a 10^{-5} V-os nagyságrendet érje el.



3.3. ábra. Az elektromos potenciálkülönbség mérőrendszer bloksémája

A mérés megbízhatóságának, egyúttal a mért adatok ellenőrizhetőségének javítása érdekében a korábbi kísérletnél alkalmazott kettőhöz képest megnöveltük a csatornaszámot. Ehhez egy Advantech PCL813 típusú analóg/digitális konverter-kártyát használtunk fel, melynek főbb tulajdonságai a következők:

- 32 szigetelt „single-ended” (együtemű / egyoldali bevezetésű) csatorna
- 12 bites felbontású analóg/digitális konverzió
- A feszültség bemeneti értéke:
 - unipoláris esetben: 0-10 V, 0-5 V, 0-2.5 V, 0-1.25 V
 - bipoláris esetben: ± 5 V, ± 2.5 V, ± 1.25 V, ± 0.625 V
- Maximum 25 Kbps adatátviteli sebesség

- Bemeneti impedancia: $>10\text{ M}\Omega$

A mérés során bemeneti tartománynak bipoláris ($\pm 5\text{V}$ -os) üzemmódot választottunk. A konverter kártya egy Geo típusú 286-os laptopban került elhelyezésre. A konverter kártyát egy 37 eres kábel kapcsolja össze a vezeték-csatlakozó táblával. A vezeték-csatlakozó tábla és az előerősítők között egy árnyékolt, többeres kábelen biztosítja az összeköttetést. A fába ültetett elektródok és a föld közötti potenciálkülönbségek képzését és a jel épségének a továbbítás során való megőrzését az előerősítők végzik. Az előerősítő első fokozaton A=1-es erősítésű, nagy bemenő ellenállású ($R \geq 10^{10}\Omega$) differenciál erősítő. Ezt követi egy 50 Hz-es lyukszűrő és egy 5 másodperc időállandójú aluláteresztő szűrő. Fontos megjegyezni, hogy az előerősítőkhöz tartozó tápegység föld-független, valamint, hogy az A/D konverter be- és kimenete egymástól galvanikusan le van választva. Ez biztosítja azt, hogy a mérendő fának és környezetének elektromos potenciálját a mérőrendszer nem módosítja.



3.4. a-b. ábra. (a) az elektromos potenciálkülönbség-méréshez használt elektród beültetési modellje; (b) egy beültetett elektród

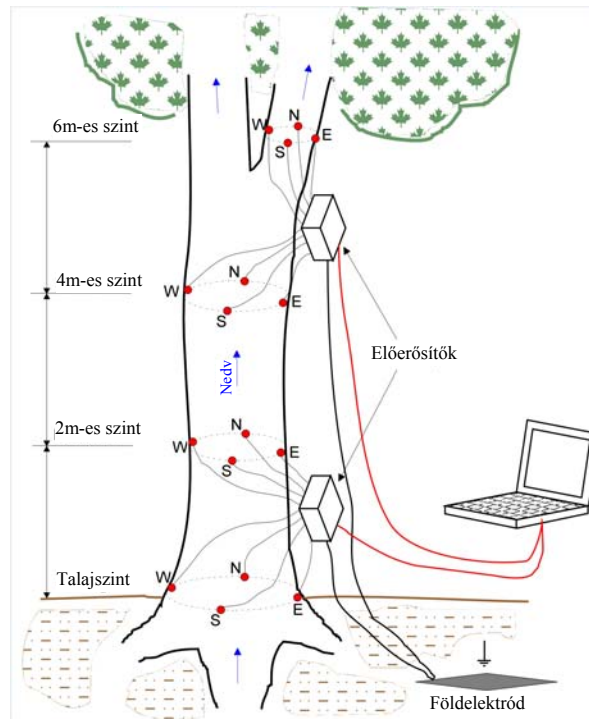
Az elektromos potenciálkülönbségeket fatestbe helyezett elektródok segítségével mértem. Az elektródok anyagának kiválasztásakor lényeges szempont volt a korróziómentesség, a nem polarizálhatóság, valamint a tartósság. Választásunk ezek alapján a permalloyra (80/20 Ni és Fe) esett. Az elektródok alakját az előző kísérlet tapasztalatai alapján igyekeztünk úgy kialakítani, hogy a fa szállítószöveinek minél kisebb roncsolásával lehessen beültetni őket. Ennek megfelelően elvetettük az korábban használt facsavar jellegű elektródalakot, és új, trapéz alakú elektródokat készítettünk. A trapézok szélesebb alapja 1cm, rövidebb, élezett alapja fél cm, magassága másfél cm lett (3.4. ábra). A kísérleti fába kezdetben 8 elektródot ültettünk 2 szinten, 4 és 6 m magasan, majd további 8 elektródot ültettünk be a talajszinten és 2 m magasan. A 3.5. ábrán látható az elektródelrendezés (az egyes szinteken belüli elektródokat a fő égtájaknak megfelelően helyeztük el). Az elektródokat rövidebb alapjukkal előre, függőlegesen vertük a fatestbe, melybe kb. 1 cm mélyen nyúlnak be. A külső környezeti hatásoktól, az előző kísérlethez hasonlóan, most sem védtük semmilyen módon az elektródokat. A beültetés előtt a fák kérgét ill. a hancsot eltávolítottam az elektródok helye körül. A potenciálkülönbség képzéséhez szükséges közös földelektródnak egy 40*40 cm-es, ólomlemez elektródot használtunk (nagyon kis mértékben polarizálódik), amelyet a kísérleti fa törzsétől kb. 2,5 méterre és 70 cm mélyre ástunk le, így az elektród a hőingadozástól valamint a kiszáradástól védve volt.

A mérés mintavételi gyakorisága 1 másodperc volt. Mivel az előző kísérlet alapján úgy találtuk, hogy az egy perces értékek kellő felbontást biztosítanak a kiértékeléshez, így csak a perces átlagokat regisztráltam. Ez a módszer csatornánként naponta 1440 adatot jelent.

Az elektromos potenciálkülönbség mérési kísérlet fő szakaszai:

1. 1997. 05. 29. – 1998. 05. 06. között 8 csatornás mérés az 1. fán, a 4 és 6 m-es szinteken;
2. 1998. 05. 06. – 1999. 10. 06. között 16 csatornás mérés az 1. fán, a talajszinten, 2, 4 és 6 m-es szinteken;

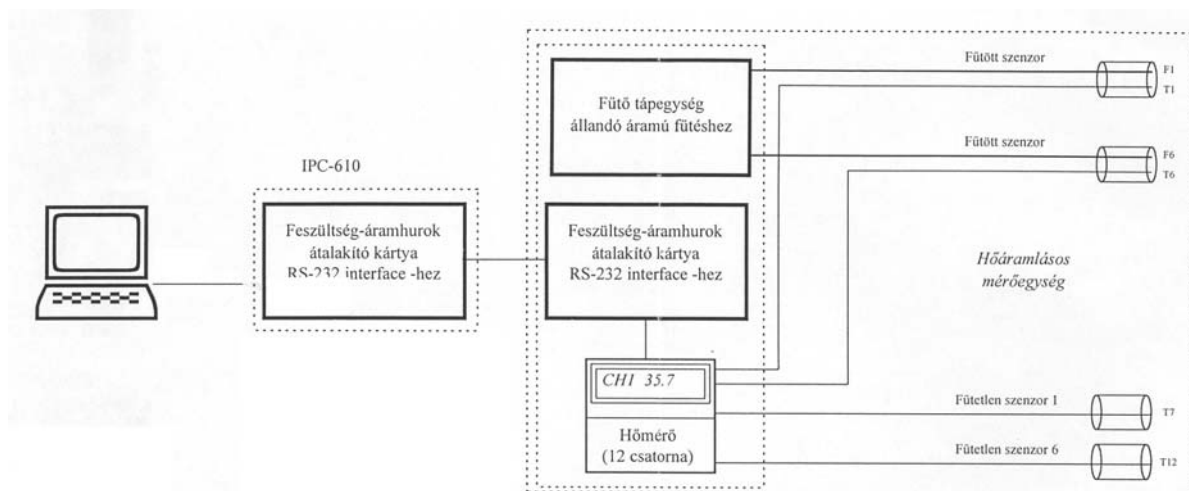
3. 1999. 10. 07. – 2000. 07. 12. között 8-8 csatornás párhuzamos mérés az 1. és a 2. fán: mindkét fán 4-4 elektróddal a talaj- és a 2 m-es szinteken;
4. 2000. 07. 13. – 2002. 02. 28. között 16 csatornás mérés az 1. fán, a talajszinten, 2, 4 és 6 m-es szinteken;



3.5. ábra. Az elektromos potenciálkülönbség-mérés elektródelrendezése

3.3 Fanedváramlás mérés

1999. 07. 14. – 12. 27. között kiegészítő termometriás fanedváramlás mérést végeztem az 5.2. fejezetben ismertetett Granier – féle radiális áramlásmérő mintájára készített műszer segítségével. A mérőrendszert a MTA Atommagkutató Intézet munkatársa, Fenyvesi András biztosította számomra (rendszereséma, 3.6. ábra).



3.6. ábra. A radiális fanedváramlásmérő rendszersémája (Fenyvesi A. nyomán)

A mérés során négy termopárt alkalmaztunk. A termopárok fűtött tagjait a talajszint felett 1m-re, a fő égtájaknak megfelelő irányba, a kéreg alá kb. 2 cm mélyen (előfűrt lyukakba) helyeztük el. A referencia szondákat ezek alá kb. 15 cm-rel, szintén 2cm-es, előfűrt lyukakba illesztettük be. A szondákat méhviasszal szigeteltük a környezeti hatásoktól. A rendszer 5 perces mintavételi gyakorisággal dolgozott. A mért adatokból meghatároztuk a nedváraamlás intenzitásától függő „K” faktort ($K = \frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T}$, ahol ΔT_m az a hőmérséklet különbség, amikor a nedváraamlás sebessége zérus). Ebből a „K” tényezőtől számolhatók ki egy – Granier által meghatározott – tapasztalati összefüggés segítségével a fanedváraamlás sebesség értékek ($v = 0.119K^{1.231}$). A mérés elvi hátterére az 5.2.4. fejezetben még visszatérek.

3.4. Környezeti paraméterek mérése

Az Observatórium Campbell Scientific gyártmányú, CR10 típusú adatgyűjtőt tartalmazó meteorológiai állomásán (3.7. ábra; a 3.1. ábrán a 10-es objektum) a következő paraméterek regisztrálása történik: hőmérsékletet, relatív páratartalom, csapadék, globálsugárzás, szélirány, szélesség. Az adatok regisztrálása 1999. 11. 16-ig 15 percenként történt, azt követően 10 percenként. A kísérlet korai szakaszában a hőmérséklet, szélesség és napfénytartam adatokat az ÉDU-VÍZIG Fertő tavi Hidrometeorológiai Állomástól (Fertőrákos) kaptam meg.



3.7. ábra. Campbell Scientific CR10 típusú adatgyűjtőt tartalmazó meteorológiai állomás a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban

Szintén az Observatóriumból származnak az összehasonlító elemzésekhez felhasznált és a geomágneses adatok. A légköri elektromos potenciálgradiens mérésére használt mérőrendszer mérési elve az, hogy egy 1 m magasságban lévő elektród (egy függőleges, szigetelt rúdon van elhelyezve) körül töltés-felhalmozódást jön létre (egy radioaktív preparátum ionizálja a levegőt), majd ez a töltésmennyiség a potenciálgradiens miatt a talaj felé áramlik egy triódán keresztül (Bencze és Márcz, 1981). A rendszer belső ellenállása $1 \cdot 10^{13} \Omega$ nagyságú. Az anód

és katód között beálló feszültségváltozást egy galvanométer segítségével mérik. A rendszer mérési tartománya $\pm 250\text{V/m}$ és 1 órás átlagokat regisztrál. A légköri elektromos potenciálgradiens mérését a csúcskisülési áramok regisztrálása egészíti ki. Ezt egy függőleges tartórúdhhoz erősített és leszigetelt rozsdamentes acél hegy segítségével mérik. Az acél hegy 7 m magasan helyezkedik el.

A földi mágneses tér változásait elektronikus variométerekkel és egy digitális regisztráló berendezés (ARGOS) segítségével mérik. Az ARGOS egy PC alapú mérőrendszer, ami két magnetométert (egy triaxiális fluxus-zsilipes- és egy proton magnetométert) tartalmaz. Négy paramétert regisztrálnak: a deklinációt (D), a geomágneses tér horizontális (H) és vertikális (V) komponenseit, valamint a teljes térerőt (F). A regisztrálási gyakoriság: 1 perc.

A Föld elektromágneses terének változása indukálta földi áramok mérésére két elektród párt használnak. Az egyik elektród pár É-D irányban, míg a másik K-Ny irányban fekszik. A 2 m mélyre leásott ólomlemez elektródok távolsága 500 m. A regisztrálási gyakoriság: 10 másodperc.

A talajnedvesség mérését egy a Soproni Egyetem Termőhelyismerettani tanszékétől kapott kézi, ellenállásmérésen alapuló talajnedvesség-mérővel végeztem. Három "5201 Soilmoisture Block" (Soilmoisture Equipment Corp., USA) típusú érzékelőt ástunk le 150 cm, 50 cm és 20 cm mélyre, s heti leolvasással határozzuk meg a talajnedvesség százalékos értékeit. Az érzékelő egy gipsz testből és a beléje ágyazott koaxiális elektródokból áll. A kézi műszer a gipsztest fajlagos ellenállás-változását egy 100-as skálán mutatja, s ennek az értéknek a segítségével a mellékelt grafikonról a talajnedvesség leolvasható. A talajnedvesség mérését 1999. június 1-én kezdtem és 2001 május 21-én fejeztem be.

3.5. Az adatfeldolgozás során alkalmazott fontosabb matematikai-statisztikai módszerek

3.5.1. Idősor-elemzés az elektromos potenciálkülönbség és a termometriás nedvára sebesség adatsorok feldolgozásában

Az elektromos potenciálkülönbség és a termometriás nedvára mlás adatsor időbeli változásainak, s e változások jellegzetességeinek meghatározásához az idősor-elemzés eszközeit használtam fel.

Az idősorokat időbeli alakulásuk sajátosságai alapján három komponens eredőjeként tekinthetjük:

1. A trend, amely – ingadozásokon keresztül – tartósan érvényesülő tendenciát, az idősor alakulásának fő irányát jelenti. A trendet magát is több, a vizsgált jelenségeket alapvetően meghatározó tényező alakítja. Az elemzés során a vizsgált – általában 1 hónapos - időszakokra a trendet jó közelítéssel lineárisnak vettem.
2. A periodikus ingadozás. A periódusok hossza lehet állandó, vagy mutathat bizonyos változékonyságot. A szezonális ingadozás (szezonálitás) állandó periódus-hosszúságú hullámlás, amely szabályosan visszatérő időközönként mindig azonos irányba téríti el az idősor értékét a trendtől.
3. A véletlenszerű ingadozás, az idősorban megtalálható szabálytalannak tűnő mozgás. Általában minél rövidebb időszakokra vonatkozik az idősor, annál jelentősebb a véletlen ingadozás.

Az idősorok elemzésének hagyományos módszere az egyes komponensek elkülönítése, dekompozíciója. Két eltérő módszert alkalmaztam: a konvolúciós szűrő eljárást és a gyors Fourier-analízist (Fast Fourier Transform - FFT). Alapvetően a konvolúciós szűrő eljárást használtam, az FFT-t általában ellenőrzésre hívtam segítségül, vagy azokban az esetekben, amikor a konvolúciós programot a korlátai miatt (hosszú adatsorok és kis szűrő-sávszélesség esetén gyakran fordult elő túlsordulás) nem alkalmazhattam.

3.5.1.1. Konvolúciós szűrő

A konvolúciós szűrő technika jól alkalmazható módszer az elektromos potenciálkülönbség adatsorok spektrális elemzéséhez.

A spektrum számításához alkalmazott, Hanning-ablakkal csonkított konvolúciós szűrő képlete a következő (Verő, 1972 és Verő J. et al., 2000):

$$F(t) = \frac{1}{2\pi t} \left(\sin \frac{2\pi t}{p_1} - \sin \frac{2\pi t}{p_2} \right) \cdot \left(\cos \frac{2\pi t}{T} + 1 \right)$$

$$F(0) = \frac{2d}{p_1} - \frac{2d}{p_2}$$

$$G(t) = \frac{1}{2\pi t} \left(\cos \frac{2\pi t}{p_1} - \cos \frac{2\pi t}{p_2} \right) \cdot \left(\cos \frac{2\pi t}{T} + 1 \right)$$

$$G(0) = 0$$

ahol t az idő, F az azonos fázisú, G a 90 fokkal eltolt fázisú komponense a szűrt vektornak, d a mintavételek közt eltelt idő (digitális köz), p_1 és p_2 a szűrő alsó ill. felső periódus-határai, T a csonkítás hossza. A konvolúció eredménye tartalmaz egy azonos (az $F(t)$ függvénnyel számolt) és egy ellentétes fázisú (a $G(t)$ -vel számolt) amplitúdót, amelyek együttesen adják a teljes vektort a fázishelyzettel. A szűrő periódus-határainak aránya határozza meg a spektrum

frekvencia-felbontását. Gyakorlatilag minél kisebb a $p_1 - p_2$ távolság, annál jobb a frekvencia-felbontás, de a dinamikus spektrumnak annál rosszabb lesz az időbeli felbontása (A dinamikus spektrum vízszintes tengelyén az idő, függőleges tengelyén vagy a frekvencia, vagy a periódus található, míg az amplitúdót izovonalak, színek, árnyalatok jelzik a diagramterületen.)

A szűrő sáv szélességének meghatározása tapasztalati úton történik, például a $p_1 = p/1.1$, míg a $p_2 = p \cdot 1.1$, ahol p a szűrő központi periódusa. Általában a felső és az alsó periódushatárok aránya 1.2-1.5 közé esik. Fontos paraméter a szűrő hossza is. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szűrő félhosszának legalább 2-4 teljes periódusú hullámot tartalmaznia kell. A fenti p_1 és p_2 -nek 5-8 teljes periódusú szűrőhossz felel meg. A konvolúciós szűrő alkalmazásakor figyelembe kell venni, hogy a Hanning-ablakos csonkítás miatt nem adja vissza az eredeti amplitúdó-értékeket. Az amplitúdó kicsinyítésének mértéke a szűrőhossz beállításoktól függ elsősorban.

A konvolúciós szűrő eljárást az adatfeldolgozáshoz elsősorban előnyei: a jó paraméterezhetségek, valamint a változások időbeliségének megjeleníthetősége (ld. dinamikus spektrum) miatt választottam. A számításokat a Szendrői Judit (MTA GGKI) által készített konvolúciós szűrő-programmal végeztem.

3.5.1.2. Fourier-analízis

A Fourier-analízis röviden összefoglalt elméleti alapja a következő:

Vizsgáljunk egy $g(t)$ periodikus függvényt, melynek periódusideje T . Ekkor tetszőleges t -re érvényes, hogy

$$g(t) = g(t + kT), \quad (3.5.1.1.)$$

ahol $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Felírható a $g(t)$ úgynevezett Fourier-sora:

$$g(t) = a_0 + 2a_1 \cos \frac{2\pi}{T} t + 2a_2 \cos \frac{2\pi}{T} 2t + \dots + 2a_k \cos \frac{2\pi}{T} kt + \dots \\ + 2b_1 \sin \frac{2\pi}{T} t + 2b_2 \sin \frac{2\pi}{T} 2t + \dots + 2b_k \sin \frac{2\pi}{T} kt + \dots \quad (3.5.1.2.)$$

A $\cos \frac{2\pi}{T} t$ és $\sin \frac{2\pi}{T} t$ az úgynevezett alapharmónikusok, a sorfejtésben szereplő további függvények a második, harmadik, k -edik felharmónikusok. A sor minden tagja periodikus T periódusidővel. A k -edik felharmónikus ezen kívül rendelkezik a rövidebb T/k értékű periódusidővel is. Az $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ konstansokat Fourier-együtthatóknak nevezik.

A konstansok értéke a levezetések mellőzésével:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_a^{a+T} g(t) dt, \quad (3.5.1.3.)$$

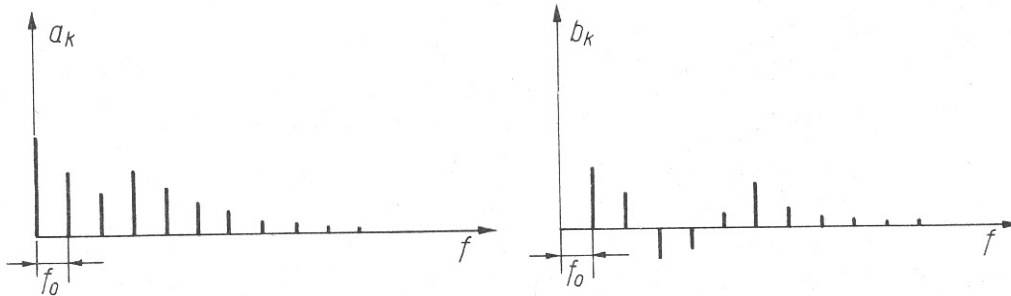
$$a_k = \frac{1}{T} \int_a^{a+T} g(t) \cos \frac{2\pi}{T} kt dt, \quad (3.5.1.4.)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_a^{a+T} g(t) \sin \frac{2\pi}{T} kt dt \quad (3.5.1.5.)$$

ahol $k=1, 2, \dots$

Az együtthatókat a 3.8. ábra szerint koordinátarendszerben ábrázolhatjuk, az abszcissza az f frekvencia. A vonalak csak az $f_0 = 1/T$ egész számú többszöröseinek megfelelő frekvencia értékekhez rajzolhatók fel. Ha a $T \rightarrow 0$, akkor a spektrumvonalak közötti távolság is tart a

zérushoz, azaz a spektrumvonalak sűrűsödnek, valamint az együtthatók értéke is csökken. A továbbiakban az egyedi spektrumvonalak amplitúdóiról célszerű áttérni az amplitúdósűrűségekre (egy Δf hosszúságú sávba eső amplitúdók összegét osztjuk a sáv hosszával, majd képezzük a $\Delta f \rightarrow 0$ határátmenetet).



3.8. ábra. Példa a Fourier-együtthatók ábrázolására

Tekintsük először a koszinusz-amplitúdósűrűségeket. A Δf intervallumba eső összes amplitúdóra felírható a következő közelítő egyenlőség (feltételezve, hogy Δf olyan kicsiny, hogy az összes, intervallumba eső amplitúdók jó közelítéssel egyenlők):

$$a_k \approx \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos 2\pi f t \, dt. \quad (3.5.1.6.)$$

Az amplitúdók összege:

$$\approx T \Delta f \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos 2\pi f t \, dt = \Delta f \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos 2\pi f t \, dt. \quad (3.5.1.7.)$$

Ekkor a koszinusz-amplitúdósűrűség, az amplitúdók összege, osztva a Δf sáv hosszával:

$$a(f) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \cos 2\pi f t \, dt, \text{ ha } T \rightarrow \infty, \text{ akkor } a(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cos 2\pi f t \, dt. \quad (3.5.1.8.)$$

Hasonlóan kapható a szinuszm-amplitúdósűrűségekre:

$$b(f) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) \sin 2\pi f t \, dt, \text{ ha } T \rightarrow \infty, \text{ akkor } b(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \sin 2\pi f t \, dt. \quad (3.5.1.9.)$$

Vizsgáljuk meg, hogy az amplitúdó-sűrűségek ismeretében hogyan számítható az eredeti $g(t)$ függvény. Ehhez osszuk fel az f tengelyt olyan kicsiny Δf hosszúságú szakaszokra, melyeken belül az $a(f)$ és $b(f)$ mindenütt jó közelítéssel konstansnak tekinthető. Ezután minden egyes, Δf hosszúságú szakasz járulékat helyettesítsük egy-egy amplitúdóval. Legyen

$$a_k = a(f) \Delta f, \quad (3.5.1.10.)$$

$$b_k = b(f) \Delta f, \quad (3.5.1.11.)$$

ahol $f=k/T$. Végül írjuk fel azt a függvényt, melynek Fourier együtthatói az így kapott a_k és b_k amplitúdók. Ez a függvény periodikus $T=1/\Delta f$ periódusidővel, hiszen az együtthatók távolsága Δf . Az így előállított periodikus függvényt $g^*(t)$ -vel jelölve:

$$g^*(t) = a(0) + 2 \sum a(f) \cos 2\pi f t \, \Delta f + 2 \sum b(f) \sin 2\pi f t \, \Delta f. \quad (3.5.1.12.)$$

A bal oldal $T \rightarrow \infty$ esetén megadja a $g(t)$ függvényt, míg a jobb oldalon integrálközelítő összeg szerepel, mely $T \rightarrow \infty$ esetén a következő integrált adja:

$$2 \int_0^{\pi} [a(f) \cos 2\pi ft + b(f) \sin 2\pi ft] df. \quad (3.5.1.13.)$$

Ez a $g(t)$ Fourier-integrál előállítás.

A trigonometrikus függvények helyett bevezethetjük az Euler-összefüggések alkalmazásával, az exponenciális függvényeket:

$$\cos 2\pi ft = \frac{e^{j2\pi ft} + e^{-j2\pi ft}}{2}, \quad (3.5.1.14.)$$

$$\sin 2\pi ft = \frac{j(e^{-j2\pi ft} - e^{j2\pi ft})}{2}. \quad (3.5.1.15.)$$

Így a Fourier-integrál tömörebb alakra hozható:

$$\begin{aligned} g(t) &= 2 \int_0^{\infty} \left[a(f) \frac{e^{j2\pi ft} + e^{-j2\pi ft}}{2} + jb(f) \frac{e^{-j2\pi ft} - e^{j2\pi ft}}{2} \right] df = \\ &= \int_0^{\infty} [a(f) + jb(f)] e^{-j2\pi ft} df + \int_0^{\infty} [a(f) - jb(f)] e^{j2\pi ft} df \end{aligned} \quad (3.5.1.16.)$$

Vezessünk be most egy függvényt, melynek negatív argumentumokhoz tartozó értéke:

$$G(f) = a(-f) + jb(-f), \quad (3.5.1.17.)$$

a pozitív argumentumokra pedig:

$$G(f) = a(f) - jb(f). \quad (3.5.1.18.)$$

Ezzel a $G(f)$ függvénnyel az integrálok így alakíthatók át:

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^{\infty} [a(f) + jb(f)] e^{-j2\pi ft} df + \int_0^{\infty} [a(f) - jb(f)] e^{j2\pi ft} df = \\ &= \int_{-\infty}^0 G(f) e^{j2\pi ft} df + \int_0^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df. \end{aligned} \quad (3.5.1.19.)$$

A $G(f)$ függvény a $g(t)$ komplex spektruma.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (3.5.1.20.)$$

Ezt a fenti műveletet, amellyel a $g(t)$ időfüggvényhez a komplex értékű $G(f)$ frekvenciafüggvényt hozzárendelik, Fourier-transzformációnak nevezik. A $G(f)$ függvény a $g(t)$ Fourier-transzformáltja. A $G(f)$ -ből a $g(t)$ visszaállítása az inverz Fourier-transzformáció:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (3.5.1.21.)$$

A $G(f)$ komplex spektrumból amplitúdó- és fázisspektrum számítható. Az amplitúdó-spektrum a $G(f)$ abszolút értéke, a fázisspektrum a $G(f)$ – f -től függő – irányszöge. Ha a valós részt $G_v(f)$ -fel, a képzetes részt $G_k(f)$ -fel jelöljük, felírható, hogy az

$$\text{amplitúdó-spektrum} = |G(f)| = \sqrt{G_v^2(f) + G_k^2(f)}, \quad (3.5.1.22.)$$

$$\text{a fázisspektrum} = \arctg \frac{G_k(f)}{G_v(f)}. \quad (3.5.1.23.)$$

A diszkrét Fourier-transzformáció elvégzése hosszú adatrendszer esetén rendkívül időigényes. Ezért dolgoztak ki egy iterációs algoritmust, amellyel a Fourier-együtthatókat a közvetlen módszernél jóval kevesebb műveleti lépésben határozza meg. Ez a módszer a gyors Fourier-transzformáció. Az FFT eljárás nem torzít az amplitúdó visszaadásakor, annak értékét

helyesen adja vissza. Az FFT eljárás alkalmazása során első lépésként adatsorról minden esetben leválasztottam a lineáris trendet. Az FFT-eket a Matlab 6-os verziójának scriptnyelvében írt programmal számoltam ki.

3.5.2. Faktoranalízis az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti paraméterek közötti kapcsolatrendszer elemzésére

A faktoranalízis olyan matematikai elemzési koncepció, amely lehetővé teszi az elektromos potenciálkülönbség és nedvzárlás adatokból, valamint a környezeti paraméterekből összeállított többváltozós (10 ill. 12 változó) összefüggésrendszer háttér-(ok-) változóinak feltárását. A módszer lényegét Sváb (1979) ill. Héberger és Rajkó (in Horvai, 2001) alapján röviden a következőképpen lehet összefoglalni. A faktoranalízis koncepciója abból az alapgondolatból indul ki, hogy a legtöbb megfigyeléssel és ezek korrelációvizsgálatával csak a jelenségek megnyilvánulását lehet regisztrálni, míg a lényeg, a háttérváltozó fedve marad. Ennek oka lehet, hogy a háttérváltozó: 1. nem ismerjük, 2. az nem, vagy nehezen mérhető (különösen *in vivo* nem mérhető), 3. komplex tulajdonság.

A háttérváltozók (faktorok) feltárását nehezíti, hogy egy-egy háttérváltozót feltehetőleg csak több megfigyelési változóval lehet jellemezni, másrészt több faktor befolyásolhatja ugyanazt a megfigyelési változót.

A megoldáshoz kevés támpont van. 1. A megfigyelési változókból kell visszakövetkeztetni a faktorokra. 2. A megfigyelési változók többé-kevésbé korrelálnak egymással, korrelációs rendszert képeznek, amelyet matematikailag korrelációs koefficienssekkel, ill. az azokat összefoglaló korrelációs mátrixszal (**R**) lehet kifejezni. 3. Legfeljebb annyi faktort lehet feltételezni, amennyi megfigyelési változó van, de várhatóan a faktorok száma kisebb.

A háttérváltozók feltárása szempontjából a kiindulási alap mindig a megfigyelési változók korrelációs mátrixa (**R**). Ha két vagy több megfigyelés változó között nagyon szoros a korreláció, akkor egy vagy néhány közös faktor feltételezhető, amelyek egyenként különböző súllyal befolyásolják az egyes megfigyelési változókat. Egy faktort akkor nevezünk közösnek (common factor), ha legalább két faktoregyütthatója határozottan különbözik nullától. Ha a közös faktor az összes változóhoz kapcsolható, akkor elnevezése általános faktor (generál factor), egyébként csoportfaktor (group factor). Mindehhez hozzájárulhatnak gyengébben ható egyedi faktorok, amelyek csak egyetlen változót befolyásolnak, valamint mérési, becslési hibák.

Az elemzés során az első lépésben a megfigyelési változókat standardizálni kell:

$$x'_j = (x_{ij} - \bar{x}) / s_j \quad i=1 \dots N; j=1 \dots M \quad (3.5.2.1.)$$

ahol s_j a tulajdonságvektor elemeinek korrigált tapasztalati szórása (standard deviációja); így a változók várható értéke zérus, szórásuk 1 lesz.

A következő lépésben a standardizált megfigyelési változókat egy tulajdonságmátrixba (**X**) rendezzük, mely N objektumból vagy esetből (sor) és M változóból (oszlop) áll. Ebben az $N \times M$ méretű **X** mátrixban nem különböztetjük meg a függő és független változókat.

A megfigyelési változók kifejezhetők két komponens, a szisztematikus vagy közös komponens és a hibakomponens összegeként:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} + \mathbf{E} \quad (3.5.2.2.)$$

N, M N, M N, M

ahol **A** közös komponens, mint mátrix, **E** a hibakomponens, mint mátrix.

Feltételezzük, hogy a közös és a hibakomponens korrelálatlan egymással: $\mathbf{A}^T \mathbf{E} = \mathbf{E}^T \mathbf{A} = 0$ (1. feltétel), illetve, hogy a hibakomponens elemei függetlenek (2. feltétel). A közös komponens **A** mátrixát a faktorok (háttérváltozók) lineáris kombinációjával fejezzük ki:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F} \mathbf{L}^T, \quad (3.5.2.3.)$$

N, M N, a, M

ahol \mathbf{F} a faktor mátrixa (score matrix), \mathbf{L} a faktoregyütthatók (faktorsúlyok) mátrixa (loading matrix), és „a” a közös faktorok száma.

A faktorok meghatározásának további feltétele, hogy a faktorok legyenek lineárisan függetlenek: $\mathbf{F}^T \mathbf{F} / N = \mathbf{I}$ (3. feltétel). (Az \mathbf{I} az egységmátrix, diagonális elemei 1-et, a főátlón kívüli elemei 0-át tartalmaznak).

A három feltétel alapján a korrelációs mátrixot (\mathbf{R}) a következőképpen lehet felbontani:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} / N = \mathbf{A}^T \mathbf{A} / N + \mathbf{U}^2 = \left(\mathbf{F} \mathbf{L}^T \right)^T \left(\mathbf{F} \mathbf{L}^T \right) / N + \mathbf{U}^2 = \mathbf{L} \mathbf{L}^T + \mathbf{U}^2 \quad (3.5.2.4.)$$

M, M M, N N, M M, N N, M M, M N, a, a, M N, a, a, M M, M M, a, a, M M, M

Tehát a megfigyelési változók közötti korrelációkat reprodukálni lehet a faktoregyütthatókkal (\mathbf{L}), a változók szórásnégyzeteinek a közös faktorokkal nem magyarázott része pedig a hiba-szórásnégyzetekkel (\mathbf{U}^2) egyenlő.

A változók standardizált szórásnégyzeteinek (értékük 1) a közös faktorokkal megmagyarázott részét kommunalitásnak (\mathbf{H}^2 diagonális mátrix) nevezik. Felírható, hogy

$$\mathbf{U}^2 = \mathbf{I} - \mathbf{H}^2 \quad (3.5.2.5.)$$

M, M M, M M, M

továbbá a 3.5.2.4. és a 3.5.2.5. alapján, hogy

$$\mathbf{R} - \mathbf{I} + \mathbf{H}^2 = \mathbf{L} \mathbf{L}^T \quad (3.5.2.6.)$$

M, M M, M M, M M, a, a, M

azaz a faktoregyüttható-mátrixnak és transzponáltjának szorzata egyenlő azzal a módosított korrelációs mátrixszal, melynek diagonálisában a kommunalítások vannak. A faktoregyütthatók a módosított korrelációs mátrix sajátvektorainak kiszámításával kaphatók meg.

A kommunalítások értékét becsülni kell. Erre több módszer van, általában a többszörös determinációs együtthatók módszerét alkalmazzák. Ennél a módszernél az i -edik változónak az összes többi változóra vonatkozó többváltozós regressziója során kapott korrelációs együttható négyzetét választják a kommunalitás becsülésének. Ez a módszer azért is indokoltnak tűnik, mert a többszörös korrelációs-koeficiens-négyzet azt fejezi ki, hogy az egyik megfigyelési változó varianciájából mennyit határoz meg a többi megfigyelési változó.

A faktorok akkor értelmezhetők jól, ha a faktoregyütthatók között csak nagy és kicsi értékek fordulnak elő. Ekkor, az ún. egyszerű struktúra esetén a változók a faktorok alapján könnyen elkülönülő halmazokba sorolhatók. Ha az elemzés végén nem értelmezhetők a faktorok, akkor fizikai értelemmel bíró faktorokká történő átalakításra forgatási módszereket használnak. Az ún. varimax módszer a legáltalánosabban használt ortogonális transzformáció. A módszer a faktoregyütthatók négyzeteinek varianciáját (szórásnégyzetét) maximalizálja. Így abszolút értékben csak viszonylag nagy (1-hez közeli) vagy kis (0-hoz közeli) faktoregyütthatókat kapunk, legjobban kielégítve az egyszerű struktúra követelményét.

3.5.3. Lineáris regresszió-analízis az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti paraméterek közötti összefüggések kimutatására

A lineáris regresszió-analízist az adatfeldolgozás során két lépésben alkalmaztam. Első lépésben – a faktoranalízis mellett, s azt kiegészítendő – pusztán statisztikai alapon elemeztem az összeállított adatrendszeret, hogy megállapítsam az elektromos potenciálkülönbség, mint függő változó és a környezeti paraméterek, mint magyarázó változók közötti összefüggéseket. A második lépésben – ezen eredmények és a faktoranalízis eredményeinek figyelembe vételével – a gyakorlatban esetlegesen alkalmazható tapasztalati modell felállításához hívtam segítségül a regresszió-analízist.

Az empirikus modellépítést fekete doboz modellel lehet a legkönnyebben jellemezni. A modellalkotás szempontjai szerint egy adatmátrix oszlopait fel lehet bontani M bemenő

(input) változókra (független változó: ξ) és K válaszfüggvényre, (output) változóra (függő változó: η). A mátrix elemeit a zaj (ε) is befolyásolja. A modellt általánosan a következő alakban lehet felírni:

$$\eta = \phi(\xi, \Theta) + \varepsilon, \quad (3.5.3.1.)$$

ahol ε ismert eloszlású (általában normális eloszlású), nulla várható értékű valószínűségi változó, ϕ a válaszfüggvény, Θ pedig P számú illesztendő paramétert jelöl.

Az empirikus modellépítés során $\eta = \Theta_0$ majd $\eta = \Theta_0 + \Theta_1 \xi_1$, azután $\eta = \Theta_0 + \Theta_1 \xi_1 + \Theta_2 \xi_2$, stb. alakban keressük a megoldást. E többváltozós lineáris közelítésnek az a nagy előnye, hogy egyes változók hatását éppen az illesztendő paraméter adja.

A tapasztalati összefüggések keresése közben mindig felmerül a bemenő (leíró) változók közötti választás kényszere, mivel fontos szempont, hogy minél kevesebb változóval lehessen leírni a jelenséget; és csak lényegi, valóban meghatározó változók szerepeljenek a modellben. Lényegében tehát csak azokat a bementi változókat kell megtartani, amelyek jó illeszkedésű modellt eredményeznek. Az illeszkedés jóságát az ún. regressziós együtthatóval (R^2) lehet jellemezni:

$$R^2 = \frac{1}{K \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left(\frac{y_{k,n} - \hat{y}_{k,n}}{y_{k,n} - \bar{y}_k} \right)^2, \quad (3.5.3.2.)$$

ahol N az objektumok száma, \bar{y}_k a k -edik független változó értékeinek átlaga, $y_{k,n}$ az n -edik objektumhoz tartozó mért, $\hat{y}_{k,n}$ pedig számított értéke. Az illeszkedés annál jobb, minél nagyobb R^2 . Ha több egyenértékű választás is lehetséges, akkor ezek közül a kevesebb változót tartalmazó modell kell előnyben részesíteni.

Ha a változók korreláltak, előfordul, hogy számos különbözőképpen kiválasztott változócsoport ugyanolyan illeszkedésű összefüggést eredményez. Lineáris modell esetében elvben egyszerű a változók kiválogatása: a változókat az összes lehetséges kombinációban a modellbe léptetjük, és minden modell esetén becsüljük a mért függő változókat, majd a legjobb modelleket valamilyen szempont alapján kiválogatjuk. Ez az összes lehetséges regressziós egyenlet módszere. A gyakorlatban ez igen nehezen megvalósítható módszer, különösen, ha nagyszámú változó közt kell különbséget tenni, ezért különböző sokváltozós szélsőérték-kereső módszert alkalmaznak:

- Többváltozós lineáris modellek építése előreirányuló változóbevonással (forward selection). Előnye, hogy akkor is alkalmazható, ha változók száma nagyobb, mint az objektumoké. Hátránya, hogy korrelált változók esetén, egy már a modellben lévő változó nem enged belépni egy másik, esetleg jobb változót, tehát nincs mód az egyszer már modellbe került változók eltávolítására.

- Többváltozós lineáris modellek építése visszafelé irányuló változótörléssel (backward elimination). Előnye, hogy rendszerint jobb modellekre vezet, mint az előreirányuló választás, hátránya, hogy az objektumok számának nagyobbak kell lennie a változók számánál. Az egyszer már kikerült változókat nem lehet visszatenni.

- Lépésenkénti lineáris regresszió (stepwise linear regression). Előre és visszafelé is lehet indítani. Lényege, hogy minden egyes változó modellbe építésénél ki kell számítani a modellben lévőkre is és a kimaradókra is a mintastatisztika (Fisher-statisztika) értékét. Ha a kimaradók között még van olyan F érték, ami az előre megszabott értéket meghaladja, akkor a kérdéses változót is beépítjük. Fordítva, ha valamelyik modellben lévő változó F értéke kicsinnyé válik, mert más, jobb változók kerültek a modellbe, akkor ezeket a változókat törölni lehet. Az F (Fisher-) statisztika definíciója:

$$F = \frac{(N - P)R^2}{P(1 - R^2)}, \quad (3.5.3.3.)$$

ahol P a modellben lévő paraméterek száma, N az objektumok száma, R^2 pedig a már említett regressziós együttható.

Az alkalmazott matematikai statisztika rohamos fejlődése megteremtette a lehetőségét annak, hogy más elvek alapján kifejlesztett módszereket is fel lehessen használni a változó-kiválasztásra. Így például a főkomponens-analízist vagy a faktor-analízist is lehet alkalmazni változó előválogatásra oly módon, hogy azokat a változókat lehet elhagyni, melyeknek a hozzájárulása a fontos főkomponensekhez (faktorokhoz) kis súlyú.

Magát a lineáris regressziószámítást a legelterjedtebb módszerrel, a legkisebb négyzetek módszerével végezhetjük el. A lineáris regressziós modell mátrix formában a következőképpen írható fel (Kerékgyártó és Mundruczó, 1990; Hunyadi et al., 1996):

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{e} \quad (3.5.3.4.)$$

ahol \mathbf{y} a függő változó $(n \cdot 1)$ -es oszlopvektora; \mathbf{X} a magyarázó változók $[n \cdot (m+1)]$ -ed rendű mátrixa (m a magyarázó változók száma); \mathbf{e} a reziduumok vektora ($\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}$); $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ a becsült paraméterek $[(m+1) \cdot 1]$ -es oszlopvektora.

A legkisebb négyzetek módszere a reziduumok négyzetösszegét minimalizálja:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}) \rightarrow \min. \quad (3.5.3.5.)$$

A becsült paraméterek vektora úgy kapható, hogy az előbbi kifejezést $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ szerint deriváljuk és a deriváltat zéróval tesszük egyenlővé:

$$\frac{\mathbf{e}^T \mathbf{e}}{\partial \hat{\boldsymbol{\beta}}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (3.5.3.6.)$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (3.5.3.7.)$$

Ebből a becsült paraméterek vektora:

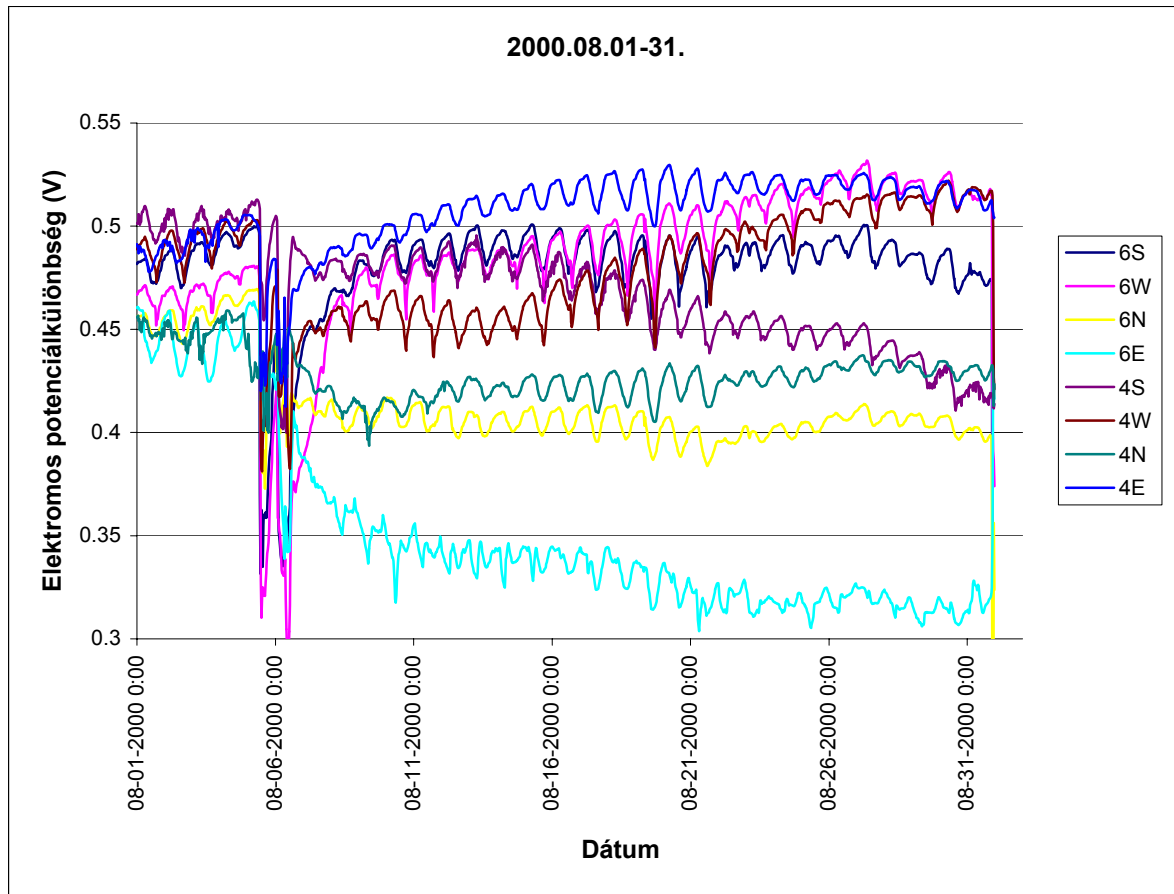
$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (3.5.3.8.)$$

A legkisebb négyzetek módszere nemcsak torzítatlan, de egyúttal legjobb becslést is ad a β paraméterekre. Ez azt jelenti, hogy a lehetséges torzítatlan becslések közül a legkisebb négyzetek módszere esetében a legkisebb a paraméterbecslések szórása, vagyis a standard hiba.

4. A fatörzsön mért elektromos potenciálkülönbség adatsor elemzése

4.1. A vizsgálat szempontjai

A mintegy négy és fél éves mérés (1997.05.07.-2002.02.28.) során keletkezett adatmennyiséggel való ismerkedésként vegyük szemügyre az adatsor egy részét (4.1. ábra). Amit első látásra meg lehet figyelni, az egy markáns periodikus ingadozás. Ennek az ingadozásnak a nagyságrendje a néhány tíz millivolt tartományba esik. Ez az intenzitás azonban nem állandó, hanem idővel változik. A jel-alapszinteket vizsgálva, azt látjuk, hogy az



4.1. ábra 2000. 08. 01-31. között mért elektromos potenciálkülönbség adatsor

időszak elején (2000. augusztus első napjain) az egyes csatornák futása nagyjából hasonló képet mutat. 5-én és 6-án nagy intenzitású, tizedvoltos nagyságrendű tranziens változások figyelhetők meg, amelyek külső eredetű zavarra vezethetők vissza. A szabálytalan változások elmúltával némi eltérés tapasztalható a csatornák alapszintjében, az egyes csatornák közötti potenciálkülönbség megváltozott.

Ezen első megfigyelések alapján a következő általános, az egész mért adatsorra vonatkozó kérdések merülnek fel:

- Milyen szabályos (harmonikus) hosszú és rövidperiódusú változások találhatók a mért elektromos potenciálkülönbség adatsorban?
- Milyen ezeknek a változásoknak a karakterisztikája?
- Milyen tranziens változások figyelhetők meg az adatsorban?

- Megfigyelhető-e valamiféle szabályszerűség az egyes csatornák egymáshoz képesti viselkedésében?
- Van-e valamiféle lényeges eltérés az egyes szintek között?
- Tapasztalható-e lényeges eltérés az égtájakhoz köthetően?

A következő alfejezetekben rendre ezekre a kérdésekre keresem a választ. Az érdemi munkát az első és a második kísérleti szakasz adatsorán végeztem így a legtöbbször ezekre az időszakokra vonatkozó vizsgálatokat mutatom be.

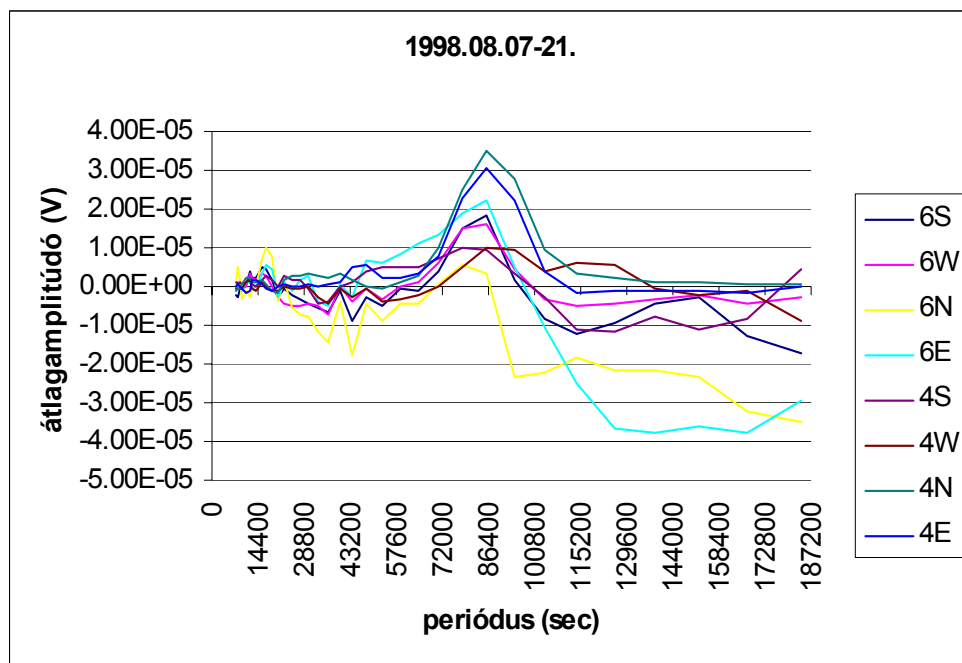
4.2. Az elektromos potenciálkülönbség-adatsor spektrális elemzése

4.2.1. Az elektromos potenciálkülönbség adatsor idősor-elemzése

Az idősor-elemzéshez alapvetően kétféle felbontású adatsort használtam fel. A közép- és hosszúperiódusú ($T > 12$ óra) változások vizsgálatához vizsgálandó adatsorokat 30 elemes (fél órás) mozgóátlagolással állítottam elő. Ezzel a módszerrel a fél óránál kisebb periódusidejű változások eltűnnek, de az adatszám csökkentésével a feldolgozás időigénye csökken (pl. 30 nap esetében az elméleti adatszám egy csatornára 43200 helyett csupán 1440).

A rövid periódusidejű ($T < 12$ óra) változások vizsgálatához az eredeti, módosítatlan, 1 perces mintavételi gyakoriságú regisztrátumot használtam fel. Mivel ez csatornánként és naponként 1440 adatot jelent, a feldolgozóprogramok kapacitása miatt maximálisan 7-8 napnyi adatmennyiséget vizsgálhattam egyszerre.

A rövid- és középperiódus közti 12 órás periódushatárt kényszerűségből, a konvolúciós szűrést végző program korlátjai miatt választottam. 1 perces digitális közű adatsor használatakor ugyanis a program valamivel több, mint fél napnak megfelelő szűrőtartományban fut le hibamentesen. A 12-24 óra közé eső periódusú változások vizsgálatához a fél órás digitális közű adatsor még megfelelőnek tekinthető.



4.2.ábra. A lineáris trend leválasztása nélküli és a lineáris trend leválasztása utáni szűrés eredményeinek különbsége (1998.08.07-21)

Próbaelemzést végeztem azért, hogy eldöntsem szükséges-e a lineáris trend leválasztása a konvolúciós eljárásnál. A 4.2.ábrán az 1998. 08. 07-21. közötti időszakra vonatkozó lineáris

trend leválasztása nélküli és a lineáris trend leválasztása utáni konvolúciós szűrés eredményeinek különbségét ábrázoltam. Ezek az eltérések az átlagamplitúdó értékekben maximum 1-2 ezrelék differenciát jelentenek (vö. 4.5.b ábra), azaz az a kapott eredményeket a trendleválasztás elhagyása nem befolyásolja lényegesen, így az adatsorokról a lineáris trendet nem választottam le.

A négy és fél éves mérési adatsor idősor elemzésének teljes bemutatása a területi korlátok miatt nehézségekbe ütközik, ezért az idősor analízis eredményeit minta adatsorokon mutatom be (4.1. táblázat). A II. kísérleti szakaszból, 4 db 1 hónapos adatsort választottam ki (1998. februárjától kezdve minden harmadik hónap) valamint ellenőrzésként, további 1-1 havi adatsort a III. és IV. kísérleti szakaszból. A nagyperiódusú ingadozások vizsgálatához a leghosszabb egybefüggő, adatkiesésektől mentes adatsort választottam ki, melynek hossza csaknem 8 hónap. A nagyfrekvenciás változások kimutatásához ezeken felül még 2db egyenként 7 napos minta adatsoron végeztem elemzést. Mivel egy későbbi alfejezetben külön is foglalkozom az egyes csatornák egymáshoz viszonyított eltéréseivel, valamint mind a 16 csatorna egyidejű bemutatása az ábrák értelmezhetőségének rovására menne, ezért csak az első 8 csatorna adatait illetve az ezek elemzésekor kapott eredményeket ismertetem.

Kísérleti fázis	Közép-és hosszúperiódusú vizsgálat		Rövid periódusú vizsgálat	
	sorszám	dátum	sorszám	dátum
II	1.	1998. február	8.	1998. 08. 07-13.
	2.	1998.május		
	3.	1998. augusztus		
	4.	1998. november		
	5.	1998.05.07.-12.31.		
III	6.	2000. augusztus		
IV	7.	2001. augusztus	9.	2001. 05. 20-26.

4.1. táblázat. Az idősor analízishez felhasznált minta adatsorok

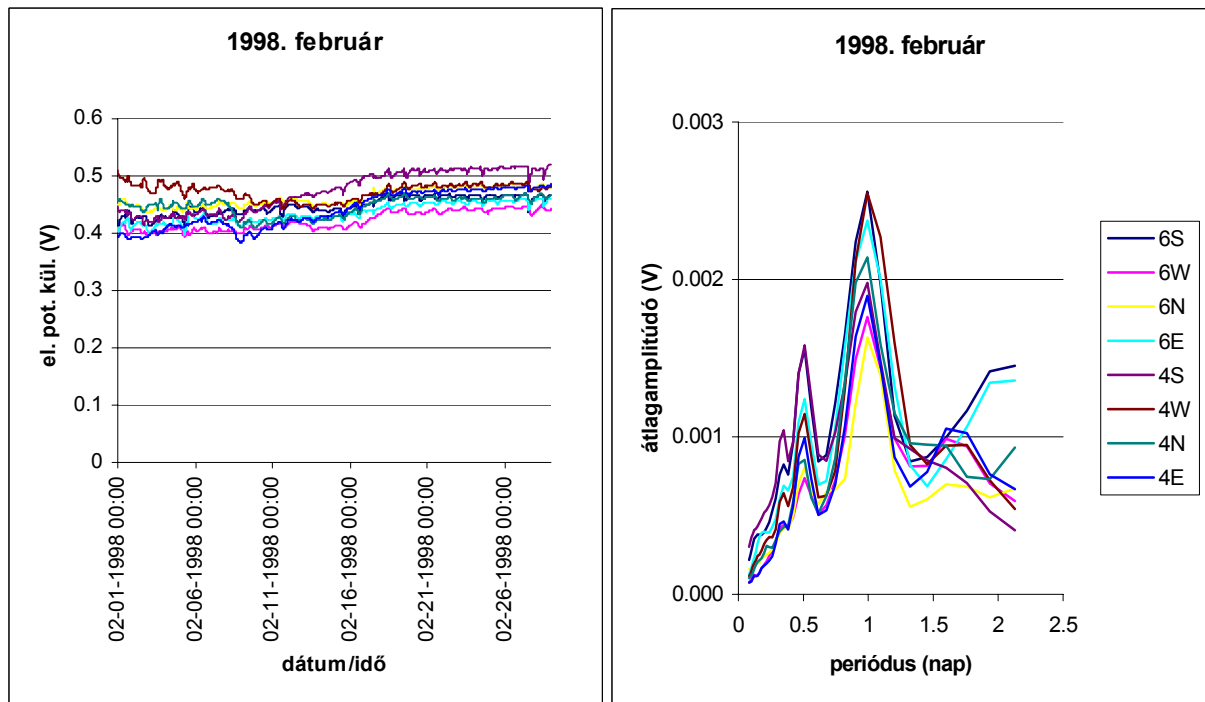
4.2.1.1. A közép és hosszúperiódusú változások vizsgálata

A következő ábrákon az 1-7. minták adatsorai, valamint az adatsorokon elvégzett konvolúciós szűrés ill. gyors Fourier-transzformáció eredményei láthatók. Az alábbi (4.2.) táblázat tartalmazza az egyes mintákhoz alkalmazott konvolúciós szűrő fő paramétereit:

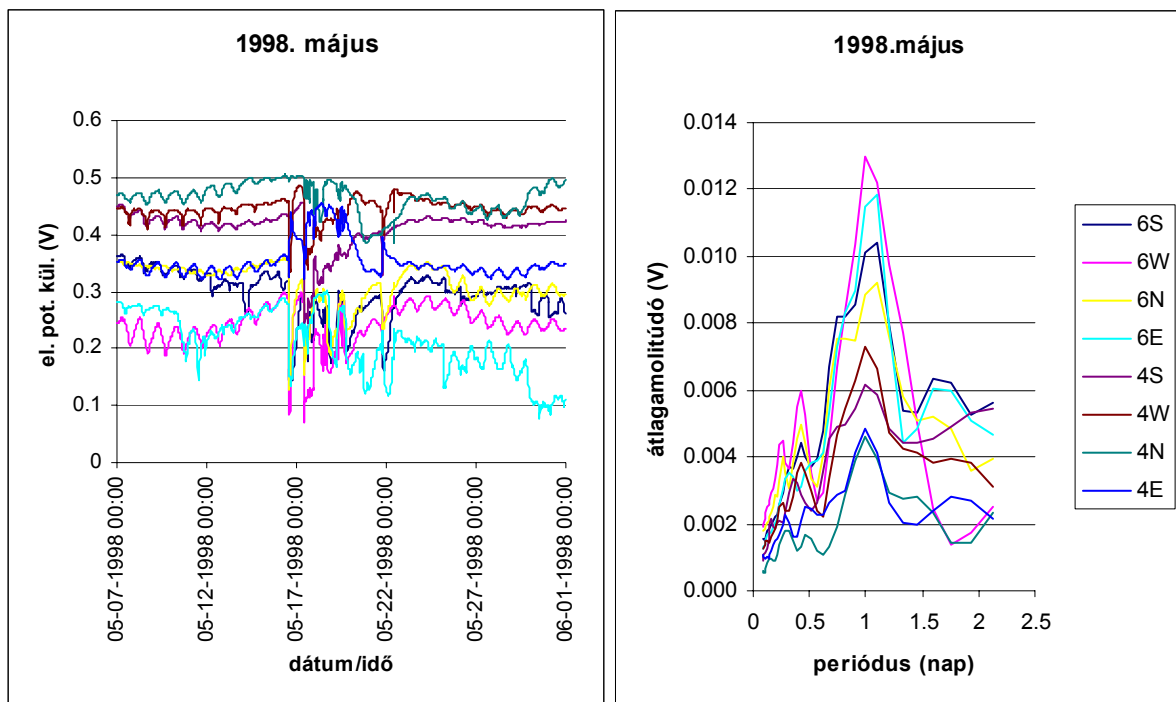
minta sorszám	szűrő alsó határ (sec)	szűrő felső határ (sec)	digitális köz (sec)	szűrő sáv szélesség	szűrő félhossz (periódus)
1,2,3,4,6,7.	7200	180000	1800	1.1	4
3a.	18000	100000	1800	1.02	20
5.	72000	6000000	1800	1.1	4

4.2. táblázat. Az 1-5.mintákhoz tartozó konvolúciós szűrőparaméterek

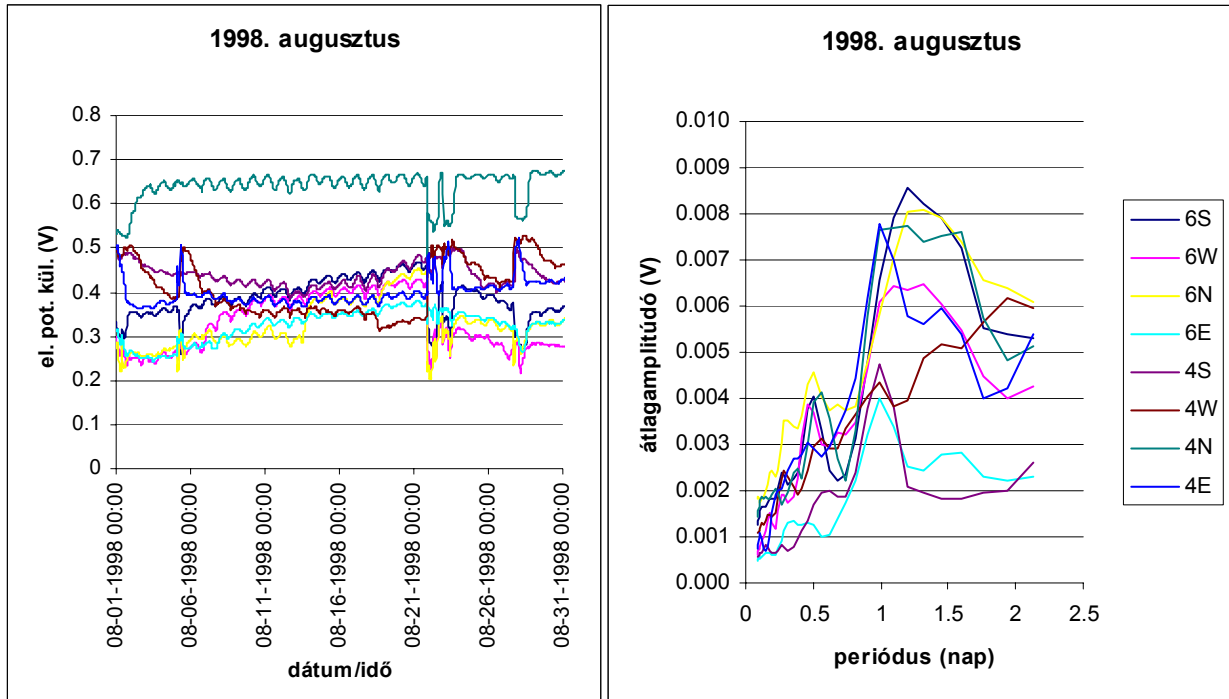
Az 1-4, ill. 6-7. mintáknál a szűrés alsó határa 2 óra, felső határa 50 óra, így az eredmények információt nyújtanak a nagyobb frekvenciájú változásokról is (átfedés van a rövidperiódusú vizsgálatral). A 4.3-4.9. ábrákon látható, hogy ebben az időtartományban a legnagyobb energiájú változás (ehhez köthető a legnagyobb amplitúdó) az egy napos periódusidőhöz tartozik.



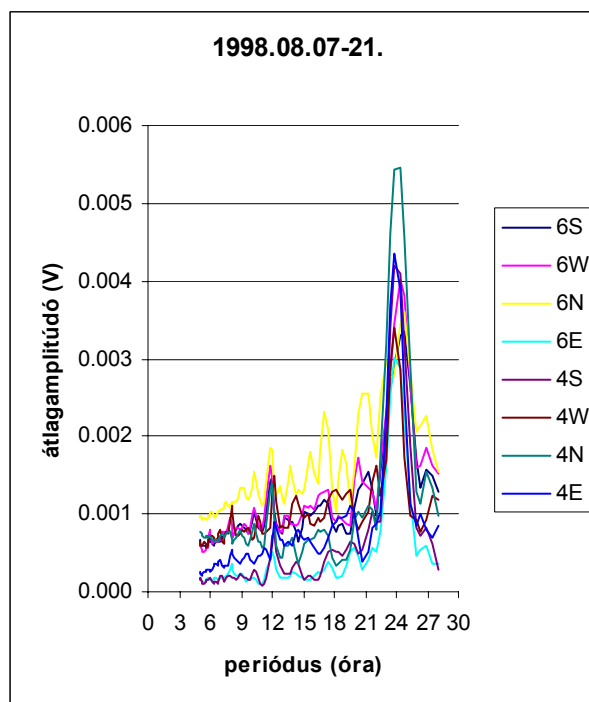
4.3.a-b. ábra. 1. minta. Az 1998. február havi adatsor és amplitúdóspektrum



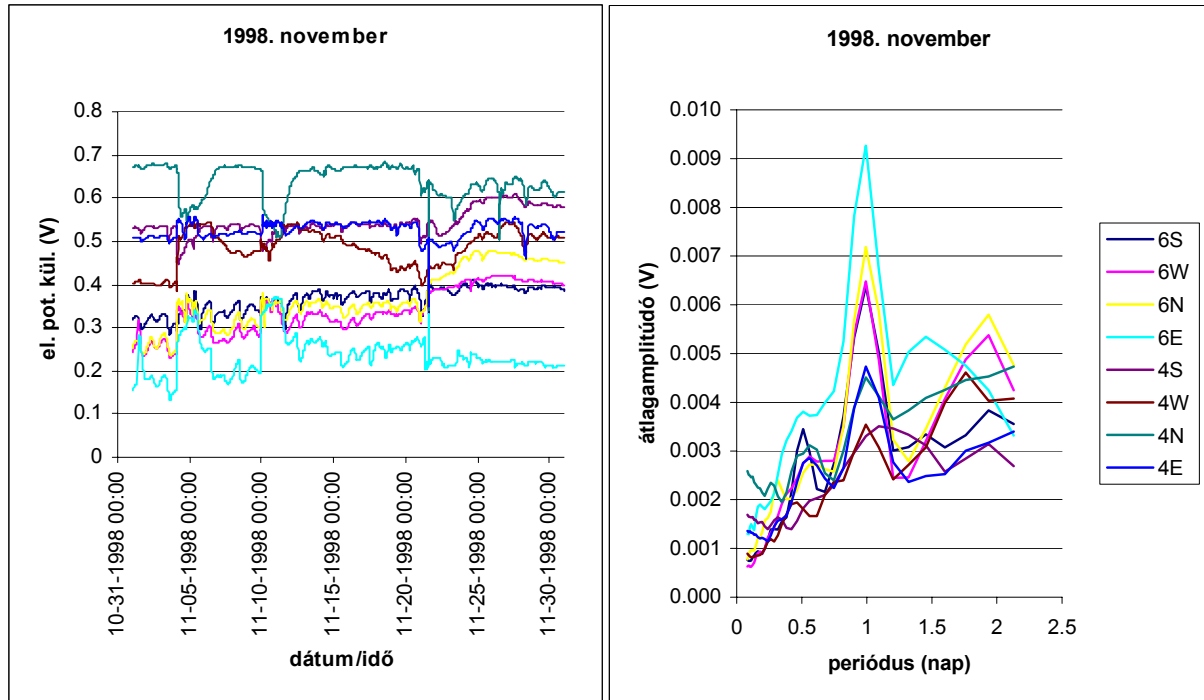
4.4.a-b. ábra. 2. minta. Az 1998. május havi adatsor és amplitúdóspektrum



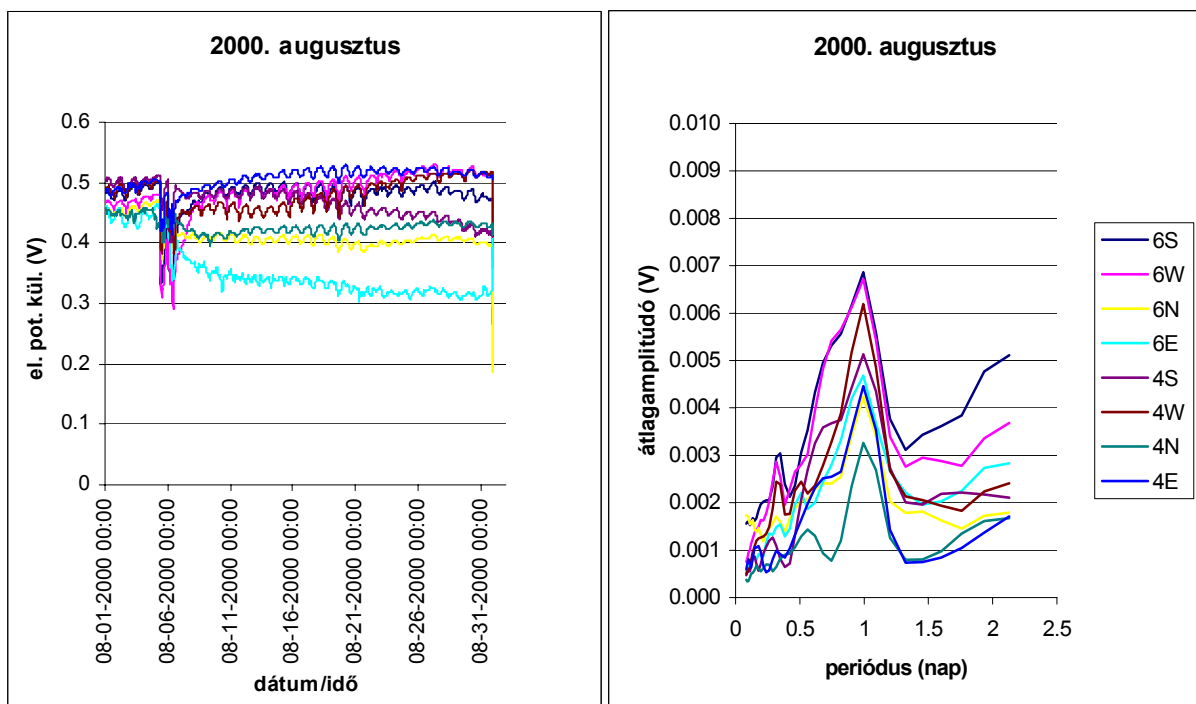
4.5.a-b. ábra. 3. minta. Az 1998. augusztus havi adatsor és amplitúdóspektrum



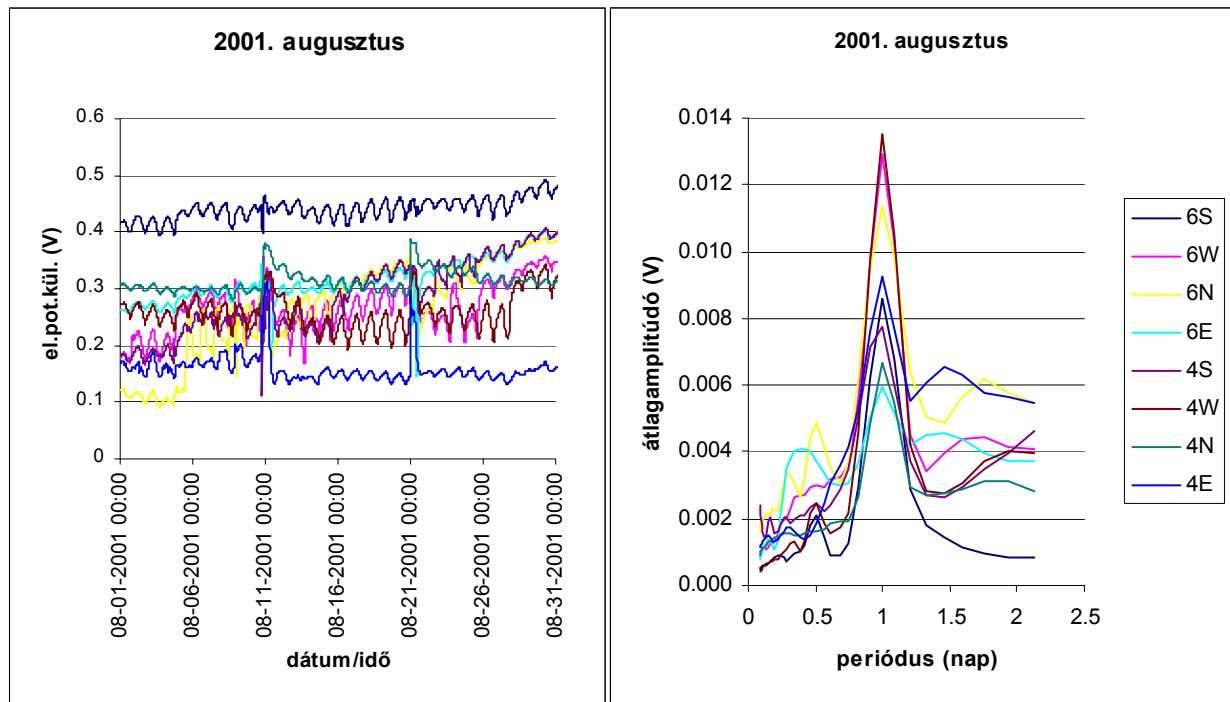
4.5.c. ábra. 3. minta részlet. 1998.08.07-21. időszak amplitúdóspektruma a 2. táblázat 3a beállításai szerint



4.6.a-b. ábra. 4. minta. Az 1998. november havi adatsor és amplitúdóspektrum



4.7.a-b. ábra. 6. minta. A 2000. augusztus havi adatsor és amplitúdóspektrum

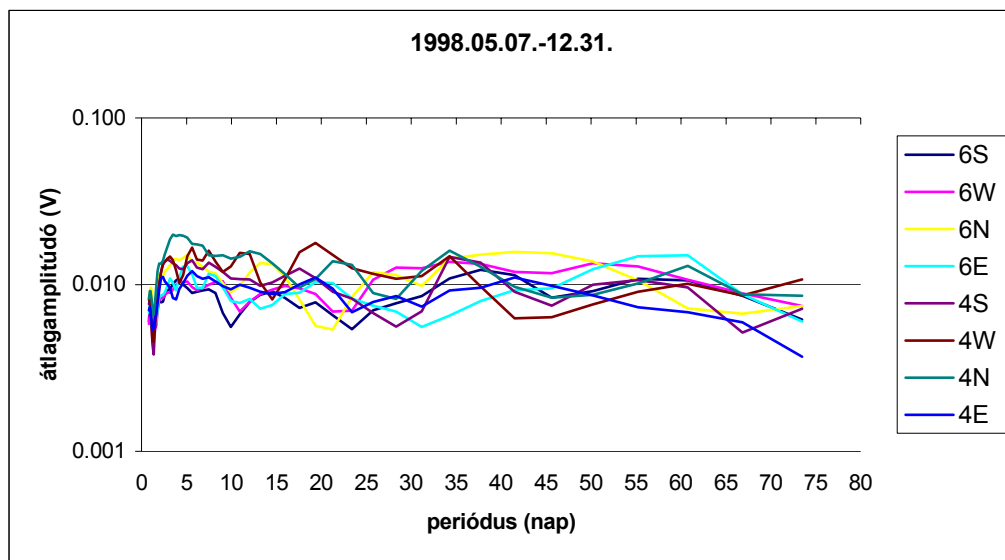


4.8.a-b. ábra. 7. minta. A 2001. augusztus havi adatsor és amplitúdóspektrum

Ez összhangban van mind a saját bükkfán elvégzett kétcsatornás kísérletünkkel, ahol mintegy 10 mV amplitúdójú napi periódust tapasztaltunk (Koppán, 1996 és Koppán et al., 1999), mind az irodalmi adatokkal: H. S. Burr szabályos napi változásokról számol be (H. S. Burr, 1956), 20-30 mV-os karakterisztikus napi járást mutatott ki Wilhelmi is (Wilhelmi, 1996), míg Morat és munkatársai szintén néhány tíz millivolt nagyságrendű szabályos napi változásokat említenek (Morat et al., 1994). Ez a napi változás mindegyik mintán egyformán megfigyelhető, még az esetlegesen jelenlevő, nagyenergiájú (a napi változások amplitúdójánál néhány esetben csaknem egy nagyságrenddel nagyobb – pl. 2. és 4. minta), külső környezeti hatásokra visszavezethető, szabálytalan változások sem nyomják el.

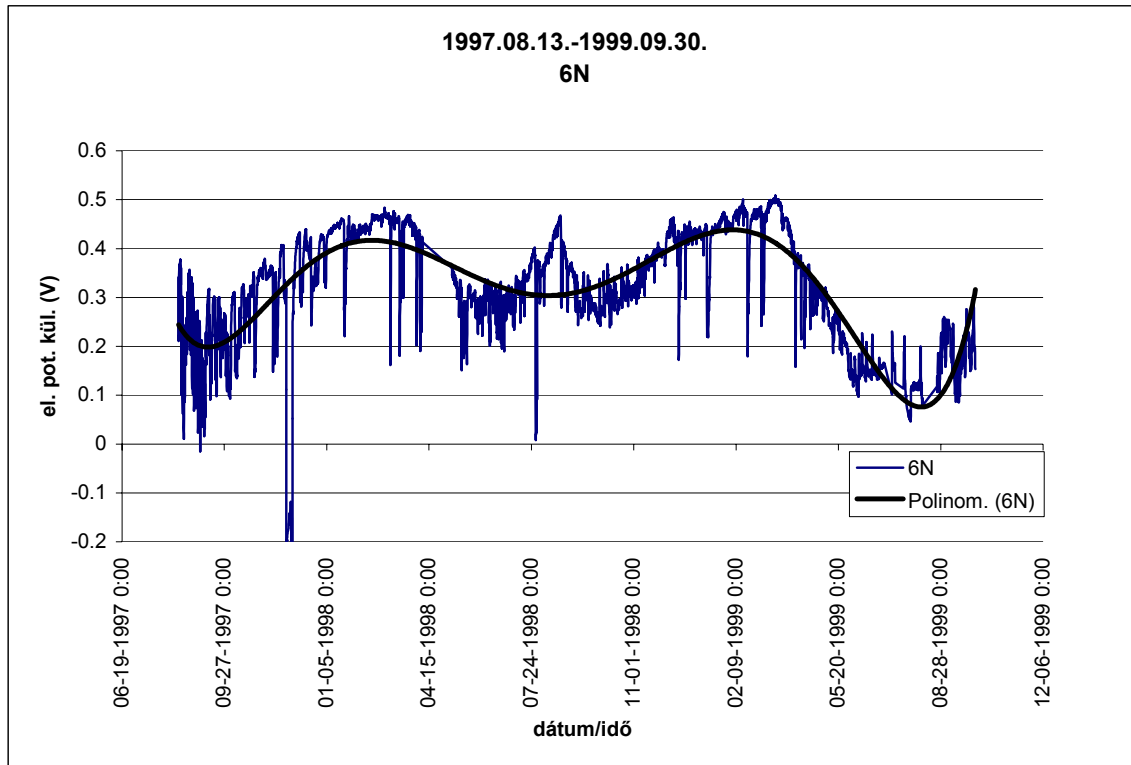
A napi változások mellett felfedezhető egy másik jellegzetes periódus ebben a tartományban: a 12 órás periódus. Ez a félnapos változás nagyon tisztán látszik a nagyenergiájú tranziensváltozásoktól mentes 1998. februári 1. minta-adatsoron. A 2-7. mintán a hasonló frekvenciájú zajok miatt az ingadozás nehezebben azonosítható, egyes csatornákon tisztán kivehető, másokon kevésbé. Ezeknél a kérdéses eseteknél is egyértelműen kimutatható a 12 órás változás, ha a minta-adatsorokból zavarmentes időszakot vágunk ki (pl. 1998. augusztus → 1998.08.07-21.), majd a szűrő sáv szélességét illetve a szűrő félhosszát megváltoztatva (ld. 4.2. táblázat 3a minta szűrőparaméterei) a konvolúciós szűrő periódus-felbontásán javítunk (4.5.c.ábra). A félnapos változás energiája a vizsgált mintaidőszakok alapján mintegy harmada-egyede az egynapos változásnak.

A hosszúperiódusú változások vizsgálatára első lépésben a leghosszabb egybefüggő adatsort használtam fel. A mintegy 8 hónapnyi adatsoron maximum 2-3 hónapos periódusokat lehet elvileg kimutatni mind a konvolúciós, mind az FFT eljárással, ugyanis az adatsornak minimum 2 teljes periódust tartalmaznia kell. A 4.9. ábrán az 1998. 05.07.-12.31. időszak amplitúdóspektruma látható. A durván 2 és fél hónapnyi periódustartományban az egyes csatornák igen eltérően viselkednek, s nem mutatható ki olyan jellegzetes, 24 óránál nagyobb periódusú változás, ami 6 és 4 m-es szintek mind a 8 csatornáján egyformán jelentkezne.



4.9. ábra. 1998.05.07.-1998.12.31. időszakhoz tartozó amplitúdóspektrum

A hónaposnál nagyobb periódusidejű, szezonális ingadozások meghatározásához egy 2 éves (1997.08.13.-1999.09.30., digitális köz: 2 óra) adatsort állítottam össze. Ez tulajdonképpen csaknem a teljes I. és II. kísérleti szakasz, vagyis az az időszak, melynek során az 1-8 elektródok az eredeti pozíciójukban (az 1. fa 4 és 6 m-es szintje) maradtak. Ezen a két éves adatsoron az adathiányok miatt spektrális elemzést nem tudtam elvégezni, ezért az adatsorra polinomot illesztettem, hogy a nagyvonalú változásokat nyomon lehessen követni



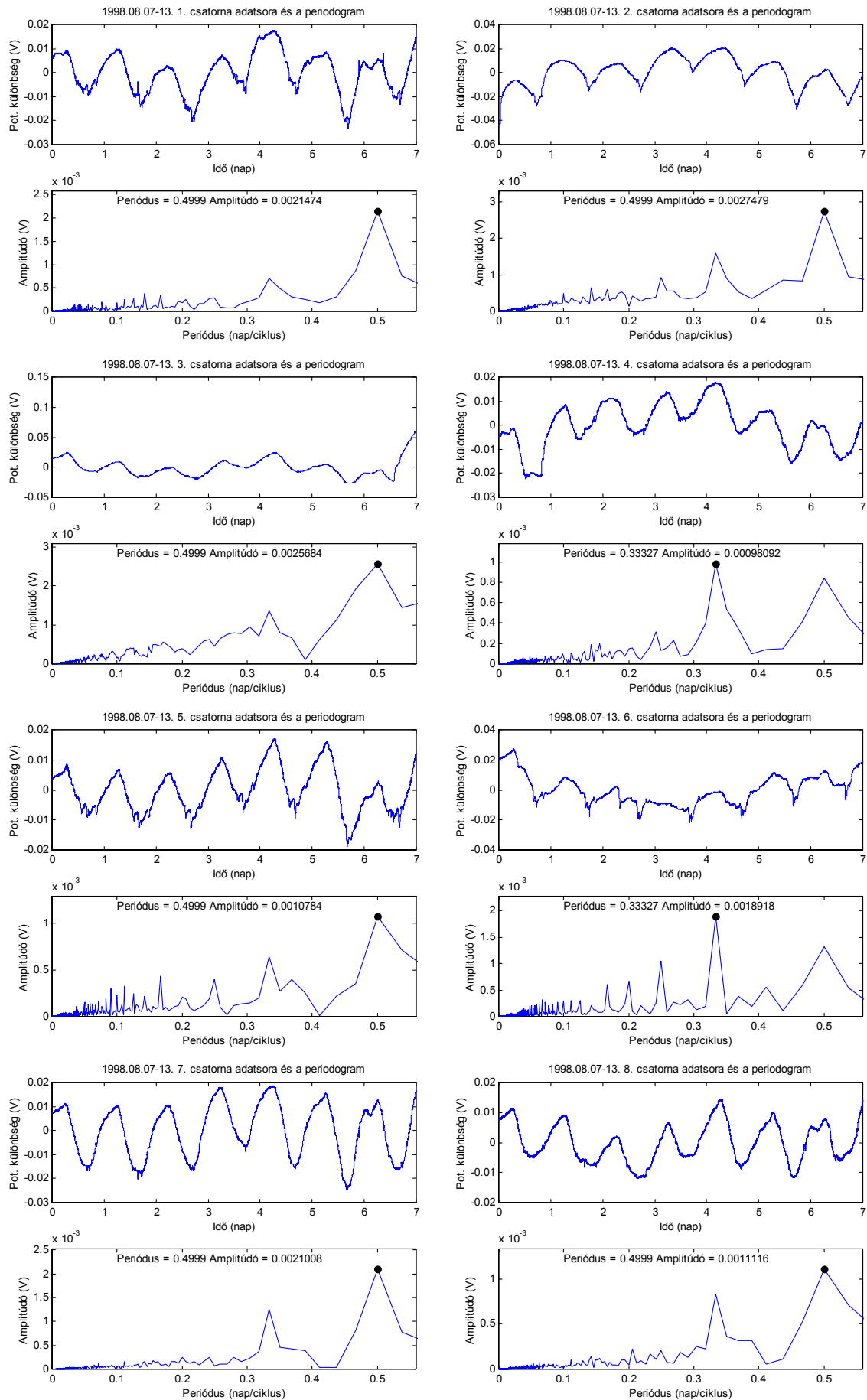
4.10. ábra. 1997.08.13.-1999.09.30. időszak adatsora (6 m-es szint É-i csatorna) és az illesztett polinom

(4.10. ábra). Az illesztett görbén szabályos szezonális ingadozás figyelhető meg 2 lokális maximummal. A maximumok a téli, kora tavaszi időszakokra, míg a minimumok a nyári, őszi időszakokra esnek. Az eredeti adatsoron megfigyelhető ezeken kívül még egy kisebb nyárvégi csúcs is.

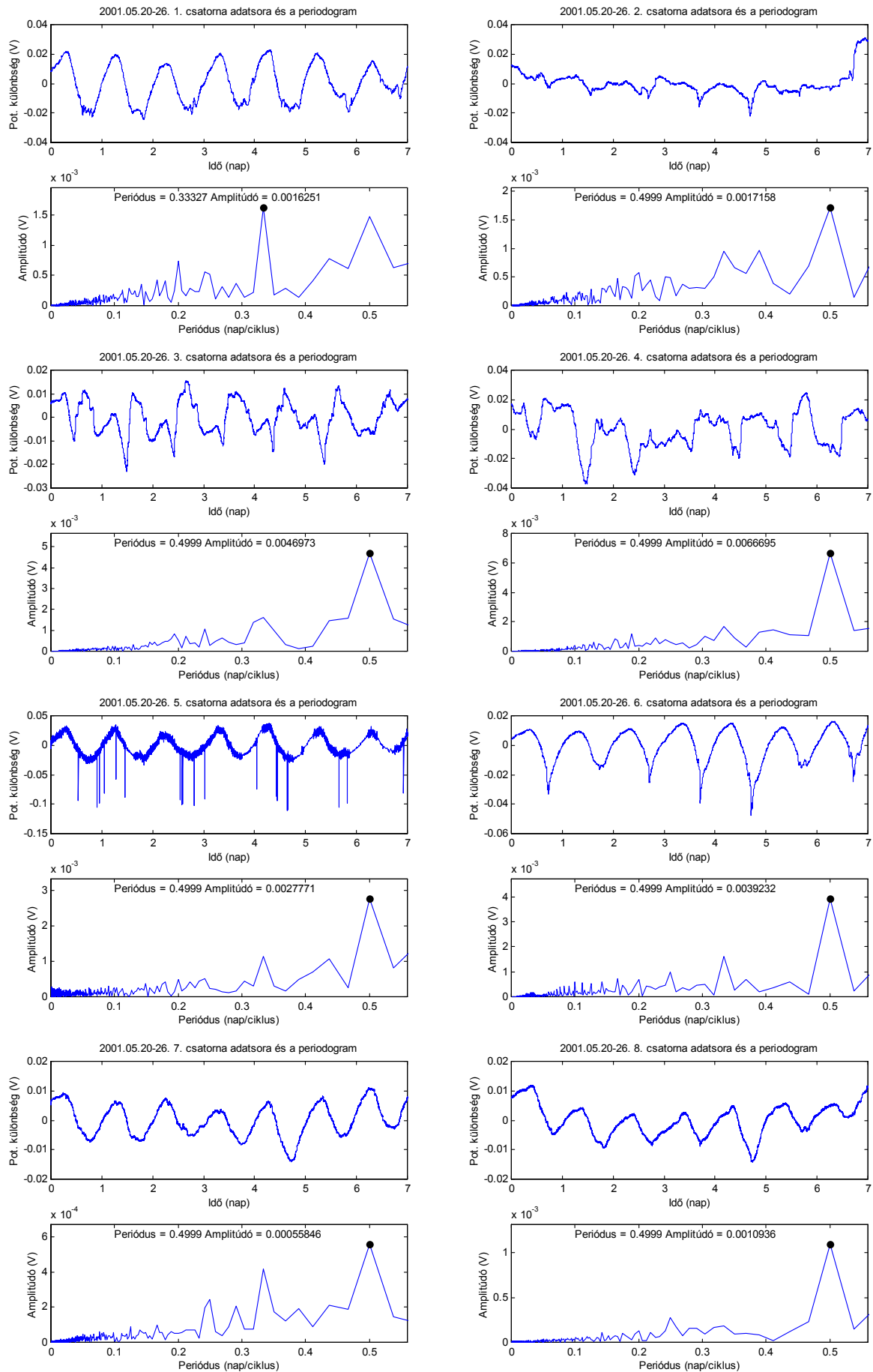
4.2.1.2. A rövidperiódusú változások vizsgálata

Mivel látható volt, hogy a külső eredetű nagyenergiájú változások (csapadék, zivatarok vagy más tényező által okozott szabálytalan, hirtelen elugrások) némely esetben elfedhetik a kisebb amplitúdójú szabályos változásokat, ezért a nagyfrekvenciás változások kimutatásához olyan minta-adatsor kiválasztására törekedtem, amelyek mentesek ezektől a zavaroktól (4.1. táblázat, 8-9. minta). Lehetőség szerint ügyeltem arra, hogy a kiválasztott időtartamokon belül a környezeti paraméterek változása ne legyen extrém. A rövidperiódusú változások vizsgálatát az FFT programmal végeztem, mert a nagyfrekvenciás tartományban részletgazdagabb képet nyújt a konvolúciós szűrő adta spektrumnál.

A kiválasztott zavarmentes időszakokban a 12 órás periódus tisztán látszik, valamennyi csatornán megfigyelhető. A félnapos változás mellett a mindkét minta-adatsoron megfigyelhető egy kb. 8 órás periódus is. Ennek intenzitása némely esetben (8. minta 4. és 6. csatorna, illetve 9. minta 1. csatorna) meghaladja a 12 órás ingadozás mértékét, de általában mintegy fele-negyede a félnapos változásénak (4.11-4.12. ábra).



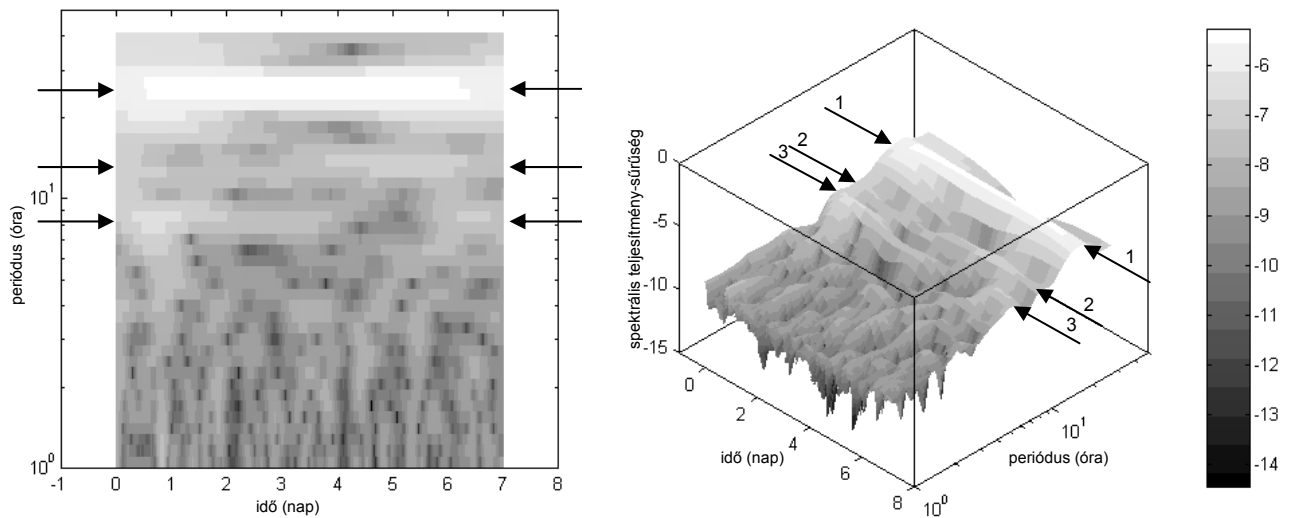
4.11. ábra. 8. minta. 1998.08.07-13. időszakhoz tartozó adatsorok és amplitúdóspektrumok



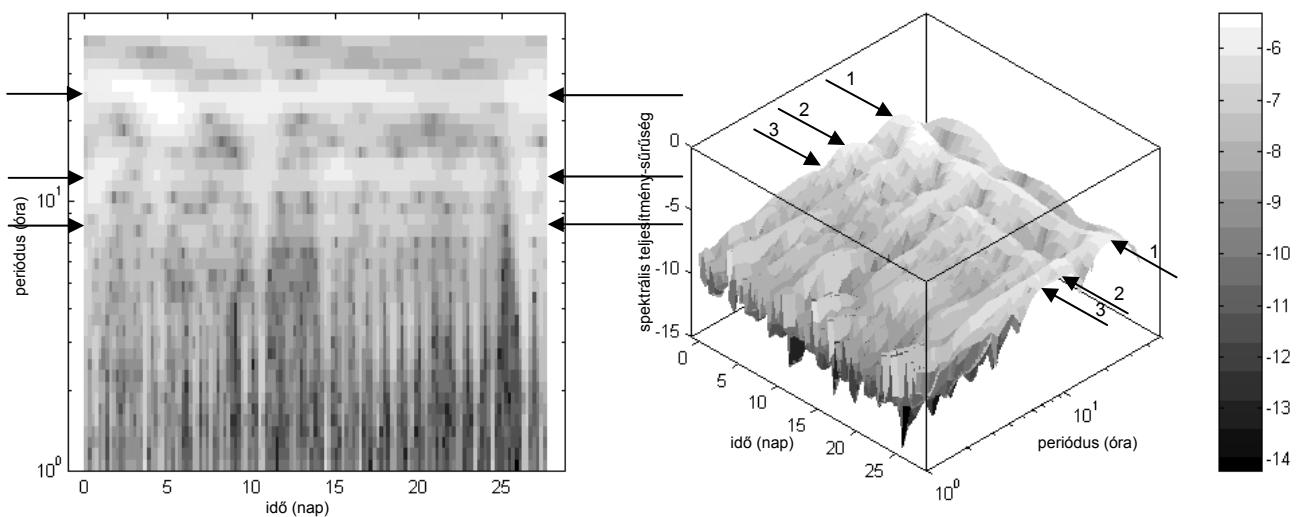
4.12. ábra. 9.minta. 2001.05.20-26. időszakhoz tartozó adata és amplitúdóspektrumok

Az ennél, azaz a 8 óránál kisebb periódustartományban jellegzetes ingadozás nem volt tapasztalható.

A 4.3-4.8. illetve 4.11-4.12. ábrákon bemutatott spektrumok a vizsgált időszakok átlaggörbéit mutatják be. Ezzel kapcsolatban felmerülhet a kérdés, hogy a kimutatott jellegzetes periódusok az egész vizsgált időszakra jellemzők-e, hasonló „energiával” jelennek-e meg, vagy csak egy-egy nagyobb intenzitású jel – mintegy zavarként – tolja-e el az átlagot, s jelenik meg kiugró amplitúddal egy tulajdonképpen nem jellegzetes, tehát a vizsgálatom szempontjából érdektelen periódus? A 24 órás periódus az adatsoron szemmel is látható, de mi a helyzet az alacsonyabb frekvenciájú változásoknál? Indokolt feltenni a kérdést, amikor a csatornák átlagához képest kiugró intenzitással jelentkezik valamelyik periódus, mint például a 8. és 9. minta kiugró 8 órás periódusai esetében.



4.13.a-b. ábra. A 4. csatorna dinamikus spektruma (1998. augusztus 07-13.)
(spektrális teljesítmény-sűrűség = $\frac{1}{2}T \cdot \text{amplitúdó}^2$)



4.14. a-b. ábra. Az 1. csatorna dinamikus spektruma (1998. február)
(spektrális teljesítmény-sűrűség = $\frac{1}{2}T \cdot \text{amplitúdó}^2$)

A kérdés megválaszolásához nagy segítséget nyújt a dinamikus spektrum használata, mely lehetővé teszi az egyes csatornákhöz tartozó spektrumok időbeli változásainak nyomon követését. A 4.13. ábrán a 4. csatorna (1998.08.07-13. közötti időszak) dinamikus spektrumát szemügyre véve látható, hogy az 1.-es nyíllal jelölt 24 órás változás a vizsgált időszak egészében tisztán kivehető. A 2. nyíllal jelölt 12 órás periódus az első 3 napban alacsony intenzitással jelentkezik, a negyedik naptól viszont a nagyobb amplitúdónak köszönhetően szintén jól kivehető. A 3. nyíllal jelölt 8 órás periódus a vizsgált időszak első felében és a 7. napon nagy intenzitású, míg az ötödik és hatodik napon lényegében kimutathatatlan. A 4.14. ábra az 1. minta (1998. február) 1. csatornájához tartozó dinamikus spektrumát mutatja. Mind a 24 órás, mind a 12 és 8 órás – azaz a kérdéses – periódusok jól látszódnak.

A fentiek alapján következtethetünk arra, hogy egy-egy nagy intenzitású impulzus (alapvetően a zavart napokra lehet jellemző) valóban eltolhatja az átlagamplitúdó görbét, azonban a kimutatott 3 jellegzetes periódus – a dinamikus spektrumok tanúsága szerint – valóban létezik az adatsorban.

A rövid- ill. közepes és hosszúperiódusú változások vizsgálata tehát a következő eredményekre vezetett:

- a legmarkánsabb változás a néhány 10 mV nagyságrendű szabályos 24 órás változás;
- kimutatható a félnapos változás, melynek intenzitása harmad- ill. negyedakkora, mint az egynapos változásnak;
- megfigyelhető egy 8 órás periódus, melynek nagysága max. 1-2 mV (a napi változás ötöde-tizede);
- szabályos éves járás mutatható ki a jel alapszintjében nyári minimummal és téli maximummal.

4.2.2. A tapasztalt jelenségek fizikai-biológiai okai:

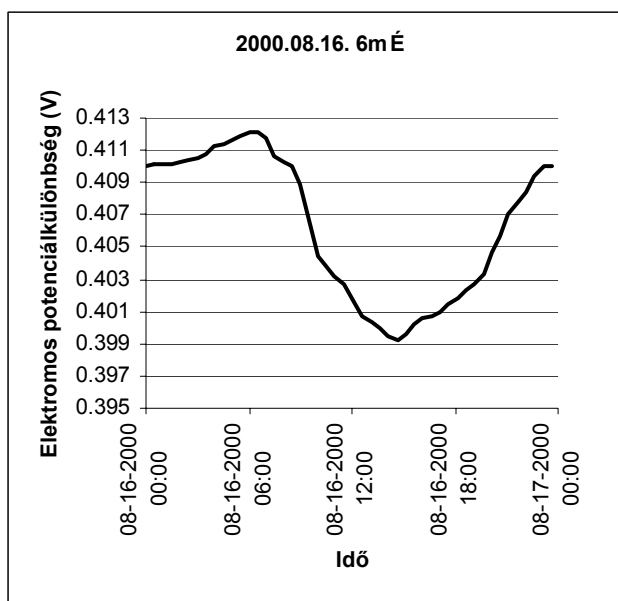
- A 24 órás változás a transzspiráció napi ritmusával függ össze, a 8 és 12 órás periódusok oka egyelőre ismeretlen előttünk.

- A jel alapszintjének éves járásával kapcsolatban (a potenciálkülönbségek jelenségének komplexitásából fakadóan) csak feltételezéseket lehet megfogalmazni. Az egyik lehetséges magyarázat magában, a faanyag elektromos tulajdonságaiban keresendő. Az ismert, hogy a fajlagos ellenállást a hőmérséklet és a nedvességtartalom erősen befolyásolja. A téli időszakokban a hőmérséklet alacsonyabb, míg a fa víztartalma kevesebb, mint a vegetációs időszakban, azaz ekkor elvileg nagyobb a fa fajlagos ellenállása, s ez nagyobb potenciálkülönbségek kialakulásának irányában hat. A vegetációs időszakokon belül ennek pont ellenkezője történik, azaz a földhöz képest csökkennek a potenciálkülönbségek. Aszály miatti nedvvesztés okozhat fajlagos ellenállás növekedést ebben az időszakban is, amit az 1998 nyarán tapasztalható lokális maximum mutat. De nem zárható ki teljesen annak lehetősége sem, hogy a közös földelektrod körüli talaj kiszáradás, vagy elfagyás átmeneti ellenállás növekedést okozhat. Ez szintén a potenciálkülönbség növelése irányában hat (igaz ennek hatását igyekeztünk minimalizálni azzal, hogy az elektródot a fagyhatár alá helyeztük el, s ebben a mélységben a talaj nedvességtartalmának változása, mint ahogy a 6.3.1.5. fejezetben a mérési adatok mutatják, már nem akkora mértékű, mint a talaj felső 50 cm-ében).

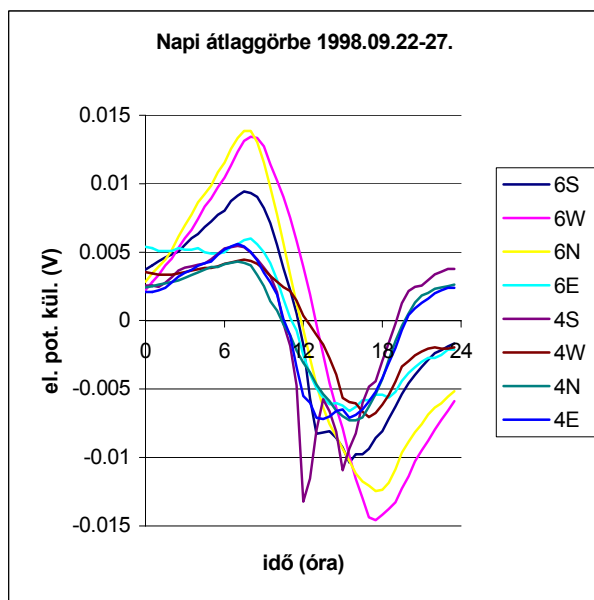
4.3. Az 1 napos változások vizsgálata

Az előbbieken láthattuk, hogy milyen jellegzetes periódusok találhatóak az adatsorban. Ezek közül a legfontosabbnak – a korábbi kísérletünk és a hasonló kísérletekről beszámoló irodalmak alapján – a 24 órás periódusú ingadozást tartom. A következőkben azt vizsgáljuk meg, hogy milyen ezeknek az 1 napos változásoknak a karakterisztikája.

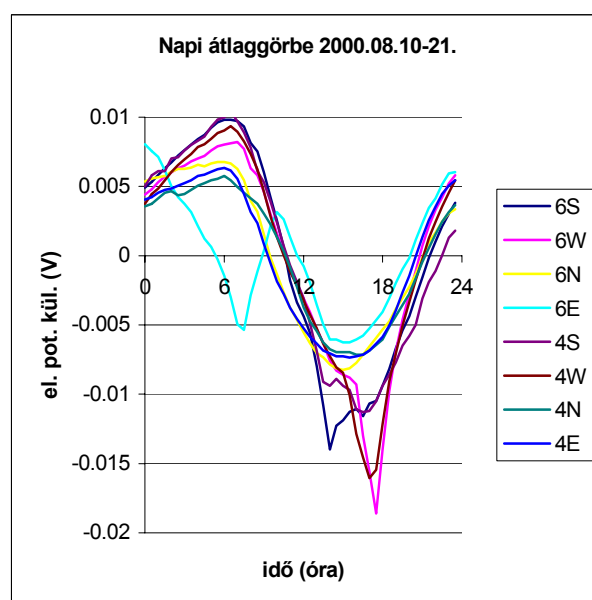
Ha az 4.1. ábrához tartozó adatsorból kivágunk egy napot, s külön is megvizsgáljuk (4.14. ábra), láthatjuk, hogy a napi maximum délelőtt 6 óra tájékán, a napi minimum délután 3 óra közelében jelentkezik.



4.14. ábra. A 6m-es szint északi csatornájának 24 órás adatsora (2000.08.16.)



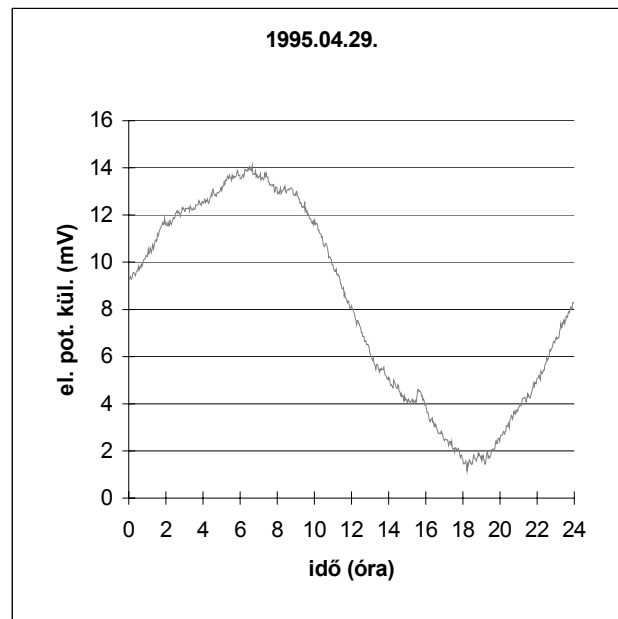
4.15. ábra. Az 1998.09.22-27. időszakhoz tartozó napi átlaggörbék



4.16. ábra. A 2000.08.10-21. időszakhoz tartozó napi átlaggörbék

Ugyanezt a lefutást tapasztaljuk, ha a többi csatornát is megvizsgáljuk. Kiválasztottam két időszakasz mintaregisztrátumát, s ezekre az időszakaszokra elkészítettem a napi átlaggörbékét

úgy, hogy az azonos időpillanathoz tartozó adatokat átlagoltam, majd a kapott vektorokból kivontam az adott időszakra vonatkozó csatornaátlagot (4.15-4.16. ábra). Az ábrákon a délelőtti maximumok és a délutáni minimumok valamennyi csatornán tisztán megfigyelhetők.



4.17. ábra. A korábbi saját kísérlet során bükkfán mért elektromos potenciálkülönbség adatsor, 2. csatorna, (1995.04.29.)

Nézzük, hogy ezek a megfigyelések összhangban vannak-e az irodalmi adatokkal, illetve a korábbi kísérlettel. Az 1995-96-os bükkfán (*Fagus sylvatica* L.) elvégzett kísérlet során hasonló napi karakterisztikát tapasztaltam (4.17. ábra), azaz a délelőtti maximum 6 óra táján, a délutáni minimum 16-18 óra között jelentkezett (Koppán, 1996 és Koppán et al., 1999). A Morat és társai által közölt (1994), vadgesztenyefán (*Aesculus hippocastanum* L.) mért elektromos potenciálkülönbség adatsor nyári szakaszában (1992.07.28-08.14.) szintén hasonló lefutást lehet kimutatni. Fensom (1963) három fafajt vizsgált: a fehér/amerikai szil (*Ulmus americana* L.) esetében éjszakai maximumot és déli minimumot talált (azaz a csertőlgjön mérthez képes mintegy negyednapi a fáziseltolás); a *Pinus resinosa* esetében hajnali 4 órás maximumot és déli minimumot regisztrált. A harmadik fafaj, a cukorjuhar (*Acer saccharum* Marsh) vizsgálata során a maximum 4 és 10 óra között, a minimum 16 óra tájékán volt megfigyelhető. Tehát a különböző időpontokban, különböző fafajokon – az *Ulmus americana*-t leszámítva – mért elektromos potenciálkülönbség napi járását illetően nagyjából hasonlóak a tapasztalatok.

Néhány esetben ellentétes fázisú napi járást lehet megfigyelni egyes csatornákon. Ennek kapcsán érdemes megvizsgálni, hogy változik-e és hogyan változik az idővel ezeknek a maximum és a minimum helyeknek a pozíciója? Ha az idő függvényében folyamatosan ábrázoljuk az adatsort, a változások karakterisztikájának nyomon követése nehézkes, körülményes. Ezért módosításokat hajtottam végre egy 200 napos (1998.05.07.-11.20. közötti időszak) adatsoron, amihez a Matlab programrendszer Butterworth IIR (Infinite Impulse Response) szűrőjét használtam fel. A szűrés általános értelemben egy tetszőleges művelet vagy műveletsorozat lehet, mely a bemenetnek nevezett időfüggvényhez egyértelmű képzési utasítással kimeneti időfüggvényt rendel; vagy bemeneti idősorból kimeneti idősor számítását írja elő. A bemenetet az ismert $x(t)$, a bemenetre adott választ az $y(t)$ függvény írja le:

$$y(t) = \sigma[x(t)], \quad (4.3.1.)$$

ahol σ valamilyen lineáris műveletet jelöl. A lineáris rendszer kimenetét felírhatjuk a bemenet és egy súlyfüggvény konvolúciójaként is (Meskó, 1984):

$$y(t) = h(t) * x(t). \quad (4.3.2.)$$

Az $h(t)$ súlyfüggvényt szokás impulzusválasz-függvénynek is nevezni (impulse response). A következő lépésben vegyük a fenti egyenlet Fourier transzformáltját:

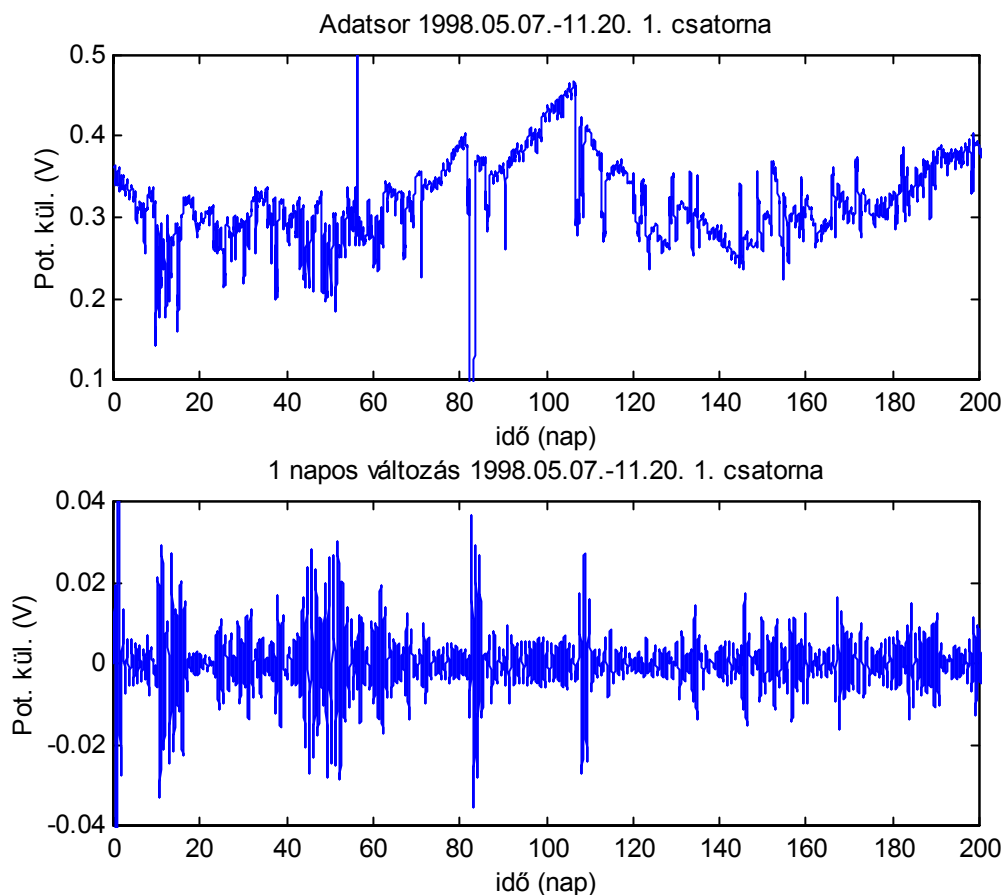
$$Y(f) = H(f)X(f). \quad (4.3.3.)$$

A $H(f)$ -t átviteli függvénynek nevezik. A komplex $H(f)$ modulusa az amplitúdó-karakterisztika ($|H(f)|$).

Az általam használt Butterworth szűrő átviteli függvénye a következő:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + (f/f_c)^{2n}}, \quad (4.3.4.)$$

ahol f_c a vágási frekvencia, mely maximum a mintavételi frekvencia fele lehet. A feldolgozás során a fokszámot 4-nek választottam. A Butterworth szűrő előnye, hogy már ilyen fokszám mellett is gyors a felfutása; az áteresztő sávban nincs a más szűrőkre (pl. Chebyshev szűrő) esetlegesen jellemző átvitel-ingadozás, valamint a felfutási „túllövése” (az eredeti amplitúdónál nagyobbat ad vissza) is kisebb mértékű, mint a Chebyshev szűrőnél.

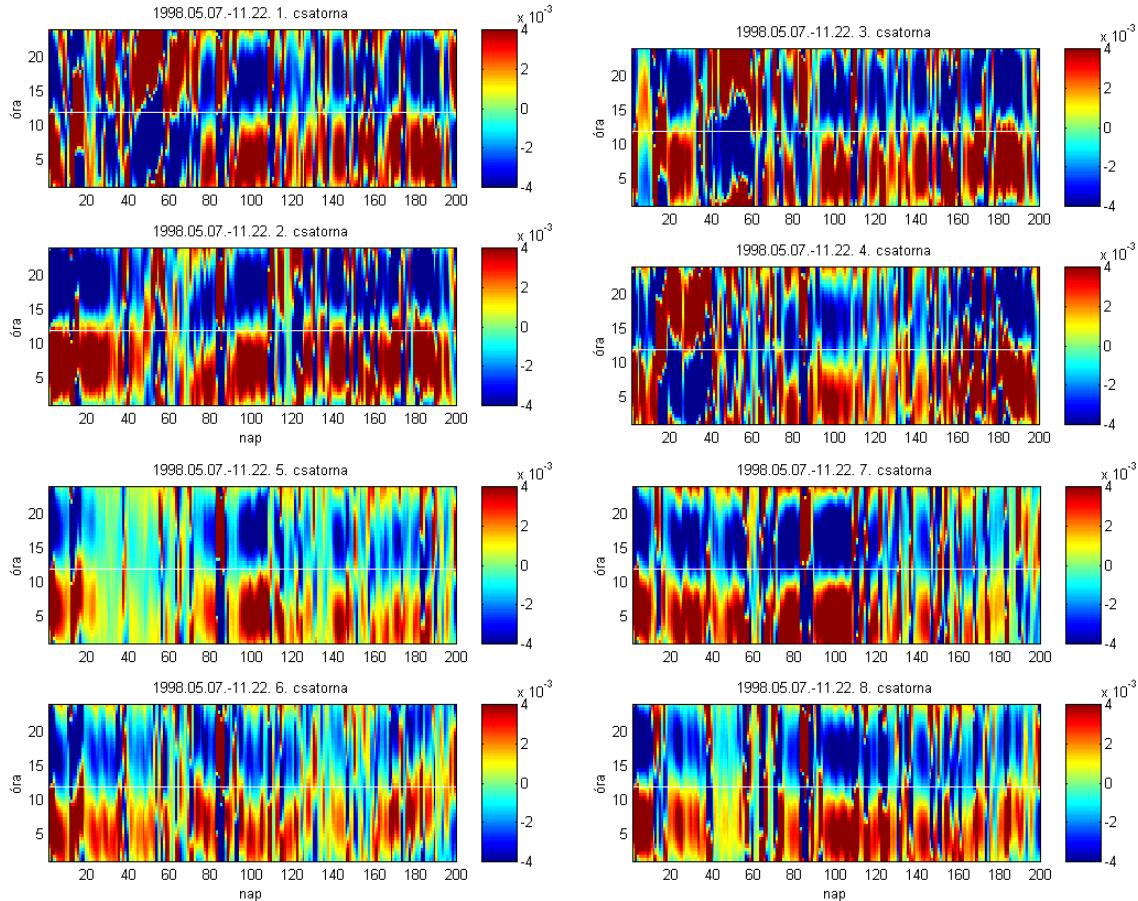


4.18.a-b. ábra. Az 1. csatorna (6S) adatsora (1998.05.07.-11.20.) és a Butterworth szűrővel leválasztott 1 napos változások

Az adatsor módosításához első lépésben a Butterworth szűrő segítségével leválasztottam az 1 napos változásokat az adatsorról (4.18.a-b. ábra). A 30 perces digitális közű adatsoron alkalmazott szűrés frekvencia sávszélessége: $1.11 \cdot 10^{-5} - 1.21 \cdot 10^{-5}$ Hz volt, azaz a 25 óra és 23 óra közötti tartomány. Az 1 napos változásokat tartalmazó adatsor legelején megfigyelhető

a Butterworth szűrő túllövéséből adódó kiugró amplitúdók (>40 mV), amelyek azonban az értékelést lényegében nem befolyásolják.

A következő lépésben, a kapott, lényegében csak 1 napos változásokat tartalmazó vektort olyan mátrixszá alakítottam, amelynek oszlopvektorai 1-1 nap adatsorát tartalmazzák, így az egy időpillanathoz tartozó adatok egy sorvektorba kerültek, majd ezt a mátrixot ábrázoltam



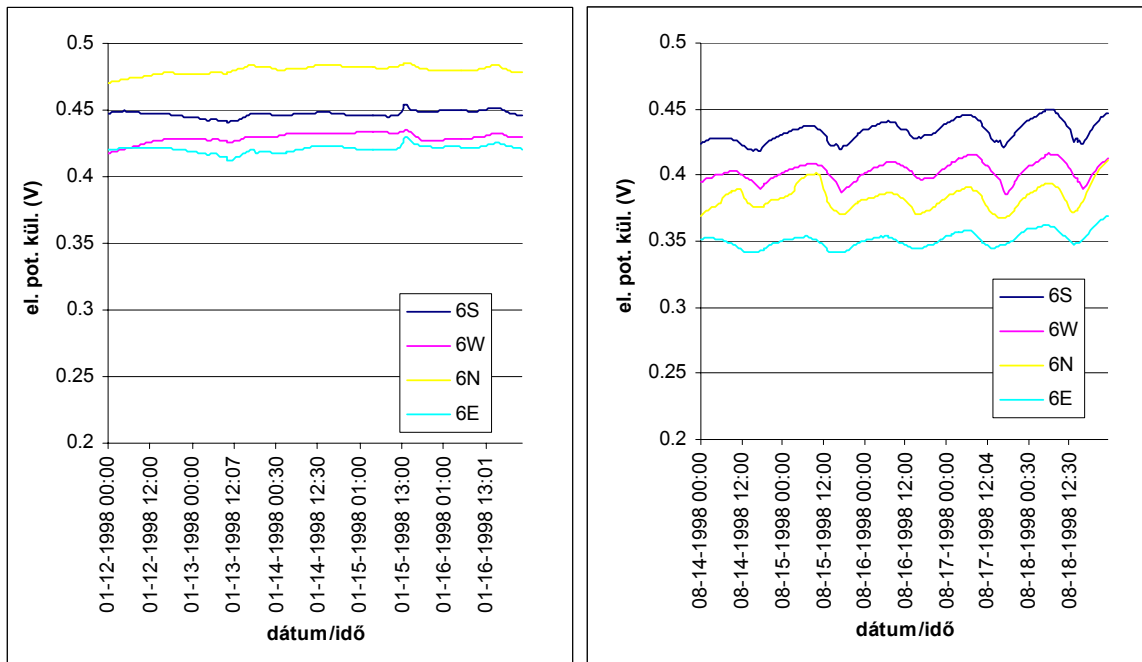
4.19. ábra. Az 1998.05.07.-11.20. közötti időszak 1 napos változásai az első nyolc csatornán

(4.19. ábra). Az egyes csatornákhöz tartozó ábrákon jól látszik, hogy bár a délelőtti maximumok (a „forró” területek) és a délutáni minimumok (a „hideg” területek) a dominánsak a vizsgált tartományban, azonban néhány esetben az ellentétes fázis a jellemző. Alapvetően kétféle ellentétes fázisú esemény különíthető el. Az első, amikor a fázisátfordulás több hetes időszakra jellemző, vagyis tendenciózus. Az 1. csatornán (6S) kb. a 25. naptól csaknem ötven napon keresztül ellentétes fázisú a napi változás. Hasonló átfordulás figyelhető meg a 3. csatornán (6N) ugyanebben az időszakban. A 4. csatornán (6E) a 20. és a 40. nap között jelentkezett ellentétes fázis.

A második esetben a fázisátfordulás rövidebb, maximum egy-két nap időtartamú. Ez az esemény valamennyi csatornán kimutatható. Ha az ilyen fázisváltásokat összevetjük az 1. csatorna adatsorával (4.18. ábra), látható, hogy ezekhez az időpontokhoz legtöbbször zivatarok okozta hirtelen változások – gyors elugrások, amelyek a szűrt amplitúdóban kiemelkedő értékkel jelennek meg – tartoznak (pl. a 83-85. nap). A zavart okozó esemény elmúltával a fázis visszaáll.

4.3.1. Az 1 napos járás évszakos változása

A 4.18.b. ábra szerint az 1 napos járás amplitúdójának változása a vizsgált 200 napos időszakon belül is jelentős (4-5mV-től 20-25mV-ig változik), még abban az esetben is, ha az előző bekezdésben említett zavarok okozta amplitúdó kiugrásoktól eltekintünk. Még szembetűnőbb a különbség, ha például egy vegetációs időszakon belüli (4.20.a. ábra) és egy azon kívüli (4.21.b. ábra) időszak adatsorát hasonlítjuk össze: a téli időszakra jellemző napi



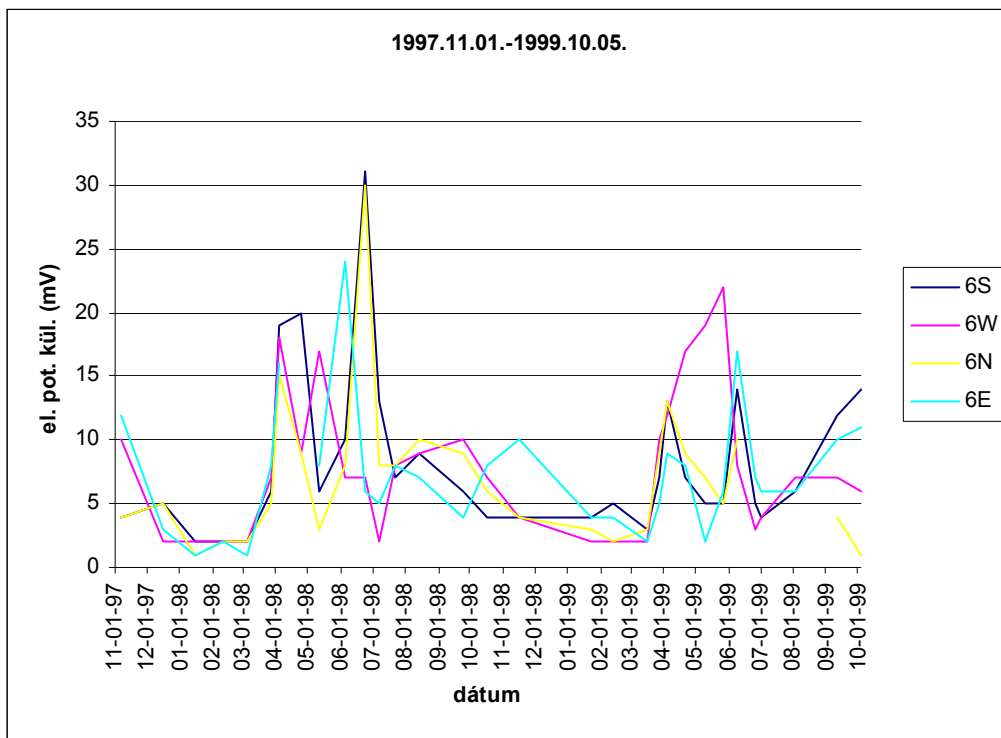
4.20. ábra. Az 1-4. csatorna (6m-es szint) adatsorai:
a. 1998.01.12-16.; b. 1998.08.14-18.

járási amplitúdója jelentősen elmarad a nyári időszakban tapasztalhatóétól. Ez alapján érdemes tovább bővíteni a vizsgálat körét, s megvizsgálni, hogyan változik az 1 napos járási amplitúdója az évszakok során (Koppán et al., 2000b).

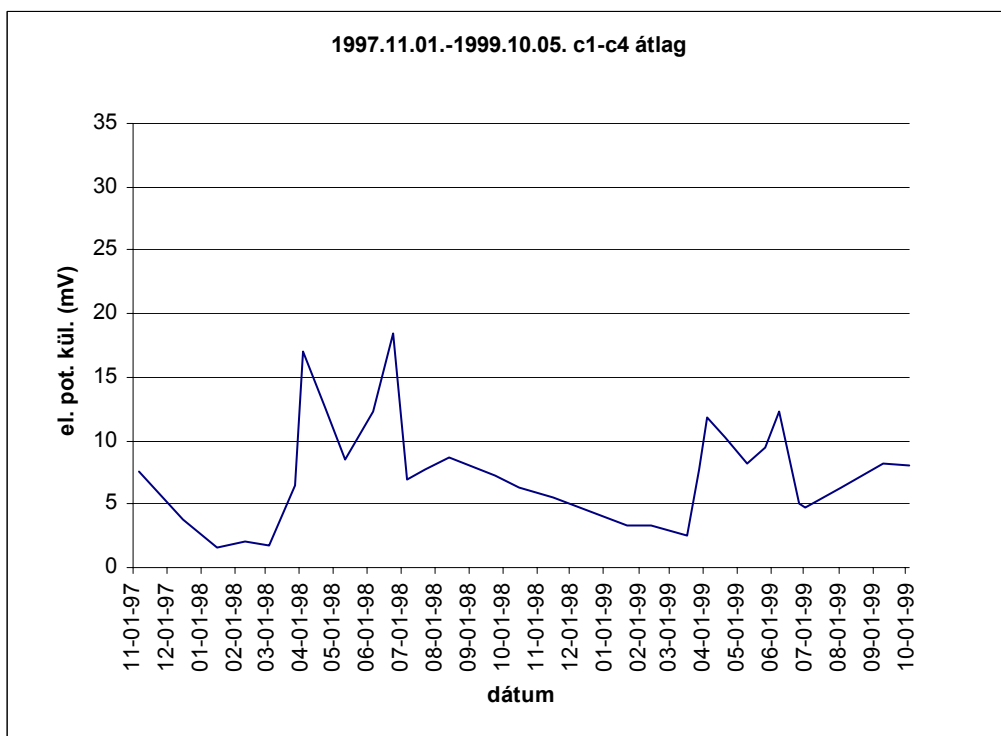
1997.	11.01-12.	1998.	11.13-19.
	12.13-19.		12.23-31.
1998.	01.06-20.	1999.	01.18-25.
	02.01-28.		02.10-15.
	03.01-07.		03.12-21.
	03.24-31.		03.26-31.
	04.01-08.		04.01-07.
	05.07-15.		04.18-21.
	05.23-31.		05.07-13.
	06.01-10.		05.22-31.
	06.18-30.		06.06-10.
	07.01-13.		06.24-28.
	07.18-27.		07.01-03.
08.07-20.	08.01-06.		
09.21-27.	09.07-12.		
10.14-18.	10.01-05.		

4.3. táblázat. Az 1 napos ingadozások amplitúdójában bekövetkező változások meghatározásához kiválasztott időszakok

A vizsgálathoz az I. és II. kísérleti szakasz 2 éves mérési adatsorából vettem mintákat (4.3. táblázat). Az első minta kezdő és az utolsó minta záró dátuma közötti 704 napból 279-et vettem be a vizsgálatba, azaz az adatmennyiség 39,6%-át. Figyelembe véve a zivatar és a



4.21. ábra. Az 1 napos járás amplitúdójának éves változása az 1-4. csatornákon (1997.11.01.-1999.10.05.)



4.22. ábra. Az 1-4. csatornához tartozó amplitúdók átlaga (1997.11.01.-1999.10.05.)

csapadék korábban említett átlagamplitúdó-torzító hatását, a vizsgálatba csak azokat az időszakokat vettem be, ahol az impulzusszerű elugrások, sönt ill. egyéb zavaró hatások a karakterisztikus napi járást nem nyomták el. A kiválasztott 32 minta mindegyikére meghatároztam az egyes csatornáknak a minta időtartamára jellemző átlagamplitúdóját. A 4.21. ábra a 6 m-es szint csatornáinak átlagamplitúdóit mutatja be. Általánosságban megállapítható, hogy a maximumok a tavasz második felére, és a nyár első felére, azaz április és július közé esnek, míg a minimumok a téli, kora tavaszi időszakokban (decembertől márciusig) figyelhetők meg. Az egyes csatornákat külön-külön tekintve elmondható, hogy a vegetációs időszakon kívül, a nyugalmi periódusban a csatornák nagyjából hasonló képet mutatnak: az átlagamplitúdók ebben az időszakban 5 mV alatt maradtak. A nyugalmi periódust követő tavaszi felfutás mind a négy csatornán, mind a két egymást követő évben egyformán jelentkezett. E felfutások után azonban, a csatornák viselkedése eltérő volt. 1998. tavaszán mindegyik csatornán megjelent egy második csúcs, azonban egymáshoz képest fáziseltolással: a nyugati csatornán május közepén, a keleti csatornán június elején, míg a déli és északi csatornákon június végén (ugyanekkor a nyugati és keleti csatornának már lokális minimuma van). A következő évben a déli, északi és keleti csatornán a második csúcs egyszerre jelentkezett, míg a nyugati csatornán csak egy csúcs figyelhető meg, a májusi lokális minimum elmaradt.

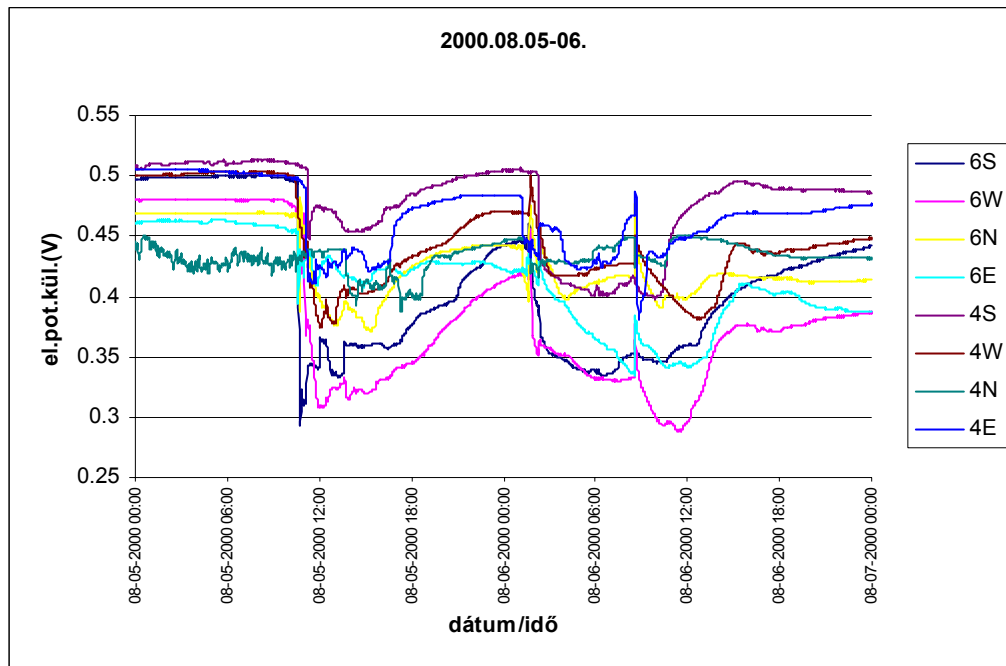
Ha a négy csatorna átlagát vesszük szemügyre (4.22. ábra), a maximumok és minimumok tekintetében egyértelműbb képet kapunk. A tavaszi – nyár eleji kettős csúcsok világosan kirajzolódnak. Az első csúcs április elejére, míg a második június közepére-végre esik a vizsgálat mindkét éve alatt. Az egyes csatornák fáziseltolódása miatt az átlaggörbén a tavaszi és nyári csúcsok hasonló nagysággal jelentkeznek, pedig a 4.21. ábra tanúsága szerint, a második csúcsokhoz tartozó átlagamplitúdó értékek körülbelül másfélszer nagyobbak (1998: $\approx 25-30$ mV; 1999: 15 mV), mint az első (tavaszi) csúcsok értékei (1998: $\approx 15-20$ mV; 1999: ≈ 10 mV). Azt viszont az átlaggörbe is jól mutatja, hogy az 1999-es maximumok kb. harmadával kisebbek az előző éviéknél.

Az irodalmi adatokkal való összehasonlítás kedvéért érdemes megjegyezni, hogy a napi potenciálkülönbségek éves változását Fensom is vizsgálta a kísérletei során (1963). Azt tapasztalta, hogy a maximális napi változások – a fafajtól és az adott szezonra jellemző hőmérséklettől függően – április végén, májusban, a hajtások maximális növekedése idején jelentkeztek. A maximális napi változásokat általában egy sokkal kisebb amplitúdóval jellemezhető nyári időszak követte, majd egy augusztus végi szeptember eleji átmeneti amplitúdó-növekedés. Ezt, a második csúcs utáni júliusi visszaesést követő kisebb (≈ 10 mV), nyár végi, ősz eleji lokális maximumot a 4.21. és 4.22. ábrán is fel lehet fedezni.

Az 1 nap periódusú változások vizsgálatából a következők szűrhetők le:

- az elektromos potenciálkülönbségek maximuma egy napon belül délelőtt 6-7 óra táján van, minimuma délután 16-18 óra körül;
- az 1 napos változás amplitúdójának éves járása van: a vegetációs időszak elején kettős maximuma van (az első a cser rügyfakadásának, kilombosodásának idejére, a második pedig a maximális transzspiráció idejére esik), a vegetációs időszakon kívül pedig minimuma.

4.4. Tranziensváltozások az elektromos potenciálkülönbség adatsorban



4.23. ábra. 2000.08.05-06. közötti elektromos potenciálkülönbség adatsor

Az adatsor vizsgálata során számos alkalommal kellett szembesülni azzal a jelenséggel, hogy a potenciálkülönbség járása jelentősen eltér az előző alfejezetekben ismertett karakterisztikus járástól (mint például a 4.23. ábrán a 2000.08.05. délelőttjétől kezdődő szakasz esetében). Ezeknek az eltéréseknek a jellege szabálytalan, és sokszor nem egyformán jelentkeznek az egyes csatornákon.

A változások időtartama néhány perctől néhány napig terjedhet, míg az amplitúdójuk szintén változatos: a millivoltos nagyságrendtől a több tizedvoltage nagyságrendig változhat (azaz a napi amplitúdó többszöröse is lehet esetenként). A változás gyorsaságára jellemző, hogy 1 perc (azaz 1 mintavételi köz) alatt akár 50 mV-ot is változhat az elektromos potenciálkülönbség (53.5 mV a 6S csatorna változása, 2000.08.05. 10:44).

Ezek a változások valamely külső eredetű (leggyakrabban a zivatartevékenységgel összefüggő) hatás eredményeképpen jönnek létre, és a jelenséget kiváltó ok megszűntével, némi relaxációs időt követően, az elektromos potenciálkülönbségek helyreállnak (a zivatartevékenység hatásáról a 6.3.1.5. fejezetben még lesz szó). Ezeket az eltéréseket a vizsgálat szempontjából zajnak tekintettem, és igyekeztem a további elemzésekből az ilyen szakaszokat kiküszöbölni.

4.5. Az egyes csatornák összehasonlítása

Az előző alfejezetekben a potenciálkülönbség adatsor jellegzetességeit, az idősor változásainak szabályszerűségeit vizsgáltam. A csatornákat összességükben szemléltem, azzal az alapvető céllal, hogy a tipikus viselkedést meghatározzam.

A következőkben azt vizsgálom, hogy az egyes csatornák mennyiben térnek el egymástól, jelentős mértékű-e ez az eltérés, valamint, hogy az egymástól való eltérésekben felfedezhető-e valamiféle szabályszerűség? A vizsgálat arra a kérdésre is keresi a választ, hogy pusztán az elektródok helyzete (magasság, kitettség), egyelőre más tényezőktől függetlenül, mennyiben befolyásolja az elektromos potenciálkülönbséget. Lényegében ez az ok, amiért a többcsatornás mérést a 3. fejezetben ismertetett elrendezésben valósítottuk meg.

Annak meghatározásához, hogy a 16 csatorna mennyiben tér el egymástól, kétféle összehasonlító vizsgálatot végeztem el négy darab többhónapos mintaregisztrátumon (4.4.táblázat), amelyek csaknem a teljes II. és IV. kísérleti időszakot lefedik.

Kísérleti szakasz	Mintaszám	Dátum
II.	1.	1998.05.07.-11.21.
	2.	1999.01.16.-05.31.
IV.	3.	2000.07.15.-12.31.
	4.	2001.01.01.-05.16.

4.4.táblázat. Az elemzésre kiválasztott időszakok

Elsőként meghatároztam az egyes csatornák közötti Pearson-féle lineáris korrelációs együtthatót (4.5-4.8. táblázat) az alábbiak alapján, hogy a csatornák közötti kapcsolatok szorosságát megvizsgáljam (Horvai szerk., 2001 nyomán):

$$\text{a kovariancia} \quad \text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (4.5.1)$$

$$\text{a korreláció szorossága} \quad \rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (4.5.2)$$

$$\text{ahol a szórások} \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{ill.} \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (4.5.3)$$

A következő lépésben pedig hierarchikus cluster-analízist végeztem az SPSS programmal, hogy a 16 csatorna kapcsolatrendszerét feltárjam. A cluster-analízis a teljes mintából kiindulva, a megfigyelt tulajdonságok értékei alapján próbálja az egyes objektumokat csoportokba rendezni (Horvai szerk., 2001). A csoportképzés alapja az N darab objektum elhelyezkedése az M-dimenziós térben, ahol a pontok egymáshoz való helyzetét a távolságukkal is lehet jellemezni. A clusterezés során leggyakrabban az euklideszi távolságot használják, s a vizsgálat során én is ezt vettem mérőszámnak:

$$ED_{i,j} = \left[\sum_{m=1}^M w_m (x_{i,m} - x_{j,m})^2 \right]^{1/2}, \quad (4.5.4)$$

ahol w_m (súlytényező) pozitív valós szám. A vektorváltozók páronkénti távolságértékei adják a távolságmátrixot. A hierarchikus csoportelemző eljárások kikeresik az $N \times N$ -es távolságmátrix legkisebb elemét, azaz a $d_{q,p}$ távolságot. Ez azt jelenti, hogy a q és p objektum van egymáshoz legközelebb, ők a leghasonlóbbak az adott mintában. A továbbiakban a q és p objektumot egyetlen p^* objektumnak tekintik, majd új $(N-1) \times (N-1)$ -es távolságmátrixot készítenek úgy, hogy a többi objektum a p^* objektumtól való távolságát a q és p elemektől

való távolság átlagaként állítják elő. A távolságok számításával párhuzamosan az algoritmusok elkezdik a dendrogramok készítését úgy, hogy a q és p objektumokat $d_{q,p}$ szinten (az abszcisszától $d_{q,p}$ távolságra) egymáshoz kapcsolják. Az eljárás a p^* objektumhoz legközelebbi pont [legkisebb d_{q,p^*} az új, $(N-1) \times (N-1)$ -es távolságmátrixban] kikeresésével és a csoportokba való bevonásával folytatódik egészen addig, amíg el nem fogynak az objektumok. A csoportok képzése a többszintű módszerekben összevonó, azaz az eljárás lépésekben csökkenti a csoportok számát úgy, hogy induláskor minden elemet külön csoportnak tekint, és az egyes lépésekben azt a két objektumot vonja össze, amelyek a legközelebb vannak egymáshoz. A hierarchikus cluster-analízis során kapott dendrogramokat a 4.24-4.27. ábrák mutatják be. A táblázatok és dendrogramok értékelésénél figyelembe kell venni, hogy a vizsgálatokat az eredeti, módosítatlan adatsorokon végeztem, tehát a zavaró hatások, tranziens változások (melyek esetenként eltérő mértékben jelentkeztek az egyes csatornákon) az adatsorban maradtak, s ez a kapcsolatok szorosságának gyengítése irányába hathat. Az adatok számának növelésével, azaz kellően hosszú adatsorok alkalmazásával ez a gyengítő hatás csökkenthető, azonban a korrelációs koefficiensekben ilyenkor a csatornák alapjelének változása (trend-hatás) jobban érvényesül, mint a napi periodicitás.

Az 1. minta esetében a 6 méteres szinten belül mindegyik csatornára 0.55-nél nagyobb a korrelációs együttható értéke. A többi csatornával összehasonlítva azonban a 6 m-es szint csatornái gyengébb kapcsolatot mutatnak (< 0.6). A 4 m-es szinten belül a 4S, 4W és 4E csatornáknak egymással erős a kapcsolatuk (> 0.7), kivéve a 4N-t. A szint csatornái a 2 és 0 m-es szint csatornáival vagy nincsenek kapcsolatban, vagy negatív korrelációban vannak. A 2 és 0 m-es szint csatornái jól korrelálnak egymással, kivéve a 0S-t. Az 1. minta cluster-analízis dendrogramja szerint a 4 m-es szint csatornái határozottan elkülönülnek a többi csatornától (különösen a 4N eltérő). A 6, 2 és 0 m-es szintek csatornái viszont hasonló képet mutatnak.

A 2. mintában a 6 m-es szint csatornái egymással jól korrelálnak (> 0.87), valamint a 2 és 0 m-es szint csatornáival is lineáris a kapcsolatuk (a 2 m-es szint csatornáival erősebb, a 0 m-es szint csatornáival gyengébb). A 4 m-es szint csatornái közül azonban csak a 4E-val szoros a kapcsolat ($0.78 - 0.89$). A 4 m-es szint csatornái között nincs lineáris összefüggés (< 0.46). A 4W és 4N csatornák esetében egyetlen más csatornával sem mutatható ki korreláció. A 4E-nek – a 6 m-es szint csatornáin kívül – a 2 m-es szint csatornáival is erős a kapcsolata. Gyenge korreláció van a 4S és a 2m-es szint csatornái között ($0.6 - 0.72$). A 2 és 0 m-es szintek csatornáit tekintve szinteken belül erős (kivéve a 0W), míg a két szint csatornái között jó a korreláció. A dendrogramon jól látható a 4S, 4W és 4N csatornák eltérése a többi csatornától, valamint az, hogy a 6, 2 és 0 m-es szintek csatornái nagyon közel vannak egymáshoz (egyedül a 0W tér el a többitől), azaz nagyon hasonlóak.

A 3. mintára vonatkozó korrelációs együtthatókat vizsgálva, azt tapasztaljuk, hogy az egyes szinteken belül is és a szintek között is erős a korreláció a csatornák között, csupán két csatorna tér el jelentősen: a 6W és a 2E. A dendrogram hasonló képet mutat, azzal a finomítással, hogy az euklideszi távolságok alapján a 6W és 2E csatornákon kívül a 6N, 6E és 4S csatornák csoportja is elkülönül a többi a csatornától.

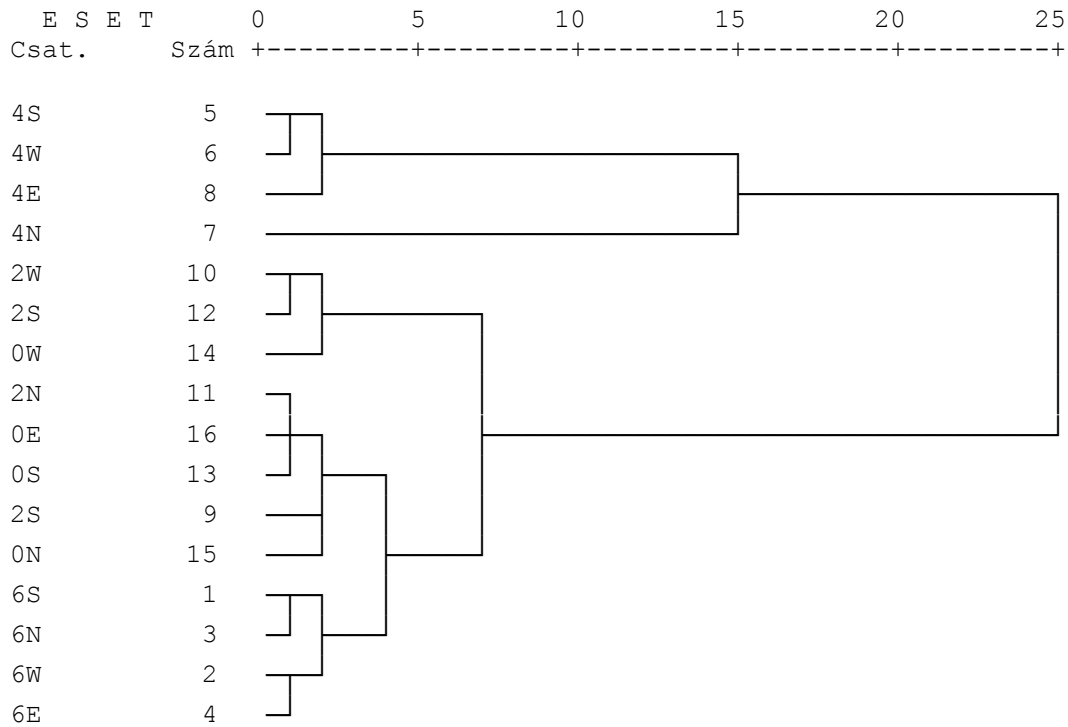
A 4. mintánál a 6 és 4 m-es szinteken belül és szintek csatornái között is határozott kapcsolat figyelhető meg. Szintén jó a korreláció a 4 m-es szint és a 0 m-es szint 0S, 0W és 0N csatornái között. A 2 m-es szinten belül gyenge ill. közepes a kapcsolat, míg a 0 m-es szinten a 0E nagyon eltér a többitől. A 2W, 2N, 2E és a 0S, 0W, 0N csatornák között közepes a korreláció. A minta dendrogramján határozottan elkülönül két csoport: az egyik csoportot főként a nyugati csatornák, a másikat főként a déli csatornák jellemzik. A 6m-es szint északi és keleti csatornái jóllehet a második csoporthoz tartozó csatornákhöz állnak közel, mégis eltérnek azoktól.

	6S	6W	6N	6E	4S	4W	4N	4E	2S	2W	2N	2E	0S	0W	0N	0E
6S	1.000															
6W	0.843	1.000														
6N	0.721	0.679	1.000													
6E	0.748	0.698	0.555	1.000												
4S	0.369	0.386	0.425	0.266	1.000											
4W	0.080	0.093	0.252	0.089	0.871	1.000										
4N	0.575	0.506	0.366	0.457	0.648	0.375	1.000									
4E	0.254	0.314	0.310	0.381	0.812	0.740	0.566	1.000								
2S	0.508	0.395	0.358	0.250	-0.734	-0.720	-0.094	-0.767	1.000							
2W	0.123	0.109	0.318	-0.118	-0.580	-0.406	-0.662	-0.696	0.699	1.000						
2N	0.235	0.131	0.336	-0.098	-0.482	-0.454	-0.255	-0.575	0.589	0.661	1.000					
2E	0.225	0.256	0.349	-0.026	-0.537	-0.472	-0.400	-0.611	0.651	0.826	0.602	1.000				
0S	0.558	0.521	0.324	0.353	-0.399	-0.690	0.497	-0.249	0.469	0.096	0.364	0.376	1.000			
0W	0.235	0.207	0.443	0.119	-0.439	-0.356	-0.517	-0.425	0.573	0.800	0.722	0.740	0.282	1.000		
0N	0.398	0.292	0.287	0.101	-0.703	-0.760	0.007	-0.693	0.771	0.602	0.731	0.701	0.691	0.624	1.000	
0E	0.331	0.270	0.322	0.099	-0.523	-0.538	-0.083	-0.577	0.676	0.629	0.692	0.757	0.640	0.710	0.823	1.000

4.5.táblázat. A 16 csatorna 1998.05.07.-11.21. közötti időszakra vonatkozó Pearson féle korrelációs koefficiensei

* * * * * H I E R A R C H I K U S C L U S T E R A N A L Í Z I S * * *

Dendrogram a csoportok közötti átlagos kapcsolat alapján
Mérőszám: euklideszi távolság



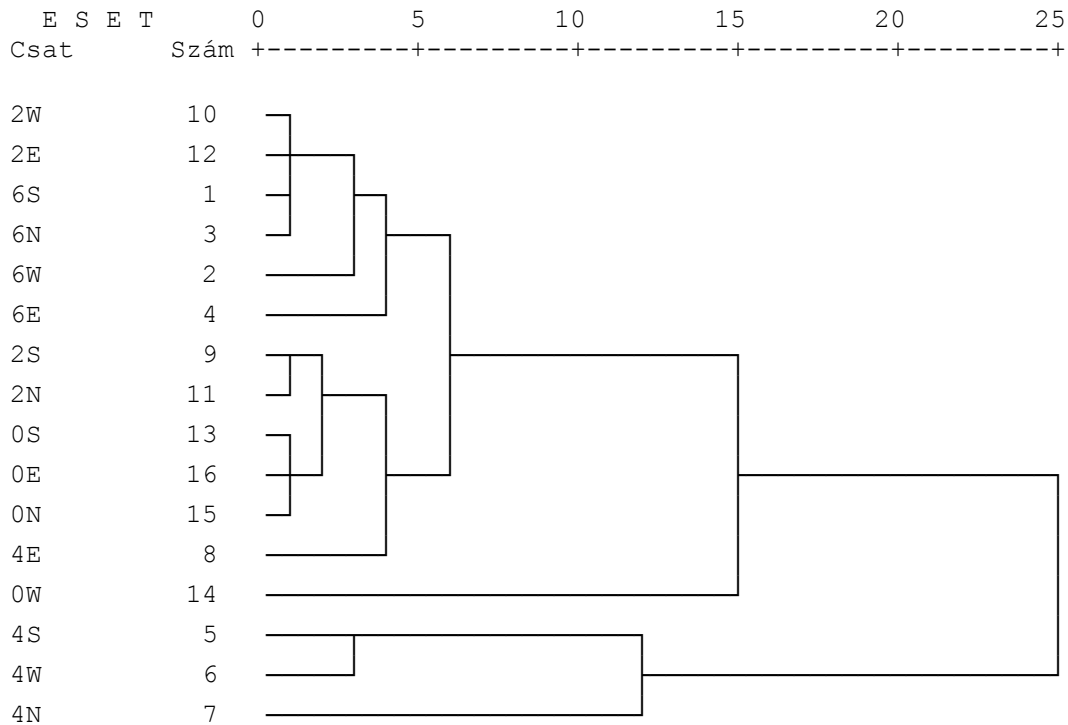
4.24. ábra. Az 1998.05.07.-11.21. időszakra vonatkozó hierarchikus cluster-analízis dendrogramja

	6S	6W	6N	6E	4S	4W	4N	4E	2S	2W	2N	2E	0S	0W	0N	0E
6S	1.000															
6W	0.923	1.000														
6N	0.941	0.890	1.000													
6E	0.953	0.891	0.877	1.000												
4S	0.561	0.564	0.631	0.437	1.000											
4W	0.207	0.238	0.135	0.184	0.386	1.000										
4N	-0.076	-0.241	0.041	-0.054	0.025	-0.189	1.000									
4E	0.862	0.893	0.782	0.828	0.462	0.442	-0.340	1.000								
2S	0.926	0.899	0.930	0.839	0.728	0.248	-0.101	0.806	1.000							
2W	0.956	0.939	0.941	0.886	0.638	0.266	-0.149	0.883	0.962	1.000						
2N	0.817	0.787	0.881	0.732	0.765	0.210	0.084	0.675	0.892	0.868	1.000					
2E	0.938	0.917	0.911	0.898	0.604	0.247	-0.110	0.841	0.931	0.958	0.863	1.000				
0S	0.819	0.760	0.834	0.783	0.473	-0.139	0.090	0.624	0.766	0.795	0.724	0.817	1.000			
0W	0.849	0.872	0.828	0.842	0.269	0.088	-0.111	0.824	0.762	0.841	0.629	0.830	0.769	1.000		
0N	0.682	0.602	0.741	0.680	0.380	-0.250	0.332	0.423	0.620	0.636	0.664	0.676	0.875	0.675	1.000	
0E	0.684	0.633	0.737	0.683	0.512	-0.106	0.256	0.494	0.676	0.689	0.746	0.709	0.807	0.598	0.878	1.000

4.6. táblázat. A 16 csatorna 1999.01.16.-05.31. közötti időszakra vonatkozó Pearson féle korrelációs koefficiensei

* * * * * H I E R A R C H I K U S C L U S T E R A N A L Í Z I S * * *

Dendrogram a csoportok közötti átlagos kapcsolat alapján
Mérőszám: euklideszi távolság



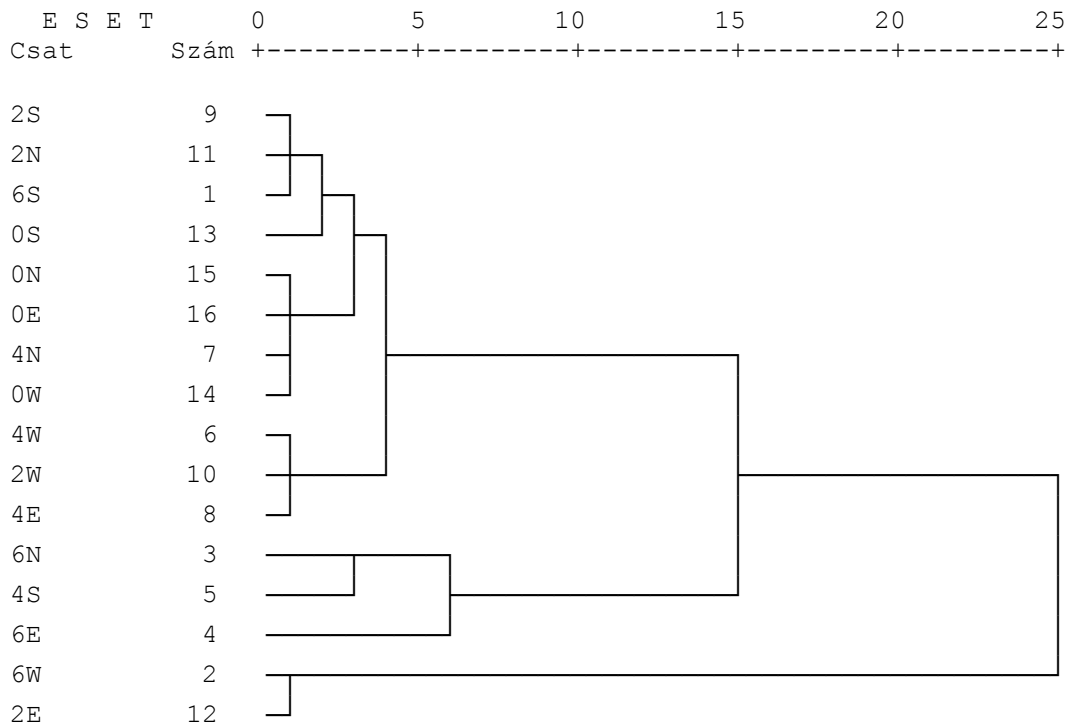
4.25. ábra. Az 1999.01.16.-05.31. időszakra vonatkozó hierarchikus cluster-analízis dendrogramja

	6S	6W	6N	6E	4S	4W	4N	4E	2S	2W	2N	2E	0S	0W	0N	0E
6S	1.000															
6W	0.139	1.000														
6N	0.789	-0.224	1.000													
6E	0.680	-0.372	0.919	1.000												
4S	0.847	-0.103	0.902	0.848	1.000											
4W	0.822	0.333	0.661	0.525	0.695	1.000										
4N	0.733	-0.092	0.867	0.785	0.857	0.659	1.000									
4E	0.907	0.163	0.792	0.654	0.853	0.891	0.783	1.000								
2S	0.869	0.067	0.822	0.744	0.906	0.810	0.809	0.905	1.000							
2W	0.811	0.353	0.657	0.523	0.736	0.866	0.648	0.855	0.842	1.000						
2N	0.915	0.059	0.859	0.755	0.909	0.828	0.834	0.949	0.935	0.842	1.000					
2E	-0.157	0.785	-0.422	-0.525	-0.304	0.036	-0.292	-0.125	-0.150	0.165	-0.189	1.000				
0S	0.902	0.069	0.825	0.750	0.899	0.820	0.795	0.912	0.920	0.821	0.926	-0.189	1.000			
0W	0.471	0.034	0.710	0.613	0.609	0.541	0.652	0.516	0.566	0.627	0.578	-0.007	0.596	1.000		
0N	0.652	0.216	0.674	0.595	0.725	0.712	0.703	0.732	0.766	0.810	0.775	0.115	0.745	0.768	1.000	
0E	0.847	0.088	0.832	0.755	0.872	0.847	0.797	0.879	0.914	0.867	0.894	-0.125	0.915	0.688	0.837	1.000

4.7. táblázat. A 16 csatorna 2000.07.15.-12.31. közötti időszakra vonatkozó Pearson féle korrelációs koefficiensei

* * * * * H I E R A R C H I K U S C L U S T E R A N A L Í Z I S * * *

Dendrogram a csoportok közötti átlagos kapcsolat alapján
Mérőszám: euklideszi távolság



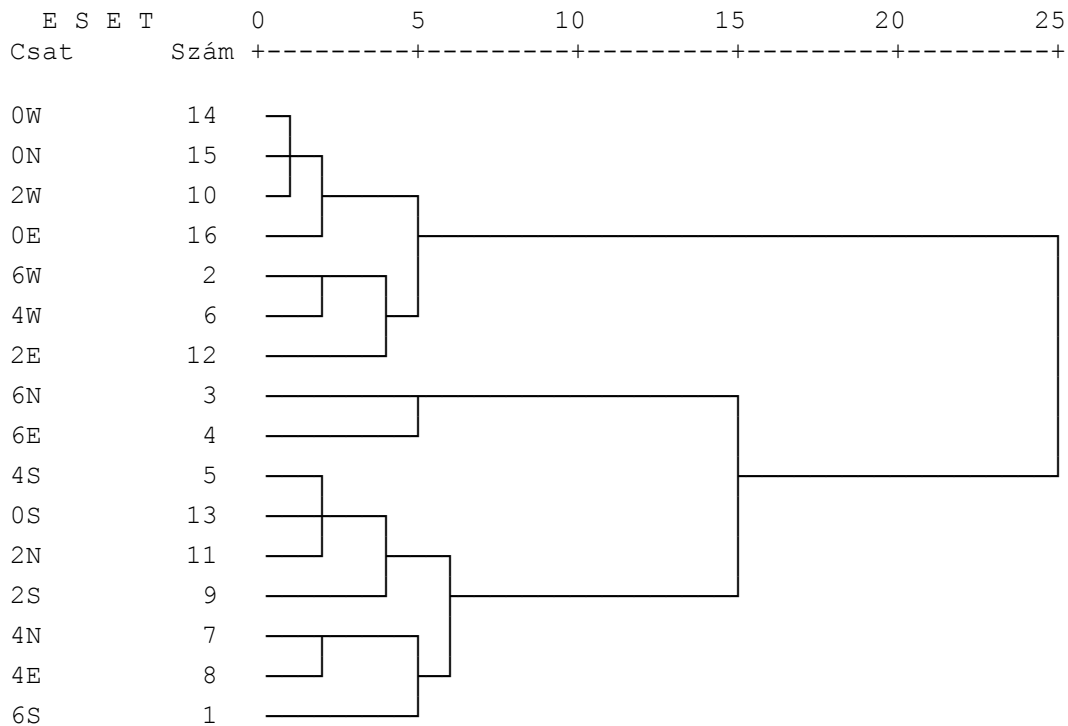
4.26. ábra. Az 2000.07.15.-12.31. időszakra vonatkozó hierarchikus cluster-analízis dendrogramja

	6S	6W	6N	6E	4S	4W	4N	4E	2S	2W	2N	2E	0S	0W	0N	0E
6S	1.000															
6W	0.641	1.000														
6N	0.708	0.732	1.000													
6E	0.796	0.710	0.925	1.000												
4S	0.698	0.692	0.892	0.879	1.000											
4W	0.682	0.861	0.662	0.684	0.641	1.000										
4N	0.446	0.802	0.717	0.663	0.714	0.781	1.000									
4E	0.487	0.742	0.756	0.698	0.684	0.720	0.768	1.000								
2S	0.335	0.033	0.370	0.390	0.441	0.044	0.209	0.094	1.000							
2W	0.454	0.646	0.549	0.518	0.619	0.586	0.686	0.590	0.326	1.000						
2N	0.528	0.548	0.798	0.738	0.849	0.460	0.634	0.549	0.567	0.586	1.000					
2E	0.442	0.844	0.563	0.532	0.560	0.724	0.811	0.649	0.129	0.708	0.499	1.000				
0S	0.484	0.651	0.703	0.630	0.727	0.625	0.716	0.669	0.299	0.608	0.655	0.570	1.000			
0W	0.626	0.824	0.658	0.634	0.704	0.839	0.755	0.625	0.149	0.648	0.579	0.686	0.756	1.000		
0N	0.455	0.804	0.559	0.506	0.601	0.802	0.766	0.673	0.002	0.634	0.465	0.735	0.751	0.841	1.000	
0E	-0.187	-0.141	-0.422	-0.419	-0.386	0.030	-0.079	-0.174	-0.061	0.057	-0.291	0.011	-0.047	0.028	0.141	1.000

4.8. táblázat. A 16 csatorna 2001.01.01.-05.16. közötti időszakra vonatkozó Pearson féle korrelációs koefficiensei

* * * * * H I E R A R C H I K U S C L U S T E R A N A L Í Z I S * * *

Dendrogram a csoportok közötti átlagos kapcsolat alapján
Mérőszám: euklideszi távolság



4.27. ábra. Az 2001.01.01.-05.16. időszakra vonatkozó hierarchikus cluster-analízis dendrogramja

A fentiekből jól látszik, hogy az egyes szinteken belül, kevés kivétellel (2. minta 4 m-es szint és 4. minta 2 m-es szint), nagyon jó a korreláció. A szintátlagok (azonos szinten elhelyezett elektródokon mért elektromos potenciálkülönbségek átlaga) között az 1. mintánál gyenge vagy negatív (egyedül a 2m-es és a 0m-es szintek között jelentős) a kapcsolat, míg a 2., 3. és 4. minta esetében erős a kapcsolat; (4.9-4.12. táblázatok).

1. minta					3. minta				
	6_átl	4_átl	2_átl	0_átl		6_átl	4_átl	2_átl	0_átl
6_átl	1				6_átl	1			
4_átl	0.413	1			4_átl	0.941	1		
2_átl	0.290	-0.666	1		2_átl	0.844	0.912	1	
0_átl	0.390	-0.336	0.797	1	0_átl	0.904	0.921	0.899	1

2. minta					4. minta				
	6_átl	4_átl	2_átl	0_átl		6_átl	4_átl	2_átl	0_átl
6_átl	1				6_átl	1			
4_átl	0.755	1			4_átl	0.894	1		
2_átl	0.955	0.797	1		2_átl	0.750	0.762	1	
0_átl	0.888	0.556	0.846	1	0_átl	0.680	0.813	0.663	1

4.9-4.12. táblázat. A szintátlagokra vonatkozó korrelációs mátrixok

Ha a szintátlagok után az égtájátlagokra (az azonos kitétségű elektródokon mért elektromos potenciálkülönbségek átlaga) vonatkozó korreláció-mátrixokat (4.13-4.16. táblázat) is megnézzük, azt tapasztaljuk, hogy az 1, 2. és 3. minta esetében mind a négy irányban erős a korreláció (pusztán az 1. mintában a nyugati átlag esetében gyengébb a kapcsolat). A negyedik mintánál páronként a keleti és nyugati valamint az északi és keleti égtájátlagok között szorosabb a kapcsolat.

1. minta					3. minta				
	S_átl	W_átl	N_átl	E_átl		S_átl	W_átl	N_átl	E_átl
S_átl	1				S_átl	1			
W_átl	0.666	1			W_átl	0.763	1		
N_átl	0.900	0.644	1		N_átl	0.946	0.75	1	
E_átl	0.813	0.693	0.760	1	E_átl	0.954	0.823	0.956	1

2. minta					4. minta				
	S_átl	W_átl	N_átl	E_átl		S_átl	W_átl	N_átl	E_átl
S_átl	1				S_átl	1			
W_átl	0.907	1			W_átl	0.084	1		
N_átl	0.907	0.787	1		N_átl	0.835	0.408	1	
E_átl	0.943	0.946	0.866	1	E_átl	0.308	0.874	0.626	1

4.13-4.16. táblázat. Az égtájátlagokra vonatkozó korrelációs mátrixok

A továbbiakban nézzük meg, hogy a kitétségnek valamint az elektródmagasságnak milyen hatása van az elektromos potenciálkülönbségek napi változására. Nyolc darab – minimum 6 napos – időszakot választottam ki a II - IV. kísérleti szakaszokból (4.17. táblázat). Mivel a tranziens változások nem egyformán jelentkeznek az egyes csatornákon, ezért – a napi változások éves járásnak vizsgálatához hasonlóan –, az analízist zavarmentes időszakokon végeztem el. A feldolgozás során első lépésként az azonos kitétségű elektromos potenciálkülönbség adatsorokat átlagoltam, majd ezekből napi átlaggörbéket számoltam úgy,

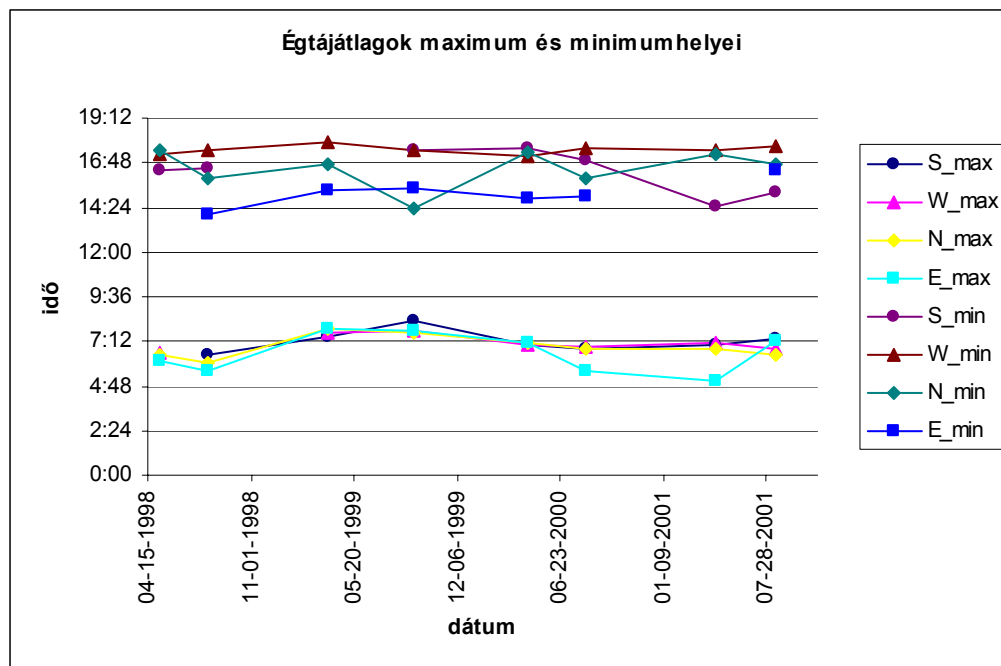
hogyan az azonos időpillanathoz tartozó értékeket is átlagoltam, végül a napi átlaggörbét centráltam ($x_i' = x_i - \bar{x}$).

Kísérleti szakasz	Mintaszám	Dátum
II.	5.	1998.05.07-15.
	6.	1998.08.08-20.
	7.	1999.04.01-06.
	8.	1999.09.12-20.
III.	9.	2000.04.22-30.
IV.	10.	2000.08.10-21.
	11.	2001.04.23-30.
	12.	2001.08.14-19.

4.17. táblázat

minta	Maximum helyek (óra:perc)				Minimumhelyek (óra:perc)			
	S_max	W_max	N_max	E_max	S_min	W_min	N_min	E_min
5.	0:00*	6:32	6:28	6:09	16:23	17:16	17:26	12:23*
6.	6:30	0:35*	6:05	5:36	16:27	17:27	15:59	14:01
7.	7:28	7:40	7:55	7:50	13:11*	17:56	16:43	15:21
8.	8:19	7:48	7:41	7:44	17:28	17:28	14:18	15:24
9.	7:00	6:59	7:06	7:04	17:36	17:11	17:19	14:50
10.	6:49	6:54	6:46	5:35	16:57	17:33	16:01	14:57
11.	6:59	7:04	6:46	5:06	14:29	17:27	17:17	12:45*
12.	7:18	6:48	6:30	7:12	15:14	17:39	16:44	16:21
átlag	7:11	7:06	6:54	6:32	16:22	17:29	16:28	15:09
szórás	0:35	0:27	0:37	1:03	1:08	0:13	1:02	0:46
konfidencia int. ($\alpha=0.05$)	0:26	0:20	0:26	0:43	0:51	0:09	0:43	0:34

4.18. táblázat. Az égtájátlagok maximum- és minimumhelyei (a *-gal jelölt nem reális értékeket, amelyek az átlaggörbék zaj okozta torzultságából fakadnak, az értékelésből kizártam)

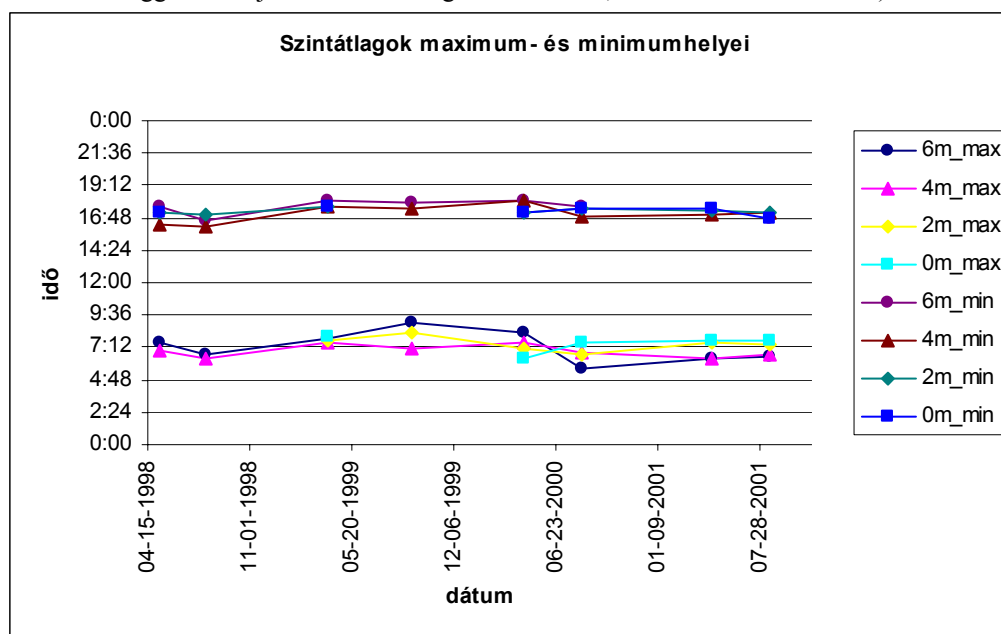


4.28. ábra. Az égtájátlagok maximum- és minimumhelyei (5-12. minta)

A napi átlaggörbéknek meghatároztam a maximum- és minimumhelyeit. (A felhasznált adatsorok a lehető legnagyobb, azaz 1 perces felbontásúak voltak, hogy minél pontosabban lehessen meghatározni a fő jellegzetességeket.). Páronkénti kismintás t-próbával hasonlítottam össze az egyes mintákat (4.20.a-d. táblázat). A nullhipotézis az volt, hogy az egyes minták várható értéke megegyezik. A megbízhatósági szintet, figyelembe véve a csatornák változékonyságát, 90%-nak választottam.

minta	Maximum helyek (óra)				Minimumhelyek (óra)			
	6m_max	4m_max	2m_max	0m_max	6m_min	4m_min	2m_min	0m_min
5.	7:31	6:57	2:56*	2:34*	17:42	16:18	17:12	17:11
6.	6:43	6:21	23:41*	23:37*	16:36	16:06	17:01	6:39*
7.	7:55	7:32	7:43	7:57	18:06	17:34	17:42	17:37
8.	8:58	7:03	8:15	23:48*	17:54	17:28	0:45*	0:56*
9.	8:14	7:37	7:10	6:23	18:05	18:04	17:12	17:11
10.	5:39	6:49	6:43	7:36	17:35	16:57	17:33	17:29
11.	6:21	6:21	7:35	7:38	11:12*	17:04	17:24	17:30
12.	6:31	6:42	7:24	7:45	16:45	17:10	17:12	16:41
átlag	7:14	6:55	7:28	7:27	17:31	17:05	17:19	17:16
szórás	1:06	0:28	0:31	0:37	0:36	0:38	0:14	0:20
konfidencia int. ($\alpha=0.05$)	0:46	0:19	0:24	0:29	0:27	0:27	0:10	0:15

4.19. táblázat. A szintátlagok maximum- és minimumhelyei (a *-gal jelölt nem reális értékeket, amelyek az átlaggörbék zaj okozta torzultságából fakadnak, az értékelésből kizártam)



4.29. ábra. A szintátlagok maximum- és minimumhelyei (5-12. minta)

A 4.18. táblázat és a 4.28. ábra alapján látható, hogy az északi oldal ($6:54 \pm 26$ perc), valamint a déli és nyugati oldal csatornáin (rendre $7:11 \pm 26$ ill. $7:06 \pm 20$ perc) körülbelül azonos időben éri el a maximumot. Ezekből átlagban valamivel hamarabb jelentkeznek a napi maximumok a keleti oldal csatornáin ($6:32 \pm 43$ perc), és ez a különbség a nagy szórás ellenére a déli oldalhoz viszonyítva szignifikánsnak tekinthető (szignifikancia < 0.1). A minimumértéket általában a keleti oldal csatornáin veszik fel leghamarabb ($15:09 \pm 34$ perc), utánuk a kb. azonos időben a déli és északi csatornák ($16:22 \pm 51$ ill. $16:28 \pm 43$ óra), míg végül a nyugati oldal csatornáin ($17:29 \pm 09$ perc). Ezek az eltérések szignifikánsak (4.20.b. táblázat).

Ezt a vizsgálatot a szintekre vonatkozó napi átlaggörbékre is elvégeztem (4.19. táblázat és 4.29. ábra). Noha kimutatható, hogy átlagban a 4m-es szint csatornáit veszik fel legkorábban a maximum és minimumértékeket, valamint tény, hogy az egyes minták esetében jelentős eltérés is előfordul (főleg a minimumok esetében), összességében azonban az eltérések nem szignifikánsak az egyes szintek között. 90%-os megbízhatósági szint esetén egyedül a 6 m-es szint minimumértékei térnek el a többitől (ezek a csatornák veszik fel legkésőbb; 17.31 ± 27 perc).

Páronkénti t-próba

a	Átlag	Variancia	Std. hiba	t	df	Szig.
S_max - W_max	0:07	0:19	0:08	.863	5	.427
S_max - N_max	0:13	0:26	0:10	1.367	6	.221
S_max - E_max	0:37	0:48	0:18	2.035	6	.088
W_max - N_max	0:05	0:12	0:05	1.021	6	.347
W_max - E_max	0:26	0:52	0:20	1.333	6	.231
N_max - E_max	0:23	0:45	0:16	1.433	7	.195
b	Átlag	Variancia	Std. hiba	t	df	Szig.
S_min - W_min	-1:04	1:14	0:28	-2.296	6	.061
S_min - N_min	-0:04	1:56	0:44	-.098	6	.925
S_min - E_min	1:38	1:34	0:42	2.327	4	.080
W_min - N_min	1:01	1:06	0:23	2.607	7	.035
W_min - E_min	2:23	0:42	0:17	8.335	5	.000
N_min - E_min	1:02	1:16	0:31	1.983	5	.104
c	Átlag	Variancia	Std. hiba	t	df	Szig.
6m_max - 4m_max	0:19	0:52	0:18	1.019	7	.342
6m_max - 2m_max	-0:12	0:59	0:24	-.495	5	.641
6m_max - 0m_max	-0:32	1:30	0:40	-.791	4	.473
4m_max - 2m_max	-0:28	0:42	0:17	-1.623	5	.166
4m_max - 0m_max	-0:28	1:00	0:27	-1.029	4	.362
2m_max - 0m_max	-0:09	0:36	0:16	-.542	4	.617
d	Átlag	Variancia	Std. hiba	t	df	Szig.
6m_min - 4m_min	0:27	0:34	0:13	2.091	6	.082
6m_min - 2m_min	0:10	0:32	0:13	.729	5	.499
6m_min - 0m_min	0:25	0:21	0:09	2.694	4	.054
4m_min - 2m_min	-0:18	0:37	0:14	-1.254	6	.257
4m_min - 0m_min	-0:05	0:40	0:16	-.327	5	.757
2m_min - 0m_min	0:06	0:13	0:05	1.145	5	.304

4.20.a-d. táblázat. A minták páronkénti t-próbája

A csatornák között kimutatott különbségek legvalószínűbb magyarázata a szerkezeti inhomogenitásban keresendő. A kísérlet megkezdése előtt abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a törzs egy-egy választott keresztmetszetén megközelítőleg azonos mennyiségű folyadék áramlik keresztül. A folyadék áramlási útvonala és áramlássűrűsége a szíjacsbán azonban már változhat, akár az egyes keresztmetszeteken belül is (egy-egy xylem-elem több, mások kevesebb folyadékot szállíthatnak). Az aktív vízszállító xylem rész nagyon vékony, gyakorlatilag pár sejtsor vastag (Granier et al., 1994, Béres Cs. et al., 1998, Raschi et al., 1995), amely érzékeny az embolizációra, kavitációra. A hidroaktív zónában, a vizsgálatok szerint, a szállítás bonyolult 3 dimenziós hálózatban történik, a legkisebb hidraulikus ellenállás irányában. Ebben a rendszerben a hidraulikus ellenállást számos tényező befolyásolhatja, mint pl. a hőmérséklet, a szállított nedv iontartalma (ld. 5.1. fejezetben leírt mechanizmus), mechanikai sérülés, stb. A fenti hipotézist erősíti meg az a tény is, hogy a korreláció- és cluster-analízis alapján gyakorlatilag nem lehet az egyes csatornák közötti eltérésben egyértelmű szabályszerűséget találni a kísérlet négy évére vonatkozóan. Az egyes csatornák egymáshoz való viszonya szinte egyik évről a másikra változik, ami egy évente változó hatást feltételez. Ezzel kapcsolatban természetes feltételezésként adódik az évről-évre módosuló xylem-szerkezet, vagyis a kifejlődő új évgyűrűk hatása.

5. A termometriás nedváramlás adatsor elemzése

Az irodalmi adatok és a korábbi kísérletünk tapasztalatai alapján valószínűsíthető, hogy a mért elektromos potenciálkülönbség leginkább a xylemnedv áramlásával függhet össze. A probléma komplexitásának érzékeltetéséhez mindenképpen érdemes a fejezetben röviden áttekinteni a fák vízszállítását, valamint ezt kiegészítendő, a vízszállítás lehetséges mérési metódusait, különös tekintettel a termometriás eljárásokra. E szükséges kitérőt követően ismertetem az elektromos potenciálkülönbséggel párhuzamosan mért xylemnedv-áramlás adatsor elemzést.

5.1. A fák vízszállítása

Vízfelvétel

A szárazföldi növények a vizet a talajból veszik fel. A talaj víztartalma nagymértékben függ a talaj kémiai összetételétől és fizikai állapotától, struktúrájától. A talajszemcsék közötti pórusokat víz (pontosabban talajoldat) és különböző összetételű levegő tölti ki. A talajrészecskék felületének nagyságától is függ a talaj vízmegtartó képessége és a talaj vízkapacitása.

A talajban a víz különböző formában és különböző mélységben helyezkedik el. A gravitáció hatására lefelé szivárgó víz egy része a talaj vízkapacitásának megfelelően a nehézségi erővel szemben, mint kapilláris víz visszamarad, a felesleges pedig mint gravitációs víz tovább vándorol. A növény számára a talajban lévő víznek nem a formája, hanem kötődésének, illetve tapadásának erőssége a döntő, amit a vízfeszültséggel vagy szívási feszültséggel lehet MPa-ban kifejezni. A vízkapacitásnak megfelelő vízmennyiség egy része az általában jól nedvesedő talajrészecskéket és a közöttük lévő gyökérszőrőket összefüggő vízvártaival burkolja be. Amikor a vízvárta elszakadása következtében az egységes vízburok megszűnik, a víztartalom a vízkapacitás alá esik, és csak a hézagok sarkában marad vissza, mint póruszegletvíz. Ez a víz már nem mozog, csak párolgás útján vagy a gyökerek vízfelvétele következtében fogy el. A talajvíznek azt a mennyiségét, amely mellett a növények állandóan lankadnak, permanens hervadási pontnak (PHP) nevezik, és a hervadási koefficienssel jelzik. A növények növekedéséhez csak az a vízdifferencia áll rendelkezésre, amely a hervadási koefficiens és a talaj vízkapacitása között mutatkozik.

A kapilláris- és póruszegletvíz elfogyása után csak a hidratációs víz marad a talajban, amely a kolloid részecskéket vonja be, és a legbelső rétegei több mint 10 MPa erővel kötődnek a részecskékhez. Ha más víz már nem áll rendelkezésre, akkor a gyökerek a hidratációs víznek azt a részét még felhasználják, amelynek a talajrészecskékhez való kötődése a gyökerek felszívó erejénél (0,5-1 MPa) kisebb. Amikor a gyökerek szívóértéke és a kolloidok vízmegtartó ereje egyenlő, a vízfelvétel teljesen megszűnik, mert elérte az ultimatív hervadási pontot (UHP). Az a víztartalom, amely a PHP és az UHP között van, még elég a növényi élet fenntartásához, de a növekedéshez már nem.

A növényben a transzspirációs vízvesztés következtében a gyökérben a vízpotenciál értéke csökken (vízpotenciál: az a kémiai potenciálkülönbség, amit tiszta víz és egy oldatnak – annak bármely pontján – azonos hőmérsékleten és nyomáson történő mérésével kapunk; a tiszta víz vízpotenciálja 25 °C-on és 0,1 MPa-on zérus). Ha vízpotenciál-gradiens jön létre a gyökér és a talaj között és a gyökér vízpotenciál-értéke a negatívabb, akkor vízmozgás jön létre a talajban a gyökérfelület irányába. Ha a talaj víztartalma csökken, a gyökér vízpotenciál értékének is csökkennie kell, hogy a gradiens meredeksége és így a vízfelvétel sebessége is változatlan maradjon. A vízfelvétel mértékét a gyökérrendszer kiterjedése mélységben és

szélességben, a vízmozgás sebessége, a vízpotenciál-gradiens nagysága és a talaj hidraulikus konduktivitása határozza meg. Ez utóbbi az agyagtalajokban a legnagyobb. Az az elképzelés, hogy a víz – felhasználásának mértékében – szüntelenül a gyökérrendszer felé áramlik, csak részben igazolt. A fiziológiailag aktív növények gyökérrendszere állandóan növekszik és a talaj újabb és újabb rétegeit éri el. Ebből következik, hogy a talaj víztartalékainak felhasználásában döntő szerep jut a gyökérrendszer fejlődési ütemének, jellegének, anyagcsere intenzitásának.

A vízfelvétel a gyökér hossz tengelye mentén a csúcstól a gyökérszálak felé haladva változik. A gyökércsúcs nem vesz fel vizet, legaktívabb felvevő zóna a megnyúlási és gyökérszűrős zónában van. A gyökérszűrők jelentősen növelik az abszorbeáló felületet, szoros kapcsolatban állnak a talajjal, erősítik a gyökér-talaj kapcsolatot, amikor a talaj kiszárad és a gyökerek zsugorodnak.

Az aktív vízfelvétel függ a talaj hőmérsékletétől is. A hideg talaj fiziológiailag száraz, még ha vízzel telített is. Hideg talajban a növények vízfelvétele annyira lelassul, hogy nem képes az elpárologtatott vizet pótolni. Alacsony hőmérsékleten emelkedik a gyökerek vízáramlással szembeni ellenállása is. Ennek magyarázata az, hogy csökken a víz viszkozitása, amely 0 °C-nál kétszer akkora, mint 25 °C-nál; csökken a membránok permeabilitása; csökken az anyagcsere aktivitása és a sófelhalmozódás, amely az ozmotikus (aktív) vízfelvétel hajtóereje, ugyanakkor nő a passzív vízfelvétellel szembeni rezisztencia; lelassul a gyökerek növekedése. Az őszi hónapokban a lehűlt talajból a gyökerek már csak lassan veszik fel a vizet és ennek eredményeképpen vízhiány keletkezik. (A növény erre általában a párologtató felület csökkentésével válaszol, amit a lombhullás útján ér el.)

A talaj oxigéntartalma szintén befolyással van a gyökerek vízfelvételeire. A túlságosan tömör vagy vízzel elárasztott talajokban, ahol a szellőzés nem kielégítő, a növények rosszul fejlődnek, illetve elpusztulnak, mert a gyökereknek oxigénre van szüksége. Az oxigénellátottság csökkenése gyökérfulladást idéz elő. A legtöbb növény számára az jelenti az optimumot, ha a talaj pórustérfogatának 70 %-át víz, 30 %-át pedig levegő foglalja el

Víztranszport a gyökérben

A növények vízfelvétele és a növényben történő vízszállítás alapvetően kétféle technikával vizsgálták: tanulmányozták a levágott gyökérnek és az intakt növénynek a vízfelvétele és a vízleadását. Általában elfogadták azt a feltételezést, hogy a levágott gyökérben történő vízmozgás és az intakt, ép növényben történő vízmozgás azonosnak tekinthető abban az esetben, ha a növény nem transzspirál.

A levágott gyökérnél és a nem transzspiráló növénynél a vízmozgást a gyökérszálak biztosítja. A gyökérszálakat a xylem-elemekben lévő nedv és a külső oldat ozmotikus nyomáskülönbsége hozza létre. A gyökérszálak mechanizmusát a könnyezés jelenségének vizsgálatán keresztül lehet a legszemléletesebben bemutatni.

A hajtás levágása után a gyökérszálak vágásfelületén sok esetben rendkívül nagymértékű és egyes növényeknél akár egy hétig is tartó nedvkiválasztást (exudáció) lehet megfigyelni. A könnyezés jelensége alapvetően két folyamatból tevődik össze: a xylem-edényekbe történő aktív sótranszportból és a passzív víztranszportból. Kísérletek szerint a gyökér a hajtás levágása után egy ideig egyenletes sebességgel könnyezik, ha a külső oldat koncentrációja és összetétele változatlan. Amikor a külső közeg ozmotikus koncentrációja megnövekszik, a könnyezés hirtelen lecsökken, annak megfelelően, hogy mekkora a xylem-elemekben lévő nedv és a külső oldat ozmotikus koncentrációja közötti különbség. Ezt követően a – egy új egyensúly eléréséig – a xylembe történő aktív ionfelvétel következtében a könnyezés mértéke újra nő. Ehhez az emelkedéshez a sótranszporton kívül hozzájárul még az is, hogy a víz ezalatt az idő alatt az ionok beválasztási helyéről lassabban mozog a vágásfelület irányába,

tehát a beválasztási helyen a sókoncentráció megnő. A könnyezési nedvben mind a talajból, mind a környező gyökérszövetekből származó ionok megtalálhatók (tehát kétféle sószekréciót kell megkülönböztetni: felvételi szekréciót és szövetsekreációt). Ha az új egyensúly kialakulása után a külső közeg ozmotikus koncentrációja visszaáll az eredeti értékre, akkor a koncentráltabbá vált xylem-nedv és a közeg közötti ozmotikus koncentrációkülönbség miatt a könnyezés jelentősen fokozódik. A xylemből az ionok tovább szállítódnak, így a könnyezés sebessége lassan visszaáll az eredeti egyensúlyra jellemző értékre.

Víztranszport a xylemben

A víz a gyökerekből a hajtásba, majd a levelekbe a vízmozgással szembeni legkisebb ellenállást jelentő xylem-elemekben áramlik. Ezen az útvonalon egy folyamatos vízoszlopra van szükség, ugyanis ha a vízoszlop megszakad, akkor az áramlás is megszűnik. A magas fák esetében feltétlenül „negatív nyomásnak” (szívásnak) kell kialakulnia.

A tracheák és tracheidák anatómiája biztosítja a nagy mennyiségű víz gyors mozgását. A tracheák lényegében elhalt sejtekből kialakuló kapillárisok, amelyeknek harántfalai perforálódtak. Szilárdságukat a jellegzetesen spirálisan megvastagodott, lignifikált másodlagos sejtfaik biztosítják. Oldalfalaikon gödörkés megvastagodások vannak. Ezek azok a mikroszkópikus régiók, amelyekben a primér sejtfaik középlamelláit megtaláljuk, és ahol a két egymás mellett lévő xylem-elem kapcsolatban lehet egymással. A tracheidák hosszúra megnyúlt sejtek, amelyek egymással a harántfalakon keresztül érintkeznek, ahol a gödörkében a másodlagos sejtfaik eltűnik, a primér sejtfaik vékony és porózus.

A vízszállítás gyorsasága fás növényekben a több méter/órás (egyes szerzők szerint akár 16-45 m/h) sebességet is eléri a nagyobb, 100-200 μm sugarú xylem-elemknél. Kérdés, hogy ilyen vízszállítási sebesség mellett, milyen nyomásgradiensnek kell kialakulnia a növény szállítóelemeiben? A nyomásgradiens nagyságát a Hagen-Poiseuille-törvénnyel lehet leírni:

$$q_v = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta \Delta x}, \quad (5.1.1.)$$

ahol q_v a tömegáram ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), r a kapilláris sugara, η a folyadék viszkozitása, $\Delta P / \Delta x$ a nyomásgradiens. Ha a vízszállítás sebességét (I) $4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ -nek tételezzük fel, a xylem sugara (r) 40 μm , és feltételezzük, hogy az alacsony koncentrációjú xylem-nedv viszkozitása a vízéval azonos ($10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), akkor a

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{8 I \eta}{r^2} \quad (5.1.2.)$$

képlet alapján a nyomásgradiensnek $0,02 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ -nek kell lennie. Ez az a nyomásgradiens, ami egy ideális edényben a $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ sebességű vízmozgást létre tudja hozni. A valóságban azonban a xylem-elemek belső fala nem sima, az egyes tracheaelemek között perforáció van, a tracheidáknál pedig a pórusos lemez miatt nagyobb lesz az ellenállás a vízmozgással szemben az ideálisnál. A legmagasabb túlevelű fa (mammutfenyő) elérheti a 100 m-t is. Száz méter magas vízoszlopnak a gravitáció miatti ellenállása 1 MPa ($100 \cdot 0,01 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$), a xylem-elemek súrlódásai (minimális ellenállása 2 MPa , tehát a vízellátáshoz legalább 3 MPa értékű gradiensnek kell lennie a fatörzs alja és a legfelsőbb ágvégek között. Kérdés, hogyan jön létre ez a nyomásgradiens?

Az intakt növényekben a szívási tenzió kialakulását a következőképpen lehet megmagyarázni: a transzspiráló levél nedves sejtfaik felületéről állandóan vízmolekulák szakadnak le, amelyek az intercellulárisokból a sztómányílásokon át a levegőbe jutnak. A transzspiráció nagymértékben függ a levegő relatív páratartalmától, illetve vízpotenciáljától. Ha a levegő relatív páratartalma 95%-os, akkor $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -on a levegő vízpotenciálja $-6,9 \text{ MPa}$, az alábbi képlet alapján:

$$\Psi_{\text{lev}} = \frac{RT}{m_v} \ln \varphi, \quad (5.1.3.)$$

ahol R az univerzális gázállandó (8,3 MPa*cm³/mol*K); m_v a víz móltérfogata (18 cm³/mol); T hőmérséklet (K) és φ a relatív páratartalom (%). Ez a tenzió a legnagyobb fák esetében is biztosítja a szükséges hajtópotenciált. A vízvesztést a mezofillum-sejtek térfogatcsökkenése követi, amely a sejt vízpotenciálját csökkenti. A sejtek vizet vesznek fel a levélerekből. A kialakult turgornyomás csökkentés tovább adódik a xilémelemeken egészen a gyökér sejtekig, majd a talajig. Ha a vízvesztés sebessége nagyobb lesz, mint a vízfelvétel sebessége, akkor a nyomás a szállítóedényekben a légköri nyomás értéke alá esik, és jelentős vízpotenciál-gradiens (szívási tenzió) alakul ki a levélsejtektől a xilémelemeken át a talajoldatig.

A növényekben tehát egy teljesen összefüggő vízrendszer van, a víz gázállapotúvá változásától a talajig. A vízmolekulák kohéziós ereje és a xylem-elemek morfológiája lehetővé teszik, hogy a legmagasabb fák vízellátása is zavartalan legyen. Ez lényegében a történeti áttekintésben már említett vízmozgás kohéziós teóriája.

A teória helyességét az eltelt több, mint 100 év alatt többen kétségbe vonták, és többen próbálták bizonyítani. 1965-ben úgy tűnt, hogy Scholander és munkatársai egy viszonylag egyszerű módszerrel közvetett bizonyítékokat szolgáltatottak a xylem-elemekben lévő nyomásgradiens és a negatív nyomás meglétére. A mérés alapja az, hogy a hajtás xylem-elemeiben a levágás pillanatában, a külső és belső nyomáskülönbségnek megfelelően, a vízoszlop visszahúzódik. Ha ezt a hajtást egy olyan zárt rendszerbe (kamrába) helyezték, amelyre mérhető nagyságú nyomást tudtak gyakorolni, akkor ez a vízoszlop egy meghatározott nyomásértéknél újra eléri a vágásfelületet és az azon megjelenő folyadék réteg bizonyítja, hogy a szállítópályák ismét folyadékkal telítettek. Ebben a pillanatban a manométeren le lehet olvasni a nyomásértéket, tehát meg lehet állapítani annak a negatív nyomásnak a nagyságát, ami a fa szállítónyalábjaiban fennállt.

A Scholander-féle módszerrel, a külső körülményektől függően, -0,5 MPa-tól -8,0 MPa értéket mértek. A napi ritmus, a transzspiráció intenzitásának változása miatt, elérheti az 1,0-2,0 MPa különbséget. Magas fák ágaival történt mérésekkel a nyomásgradienst is igazolták. Elméletileg a vízmolekulák közötti kohéziós erő, vagyis a víz szakítószilárdsága bőven elegendő a vízoszlop összetartásához. A hétköznapi életben a víz depresszióval csak kb. 9,75 m mélységből emelhető fel. A víz ugyanis mindig tartalmaz kis levegőbuborékokat és ha a nyomás 20 °C-on 0,0023 MPa értékre csökken, akkor a víz forrni kezd és a nyomás tovább nem csökkenthető. A xylem fala azonban gyakorlatilag levegőmentes, ezenkívül a víz kisméretű csőhálózatba van bezárva, így a falon ébredő adhéziós erők is hozzájárulnak ahhoz, hogy a víz ebben az esetben jelentős – minimum 10-20 MPa – húzószilárdsággal rendelkezzen és lehetővé tegye a víz emelését. Ennek ellenére erős szélben és nagyon intenzív transzspiráció esetén a folyadékból gázok válhatnak ki, és buborékká alakulva megszakíthatják a vízoszlopot. Nagyon érzékeny mikrofonnal kimutatták, hogy a buborékképződés elég gyakori jelenség. Ennek ismeretében feltehető a kérdés, hogy a növény hogyan tudja mégis ellátni a hajtását vízzel?

A lehetséges magyarázat az, hogy csak egy-egy xylem-elem esik ki a szállításból, mert a buborék nem tud továbbterjedni. A buborék addig tágul, míg a levegő/folyadék fázishatár ezt engedi. Azt a nyomást, ami a levegő/víz felületet a pórusokon keresztül tudja nyomni, ki lehet számítani. A tracheák és tracheidák között gödörkéket és bennük pórusnyílásokat találunk, amelyek átmérője kb. 100 nm. Ahhoz, hogy a levegő ilyen méretű pórusokon át tudjon jutni, közel 2 MPa nyomásnak kellene lennie a légbuborékban. Ezért a szállításból csak az a xylem esik ki, ahol a buborék ténylegesen keletkezett. A gázbuborék el is tűnhet a xylem-elemből: pl. éjszaka, amikor a növény nem transzspirál, a tenzió csökken és a gáz újra feloldódik, vagy jelentős gyökérnyomás hatására, mint egyes pálmáknál. Hideg éghajlaton kifagynak a gázok a

xylemben szállított folyadékból. A gázembólia veszélyét számos növény tömlősejtek (thyllisek) létrehozása útján csökkenti, melyek a gázzal telt szakaszokat légjárhatatlanul elkülönítik a még vízzel teltektől. A tömlősejtképzés a tág üregű fafajokban a legerősebb, s ez összefügg azzal, hogy a vízoszlop ezek tracheáiban szakad meg a legkönnyebben (minél nagyobb térfogatú egy szállítóelem, annál valószínűbb, hogy benne negatív nyomás hatására gázbuborék keletkezik). A jól alkalmazkodott növényeknél tavasszal nagyon rövid idő alatt új szállítóedények képződnek. A fatest növekedési tempójának arányban kell lennie a kavitáció előrehaladásával.

A felsoroltak mellett még azt is figyelembe kell venni a magas fák vízszállításának megértésénél, hogy a nyalábkontinuitás nem jelent edénykontinuitást, mivel az edények hossza korlátozott a nyalábokban. Feltételezhető, hogy a szállítópályák keresztmetszetének a területe a törzsben egyenlő lesz az ágakban található terület összegével. A valóságban azonban keresztmetszet összege akropetálisan csökkenhet (pl. a nyírfánál), vagy pedig növekedhet (pl. a tölgyeknél). Az előző esetben a vízáramlás sebessége felfelé nő, míg az utóbbinál csökken.

A szállítónyalábok bonyolult elrendeződése még azt is lehetővé teszi, hogy a fa törzsének az átvágása ellentétes irányokból ne akadályozza meg a felfelé történő vízmozgást. Fenyőfa törzsének átvágása után tanulmányozták a vízmozgás irányát P^{32} -vel történő jelöléssel.

A kohéziós teória elleni legsúlyosabb kifogásként Balling és Zimmermann azt hozták fel, hogy a negatív nyomás meglétét közvetlen mérésekkel még senki sem bizonyította. A nyomáspróba-technika kismértékű módosításával nekik sikerült közvetlenül mérniük a xylem-elemekben lévő nedv vízpotenciál értékét (Balling és Zimmermann, 1990). Amíg a gázmentesített vízzel töltött mikropilláris áthatol a parenchimatikus sejteken, addig a készülék pozitív nyomást regisztrál, amint azonban a kapilláris bejut a xylem-elembe, akkor a nyomásérték hirtelen lecsökken és hosszú ideig stabilan ezen az értéken marad. Dohányhajtás xylem-elemeiben csökkenő relatív páratartalom mellett, vagy a növény öntözésének néhány napon keresztül történő elhagyásával $-0,63$ MPa negatív nyomást tudtak regisztrálni. Kukorica- és búzagyökér xylem-edényeiben is jól mérhető negatív nyomás alakult ki 100 mM-os NaCl ozmotikum hatására, ami reverzibilisen változtatható az ozmotikum tápoldat cserélésekor. Ez néhány órán keresztül többször megismételhető. Liánban 1 és 5 m magasan mért vízpotenciál értékek között csak késő délutáni, napsütéses órában tudtak különbséget mérni, azt is csak rövid ideig a légbuborékok keletkezése miatt. Trópusi fáknál 35 m magasan a levélrben mért xylem-tenzió csak néha érte el a $-0,3$ MPa-t, ami természetesen nem elegendő a sűrűlódási ellenállás legyőzésére.

A xylem-elemekben közvetlenül mért tenzióértékek nem igazolták a gradiens meglétét és túlságosan kis értékek ahhoz, hogy a magas fák vízellátását biztosítani tudják. Feltételezik, hogy a növényekben ki kell alakulnia egy másik, vízmozgást elősegítő mechanizmusnak. Bizonyított, hogy a levél xylem-elemeiből a víz sokkal gyorsabban lép ki, mint a benne oldott anyagok, az innen kinyert nedv ozmotikus nyomása elérheti a $0,5-1,0$ MPa értéket is, vagyis ozmotikus nyomás gradiens is elősegítheti a víz mozgását.

A közvetett (Scholander, nyomásbomba) és a közvetlen, xylem-elemben történő mérés (Zimmermann, nyomáspróba-technika) ellentmondó eredményei széles körben vitát váltott ki. A kohéziós teória hívei azt kívánták igazolni, hogy jóval a nyomáspróba-technikával mérhető negatív érték fölött ($-0,63$ MPa) sem képződik törvényszerűen buborék a xylem-elemekben. Bizonyítható volt egy levágott ágdarab centrifugálása során, ahol a centrifugális erő középpontjában meghagytak egy levelet, hogy a xylemben a centrifugálással keletkező tenzió átvihető a levélre és $-1,8$ MPa esetén sem keletkezik buborék a xylem-elemekben.

A teóriák ellentmondásosságát részben oldhatják azok a kísérleti eredmények, melyek szerint a fás növények között rendkívül nagy a különbség a xylem-elemek sérülékenységében. A vízstressz kiváltotta buborékképződés az egyik *Populus*-fajnál már -1 MPa-nál kisebb

nyomásnál észlelhető és -2 MPa-nál a xylem-elemeknek 80 %-a vízvezetésre képtelen, addig a *Fagus sylvatica* egyik vörös levelű változatánál a kavitáció -2 MPa-nál észlelhető és -3 MPa-nál a xylem-elemeknek még 50 %-a működőképes.

Továbbá mágneses rezonancia spektroszkóp segítségével igazolták, hogy a nagyobb edénnyalábokban sokkal gyorsabb a vízmozgás, mint a mellettük lévő kisebb edénnyalábokban. A transzspiráció intenzitásváltozását a vízszállítás sebességének változása hűen követi, azonban két edénnyaláb vízszállítási sebességének kezdeti növekedése és végső mértéke között jelentős különbség mérhető.

Transzspiráció

A növények vízleadása kapcsán kétféle transzspirációt lehet megkülönböztetni: kutikuláris és sztómákon keresztüli transzspirációt. A kutikuláris transzspiráció az epidermiszsejtek felületén történő vízleadás. Az elnevezés onnan származik, hogy ezek a felületek többnyire különböző vastagságú kutikulával fedettek. Ezért a kutikulán keresztül történő vízvesztés növényfajától függően nagymértékben változik, azonos körülmények között is. Viszonylag alacsony érték a sztómákon keresztül történő transzspirációhoz viszonyítva (vékony kutikula esetén a teljes vízleadás 20%-át is elérheti azonban).

A legjelentősebb a sztómákon keresztül távozó vízgőz, amely az elpárologtatott víz 80-90 %-át jelenti. A sztóma két zárósejttel körülvett nyílás, amelyen keresztül a víz a legkisebb ellenállással tud kidiffundálni. A transzspiráció mértékét a levél szerkezete, a levél sejtjeinek, valamint szöveteinek állapota erősen befolyásolja. A levél epidermiszén, annak mindkét oldalán (amphystomaticus levél) vagy csak az alsó oldalon (hypostomaticus levél) vagy csak a felső oldalon (epistomaticus levél) fejlődnek sztómák. Az elpárologtatás a sejtközötti járatokban történik az ezeket határoló parenchíma-sejtek felületéről, főleg a sztómák közvetlen közelében. Hasonlóan jelentős a párologtatás a légudvart határoló parenchíma-sejtekből. A levél intercellulárisainak teljes felülete rendkívül nagy, ami a vékony levelű, árnyéklakó növényeknél 7-10-szerese a külső felületnek; a mezofitonoknál 12-19-szerese, míg az aránylag vastag levelű xerofitonoknál 17-30-szorosa. Mivel a sejteket átítató víz gőzzé alakulásának feltételei a levél sejtközözeiben meglehetősen kedvezőek, a sejtközöket kitöltő levegőt majdnem mindig vízgőzzel telítettnek tekinthetjük, amely a sztómákon át vagy a kutikulán keresztül a külső légkörbe távozik.

A sztómák összterülete egészen nyitott állapotban is csak a levél felületének 1-2 %-át teszi ki. Ezzel szemben az a vízmennyiség, amely a sztómákon keresztül távozik, a levélfelülettel megegyező vízfelület párologtatásának 50 %-át is elérheti. A jelenség magyarázata az, hogy a diffúzió a kis pórusokon keresztül sokkal inkább a pórusok átmérőjével, mintsem a területükkel arányos. Az összes transzspiráció mértéke:

$$T = \frac{p_{\text{növ}} - p_{\text{légtér}}}{r_{\text{kut}} + r_{\text{hat}}} + \frac{p_{\text{növ}} - p_{\text{légtér}}}{r_{\text{mez}} + r_{\text{szt}} + r_{\text{hat}}}, \quad (5.1.4.)$$

ahol $p_{\text{növ}}$ a növényi felszín gőznyomása; $p_{\text{légtér}}$ a külső légtér gőznyomása; r_{kut} a kutikula ellenállása; r_{hat} a növény felszínén kialakult, vízgőzben aránylag gazdag légréteg ellenállása (vizet vesztő felszínnek – pl. levelek – közelében aránylag nagy vízgőznyomású, nedvesebb határréteg helyezkedik el, melyből épp ezért jelentékeny mennyiségű víz tér vissza ismét a felszínre); r_{mez} a mezofillum ellenállása; r_{szt} a sztómák ellenállása.

Ellenállások

A növényben, ahol a víz a gyökér élő sejtjeiben, a szállítópályákban, a levél élő sejtjeiben, az intercellulárisokban mozog, számos különböző nagyságú ellenállásba ütközik. Kérdés, hogy milyen mértékűek és természetűek ezek az ellenállások. Jelenleg az az általánosan

elfogadott nézet, hogy a víztranszport egy láncszerűen összekapcsolódó folyamat, amelynek a sebességét a legkisebb sebességű részfolyamat fogja meghatározni. A víztranszport sebessége (F) az egyes növényi részekben a vízpotenciálkülönbség és az ellenállás hányadosával lesz egyenlő:

$$F = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{R_s} = \frac{\Psi_r - \Psi_l}{R_p} = \frac{\Psi_l - \Psi_a}{R_a}, \quad (5.1.5.)$$

ahol az R_s a talaj, R_p a növény és R_a a víz gőzzé válásának ellenállását, a $\Psi_s - \Psi_r$ a talaj és gyökér, a $\Psi_r - \Psi_l$ a gyökérsejtek és a levél, a $\Psi_l - \Psi_a$ a levélsejtek és a vízgőzfázis közötti vízpotenciál különbséget jelenti.

A talaj és a mezofillum között a víz kevés ellenállásba ütközik, mert ezen az útszakasz nagyobb részét tág üregű szállító tracheákban, tracheidákban, irányított tömegáramlás formájában teszi meg. Ahol ilyen elemek nincsenek, ott a víz elsősorban a szintén kicsiny ellenállású sejtfalakban mozog, megint csak tömegáramlásként. A sejtek nagy ellenállású élő részei viszont kiesnek a hosszú távú vízszállítás útjából, kivéve a gyökérben. A gyökérben a víz a benne oldott sókkal először a külső bőrszöveten (epidermisz), majd a viszonylag vastag kéreg (cortex) részen keresztül áramlik. Az elsődleges endodermisz radiális és antiklinális falaiba azonban a víz és az ionok számára átjárhatatlan hidrofób anyag rakódik le (Caspary-féle csík). Ezért a kérgen átjutott víz nem az endodermisz falaiban halad tovább, hanem belép a plazmába, s így szimplazmatikus úton kerül ki a Caspary-csíkokat. Így a víznek kétszer kell a plazmalemmát kereszteznie (először, amikor belép a szimplazmába, másodsor, amikor elhagyja a szimplazmát és a szállítóelemekbe kerül). Ez megnöveli a gyökér vízforgalmi ellenállását. Ebből adódik, hogy erős transzspirációval a gyökér vízszállítása akkor sem tud lépést tartani, ha a talaj vízellátottsága jó (vízfelvételi késedelem).

A víznek cseppfolyós állapotban való áramlása a levélközép-sejtek faláig tart. Innen gőz formájában jut tovább kevésbé teljesítőképes diffúzió vagy konvekció révén. Ezért a gőzzé alakulás nagy ellenállással egyenértékű. Igen nagy ellenállást jelent még a sztómák légzése is. A vízellátás romlásakor a gyökérzet ellenállása csökken, a vizet vezető képleteké pedig nő, főleg a sztómák légrésének záródása miatt. A vízáramlás szempontjából minden ág, levél, levélér, sejt, sejtfal és plazma külön elágazás: az egyes elágazásokban folyó áramok erősségei fordítottan arányosak az illető elágazások ellenállásával. A farész kapilláris csöveinek vízvezető képessége az átmérőjük negyedik hatványával van arányban – ld. Hagen-Poiseuille-törvény (5.1.1. képlet) –, emiatt a szűk csövek ellenállása aránytalanul nagyobb, mint a tágaké.

Felmerül a kérdés azonban, hogy érvényes-e egyáltalán a Hagen-Poiseuille-törvény a xylem-kapillárisokra? Ugyanis a Hagen-Poiseuille-törvény a hidrodinamika alapvető törvényszerűségeiből ered, s hogy érvényes legyen, bizonyos precízen előírt feltételeket ki kell elégíteni: pl. a folyadékáramlásnak laminárisnak kell lennie; a falaknak szilárdnak és folyamatosnak kell lenniük; a cső falai mentén nem megengedhető a folyadék ki és belépése; a cső sugarának konstansnak kell lennie, stb. Ha ezek a feltételek kielégülnek, a Hagen-Poiseuille-törvény érvényes egy, a xylem-elemmel megegyező átmérőjű csőre. Az igen kis átmérőjű csövekben viszont már a diffúziós folyamatok is fontos szerepet játszhatnak.

A Hagen-Poiseuille-törvény érvényességét a növények vízáramlására vonatkozólag úgy vizsgálták, hogy levágott törzsszegmensben mérték a fluxus nagyságát meghatározott nyomás mellett. Az egyes edények ugyanabban a törzsből egymástól igen eltérően viselkedhetnek. *Sechium edule* törzsszegmens vizsgálata során Giordano és munkatársai egyes xylem-elemek esetében 50%-os egyezőséget találtak a Poiseuille-törvénnyel, de volt olyan eset is, amikor az egyezés pusztán 1%-os volt (Giordano et al., 1978). Egyebek közt ez azt mutatja, hogy a xylem-edényekben az áramlást nem elég pusztán geometriai és hidrodinamikai megfontolások alapján értékelni, figyelembe kell venni más befolyásoló mechanizmusokat is.

Az egyik ilyen mechanizmus a xylem edények gyors áramlás-szabályozása. Jelenleg a legáltalánosabban elterjedt nézet az, hogy a xylem-elemeknek alapvetően kétféle hidraulikus állapotuk van: vagy vizet szállítanak állandó ellenállás mellett, vagy embólia blokkolja őket (Tyree és Sperry, 1989), jóllehet néhány olyan publikáció, amely a xylem ellenállás rövid ideig tartó változásáról szól, megkérdőjelezi ezt a nézetet (Zwieniecki et al., 2000 és Zwieniecki és Holbrook, 1998). Több, mint két évtizede figyelték meg azt a jelenséget, hogy egy törzsszegmens hidraulikus ellenállása szignifikánsan lecsökkent, amikor a rajta átáramoltatott ionmentes vizet csapvízre cserélték. Hasonlót tapasztaltak van Ieperen és munkatársai (van Ieperen et al., 2000).

Zwieniecki és munkatársai (Zwieniecki et al., 2001) az ionkoncentrációnak a xylem hidraulikus ellenállására gyakorolt hatását vizsgálták úgy, hogy KCl vizes oldatot áramoltattak keresztül *Laureus nobilis* ágszegmensén. A nedváramlás mértéke 2.5-szeresére nőtt, midőn a KCl koncentrációja 0-tól 50 mM-ig változott. Amikor a KCl oldatot ionmentes vízre cserélték az áramlás sebessége visszaesett a kezdeti értékre. Mivel a vízáramot hajtó erő a kísérlet során állandó volt, így a vízáramlásban bekövetkező változások a xylem hidraulikus ellenállásában bekövetkező változásait tükrözik. A KCl mellett más oldatokat is keresztüláramoltattak a szegmensén (NaCl-t, KNO₃-t és CaCl₂-ot), s hasonló eredményt kaptak. Ezzel szemben az áramlást nem befolyásolták a hasonló koncentrációjú, nem disszociálódó oldatok (szacharóz, ethanol). Az ion-kapcsolt áramlás-növekedést nem befolyásolta sem az, ha forró vizet áramoltattak keresztül a szegmensén, sem az, ha a kimetszés előtt folyékony nitrogénben fagyasztották a törzseket. Ezek a kísérletek azt mutatták, hogy nem az élő sejtek okozzák a megfigyelt xylem-ellenállás változásokat. 19 zárwatermő, 5 tűlevelű növényen és 3 páfrányon is sikerült kimutatni az ionhoz kötött áramlásnövekedést.

Az ionhoz köthető áramlásnövekedés dinamikája nagyon hasonló a hidrogélek duzzadásának és zsugorodásának dinamikájához (Beebe et al., 2000), ami azt sugallja, hogy a megfigyelt xylem-ellenállás változások szabályozása hasonló módon történik.

Zwieniecki és munkatársai (Zwieniecki et al., 2001) egyedi xylem-elemeken is mérték az áramlást és azt tapasztalták, hogy az ionok hatása a xylem-ellenállásra csak edény-edény összefüggésben érvényesül. Individuális *Fraxinus americana* xylem-elemken átáramoltatott oldat esetében semmilyen hatása nem volt az ionkoncentrációnak. Ezzel szemben a szomszédos edények erős választ mutattak a 100 mM-os KCl oldatra. Az edények között keresztül folyó víznek át kell haladnia a gödörkék membránján. A víz ezen az akadályon a cellulóz-fibrillumok, hemicellulóz és pektin alkotta mátrix mikrocatornáin keresztül jut át. Kis változás a mikro-catornák sugarában szignifikáns változást okoz a hidraulikus ellenállásban. Ezek közül a sejtfallösszetevők közül a pektinnek ismert gél-szerű tulajdonsága. Zwieniecki és munkatársai feltételezik, hogy az ionok hatására bekövetkező pektin-mátrix zsugorodás okozza a gödörkemembrán vízzel szembeni ellenállás-csökkenését.

Korábban az ionok hatását a xylem hidraulikus ellenállására csupán kis biológiai jelentőségű, metodológiai problémának tekintették, jóllehet ez a jelenség alapvetően hozzájárulhat a növényen keresztüli vízáramlás szabályozásához. Például egy olyan ionfüggő mechanizmus, amely megváltoztatja a xylem hidraulikus ellenállását, lehetővé teszi a növények számára, hogy kompenzálják a kavitáció okozta ellenállás növekedést.

5.2. A növények nedvaramlásának mérésére használatos módszerek áttekintése

Felmerül a kérdés, hogy az elektromos potenciálkülönbségek változásáért mennyiben felelnek a nedvaramlás változásai. A kérdés megválaszolásához valamilyen módszerrel meg kell határozni a nedvaramlás sebességét is.

Ahol teljes növények, egyes ágak, hajtások transzspirációjának mérésére van szükség, a nedvaramlás mérési eljárások (sap flow measurement - SFM) nagy előnyben vannak a többi technikákkal szemben. A nedvaramlás mérési eljárásokat könnyen lehet automatizálni, így a növényi vízfelhasználás folyamatos regisztrálása nagy időbeli felbontással valósítható meg. Ezzel szemben a transzspiráció meghatározása porométeres sztomatikus vezetőképesség mérésekkel munkaigényesebb és viszonylag kisebb időbeli felbontást nyújt. Nagy körütekintésre van szükség, amikor sztomatikus vezetőképesség mérésekből számítanak transzspirációs rátákat a levelekre és összegzik ezeket lombozatra vagy fakoronára. A porometria nagy előnye, hogy a levél korából, a megvilágításból, a határreteg vezetőképességéből eredő változásokról is számot ad. Egész növények transzspirációjának mérésére növénykamrákat is lehet alkalmazni, még egészen nagyméretű fák esetén is. A növénykamrák azonban nem hordozhatók, valamint – ez az igazán kritikus – megváltoztatják a növény mikroklímáját. Az SFM-et ezzel szemben bárhol lehet használni és nagyon kis zavart okoz az állományban. Izotóp (pl. deutérium) nyomkövetéses eljárást szintén lehet alkalmazni teljes növények transzspirációjának mérésére, de az adatokat nehéz értelmezni és csak többnapos periódusok középértékét adja eredményül.

A növényi vízfelhasználás az élőhelyen a talajvízmérlegből becsülhető, de az időbeli felbontás a legjobb esetben is csak néhány nap, és további nehézségek adódnak abból, hogy a vízelvezetés és felszíni elfolyás becslése általában bizonytalan. A mikrometeorológiai eljárásokat, mint például a Bowen-hányados technika és az Eddy-kovariancia, jobb időbeli felbontással lehet használni az evapotranszspiráció mérésére, de ezek a módszerek bonyolultak, a felszerelés drága, és csak széles sík területeken, egységes terepen alkalmazhatók. Mind a vízmérleg, mind a mikrometeorológiai eljárások képesek becslést nyújtani az evapotranszspirációra, mely magában foglalja a talaj párologtatását és a növény vízfelhasználását, míg a nedvaramlás mérési eljárások egyedül a transzspirációt mérik. Ennélfogva a nedvaramlás mérési technikák jól használható eszközök a földfelszín víz vagy energia háztartásának tanulmányozásában, mivel felhasználhatók a növény és a talaj evapotranszspirációjának szétválasztásához, valamint az elegyes állományok transzspirációjának az egyes elegendő fajok közötti szétosztásához is.

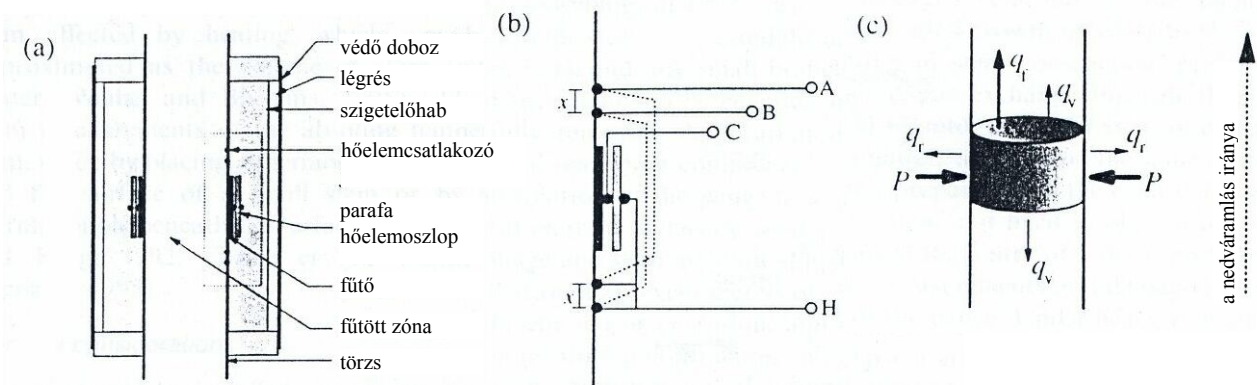
A nedvaramlás mérési módszereknek számos alkalmazásuk van a mezőgazdaságban, kertészetben, erdőszetben és az ökológiában. Nedvaramlás mérési eljárást alkalmaznak például a szántóföldi termények, kerti gyümölcsösök, erdőszeti telepítések, természetes vegetációk által felhasznált víz mennyiségének meghatározásához. Felhasználják őket arra is, hogy megvizsgálják a genetikai hatásokat és a feldúsuló széndioxid hatását a termények vízfelhasználására, valamint, hogy meghatározzák, mennyiben befolyásolja a talajvíz csökkenése a fák vízfelvételét. Ilyen eljárásokat használtak állományok vízviszonyainak, fák energiaháztartásának, és a fák transzspirációjára ható légköri turbulenciák hatásának tanulmányozásában is. E példák alapján látható, hogy a nedvaramlás mérési eljárások alkalmazása a növények vízfelhasználásának tanulmányozásában egyre inkább elterjedt, széleskörűvé válik, olyannyira, hogy valószínűleg kiemelkedő szerepet fognak játszani azon jövőbeni törekvésekben is, amelyek arra irányulnak, hogy megoldást találjanak azokra a hidrológiai problémákra, amelyekkel a gazdálkodók, erdőszetkezesek és vízügyi hatóságok szembetalálják magukat.

A következőkben a legfontosabb és legáltalánosabban használt nedváramlás mérési technikák alapelveit ismertetem.

5.2.1. A törzs(szár)-hőegyensúly eljárás (SHBM – stem heat balance method)

A törzs(szár)-hőegyensúly eljárás mind fás szárú, mind lágyszárú növények esetében használható a nedváramlás mérésére. Alkalmazható kis átmérőjű szárazon, valamint vékonyabb faágakon és kis fák törzsén.

Eszköz leírás



5.1. a-c. ábra. (a) A mérőeszköz vertikális keresztmetszete; (b) a hőelem párok kapcsolása; (c) az eszköz által fűtött törzs-szakasz hőegyensúlya, ahol P fűtési hő, q_v a vertikális áramlási hővesztesség, q_r a radiális áramlási hővesztesség, q_f a nedvaram hőfelvétele (Smith és Allen, 1996 nyomán)

Amint az 5.1. ábrán látható a törzs(szár)-hőegyensúly mérő tartalmaz egy hajlékony, tipikusan néhány cm széles fűtőt, amely körbeburkolja a törzset. A fűtő körbe van kerítve egy réteg parafával. E körül egy réteg szigetelőhab és egy alumíniummal burkolt PVC védőlemez található. Sorba kötött hőelem csatlakozók párpai vannak beágyazva a parafa sávba, hogy egy hőelemoszlopot alkossanak; minden párból egy csatlakozó a parafa belső felületére van helyezve, míg a másik a külső felületére, így ez a hőelemoszlop méri a radiális hőmérsékleti gradienst a fűtőtől távolodva (ΔT_r). A mérő még tartalmaz egy másik hőelem készletet, mely két pár hőelem csatlakozót tartalmaz. Ezek a hőelemek a törzs felszínével szemben vannak elhelyezve, és a törzs tengelyirányában vannak sorba rendezve, úgy, hogy minden egyes párból egy csatlakozó a fűtő felett, egy pedig a fűtő alatt helyezkedik el eltolt elrendezésben (1b. ábra). A két hőelem pár méri a ΔT_a és ΔT_b hőmérsékleti gradienseket, amelyeket a törzs hőegyensúlyának számításához használnak. A nagyobb műszerekben a ΔT_a -t és a ΔT_b -t több helyen mérik a törzs körül, párhuzamosan kapcsolt hőelem készletekkel.

Működési elv

A fűtő által körülvevett törzs teljes területét melegítik. A nedv tömegáramát a fűtött és fűtetlen törzsszakaszok hő-fluxusának mérlegéből nyerik. A törzset körbevevő szigetelő hab és védő lemez eléggé kiterjed a fűtő fölé és alá ahhoz, hogy a külső hőmérsékleti gradienst minimalizálja a törzs fűtött szakaszán keresztül, és elhanyagolható szintre csökkenti a nap törzsmelegítő hatását. A törzsszakasz hő inputja az árammal ellátott fűtőre (P) van korlátozva, ahogy az 1c-n látható, és a törzs hőegyensúlya a következő:

$$P = q_v + q_r + q_f \quad (5.2.1.)$$

ahol q_v a törzsben való vezetésből származó vertikális hőveszteség, q_r a vezetésből származó radiális hőveszteség, q_f a mozgó nedváram hőfelvétele. A q_f a fenti egyenletből kiszámítható. A P -t a fűtő elektromos ellenállásából és a rákapcsolt feszültségből lehet kiszámítani, míg a q_v -t és q_r -t a ΔT_a , ΔT_b és ΔT_r méréséből lehet meghatározni. Végül a q_f értéket nedv tömegárammá kell átszámítani.

A q_v értéket a fűtőtől fölfelé és lefelé kialakuló hőmérsékleti gradiensből számítják ki, egy dimenziós hőáramra alkalmazott Fourier-törvény segítségével. Ezeknek a gradienseknek az összege számtanilag megegyezik a $(\Delta T_a - \Delta T_b)$ értékkel, így a q_v a következő egyenletből nyerhető:

$$q_v = A_{st} k_{st} \left(\frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{x} \right), \quad (5.2.2.)$$

ahol A_{st} a törzs fűtött részének keresztmetszet-területe, k_{st} a törzs hővezető képessége és x a két hőelem-csatlakozó távolsága a fűtő mindkét oldalán (ld. 1b. ábra). A k_{st} értéket általánosan az irodalomból veszik: $0.42 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a fás szárú, $0.54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a lágyszárú növényekre.

A törzs hőegyensúly radiális komponense, a q_r , a ΔT_r -ből határozható meg a következők szerint:

$$q_r = K_{sh} \Delta T_r, \quad (5.2.3.)$$

ahol K_{sh} a fűtőt körülvevő anyagok burkának hatásos hővezető képessége. A K_{sh} értéke ismeretlen, függ a szigetelő burk hővezető képességétől és a törzs (szár) átmérőtől. Rendszerint megváltozik minden új telepítéskor, és így ki kell számítani a ΔT_r -ből és a törzs hőegyensúlyának más komponenseiből az alatt az időszak alatt, amikor a nedváramlás, és így a q_f , zérus.

Mihelyt a törzs (szár) hőegyensúlyának összes komponense ismert, a nedv tömegárama (F_m) a következőképpen számítható:

$$F_m = \frac{2q_r}{c_s (\Delta T_a + \Delta T_b)}, \quad (5.2.4.)$$

ahol c_s a nedv fajlagos hőkapacitása és a $(\Delta T_a - \Delta T_b)/2$ a nedv hőmérséklet növekedése a fűtőn keresztül, feltételezve azt, hogy a nedv melegezése radiálisan egyenletes.

Néhány szerző azt tapasztalta, hogy hiba léphet fel a mért nedváramlás sebességekben törzs hőegyensúly mérőműszer használatakor, ha figyelmen kívül hagyják a törzs fűtött részének hőtárolásában bekövetkező változásokat. Ezeknek a hibáknak a mértéke a törzsmérővel együtt növekszik, de kevésbé fontosak olyankor, amikor a transzspiráció napi sebessége ismert, mivel a hőtárolás változása egy napon keresztül zérus. Egy plusz tagot kell hozzáadni a hőegyensúly egyenletéhez, mely számot ad a hőtárolás változásairól (q_s). A q_s -t úgy lehet meghatározni, hogy mérni kell a törzs hőmérsékletének változását (ΔT_{st}) egy meghatározott időszakon belül (Δt):

$$q_s = c_{st}^v V_{st} \frac{\Delta T_{st}}{\Delta t}. \quad (5.2.5.)$$

A c_{st}^v koeficiens a törzs szöveteinek térfogati fajlagos hőkapacitása, melyre irodalmi értékek vannak míg a V_{st} a fűtött törzsrész térfogata. ΔT_{st} -t a törzs abszolút hőmérsékletének méréséből lehet megbecsülni.

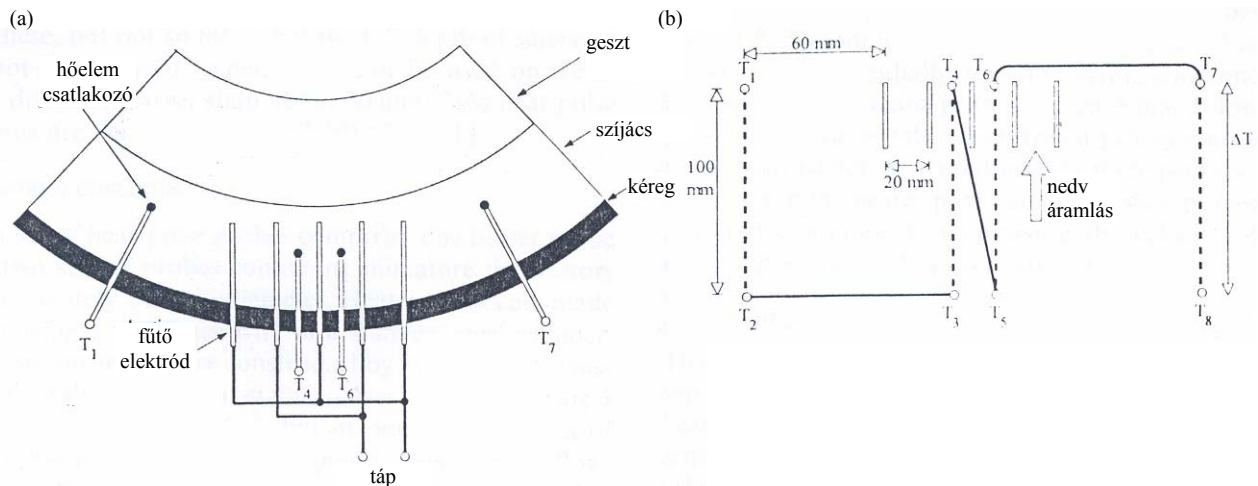
5.2.2. Törzs-szektor hőegyensúly eljárás (TSHBM – trunk sector heat balance method)

A törzs-szektor hőegyensúly eljárás a törzs(szár)-hőegyensúly eljáráshoz hasonlóan azon alapszik, hogy a fanedváramlás sebességét a fűtött szövet hőegyensúlyából határozzák meg.

Bár a törzs-szektor hőegyensúly eljárás esetében a törzsnek csak egy szegmensét fűtik belülről, s nem a törzsfelszínt a teljes kerület mentén.

Eszközleírás

A törzs-szektorot öt, fába ültetett, rozsdamentes acél lemezelektróddal fűtik, ahogyan ezt a 5.2. ábrán lehet látni, amelyek négy szegmenst hoznak létre a szíjácsban. Mindegyik lemezelektród 0.9mm vastag, 25mm magas és egymással párhuzamosan, 20mm-es hézaggal vannak behelyezve. A lemezek hossza úgy van megválasztva, hogy nagyjából megegyezzen a szíjács radiális szélességével. Négy darab, 1mm átmérőjű fém szondába ágyazott réz-konstantán hőelemet ültetnek a törzs szíjácsába az elektródok tetejével egy szintben, úgy, hogy kettő a két belső szíjács-szegmens közepén, kettő pedig a külső elektródoktól 60mm távolságra, a szélen helyezkedik el (2.a-b ábra). A hőelemek összehasonlító végei ugyanabban a törzs-szegmensben helyezkednek el, axiálisan 100 mm-rel az elektródok felső vége alatt, kívül a fűtött zónán (Cermák et al., 1982.). Mind a nyolc hőelem sorba van kötve. A két hőelemsor közötti függőleges távolságon keresztül mérik a hőmérséklet emelkedését a fűtött szektorban. Ezt a ΔT hőmérsékletemelkedést használják fel a fűtött szektor két középső szegmensén keresztüli nedváramlás mértékének kiszámításához.



5.2. a-b. ábra. A törzs-szektor hőegyensúly eljárás. (a) telepített mérőrendszer (horizontális keresztmetszet); (b) elektródelrendezés és a hőelemek kapcsolása (Smith és Allen, 1996 nyomán)

Működési elv

1.5 kHz-es váltóáramot vezetnek a fatörzsbe ágyazott öt elektródba, hogy az elektródok által határolt szíjácsszegmenseket felmelegítsék. A váltóáram táp használatával el lehet kerülni a szövetekben a (nem kívánt) elektrokémiai hatásokat. A törzset a sugárzástól elszigetelik és leárnyékolják, így a törzsrész hőegyensúlya a következő lesz:

$$P = q_v + q_r + q_l + q_f \quad (5.2.6.)$$

Itt a P a törzsszektorban hővé alakított elektromos energia, q_v a vezetésből származó vertikális hőveszteség; q_r a radiális hőveszteség (a befelé a nemvezető geszt és kifelé a kambium és kéreg irányába); q_l az oldalirányú hőveszteség (a szomszédos szíjácsrészek felé); a q_f pedig a konvekciós hőveszteség a mozgó nedvában. A q_f -ből határozzák meg a nedv tömegáramát a fűtött rész két központi szegmensére. A q_f -et a fenti egyenletből lehet meghatározni.

Kétféle mérőműszert alkalmaznak ezeknél a méréseknél: az első verzióban a P konstans, míg a másodikban a ΔT -t tartják állandó értéken a fűtőáram automatikus szabályozásával.

Mindkét rendszerben a P -t az alkalmazott áramerősségből és az elektródokon mért feszültségből határozzák meg; míg a q_f -t figyelmen kívül hagyják, mivel a szomszédos szegmenseket azonos hőmérsékletre fűtik, így oldalirányú hőmérsékleti gradiens nem jelentkezik. A fennmaradó vezetésből származó hővesztéseket (q_r és q_v) együttesen veszik számításba. A konstans energiájú rendszerben a q_v+q_r a következő egyenletből számítható:

$$q_v + q_r = K_{vr} \Delta T, \quad (5.2.7.)$$

ahol K_{vr} a hővezetési együttható, amelyet azalatt az időszak alatt határoznak meg, amikor nincs nedváramlás. K_{vr} értéket a szövetek és a fűtött zónát körülvevő szigetelőanyagok hővezető képessége, valamint a hőelemek közti távolság befolyásolja, így minden új telepítéskor meg kell határozni. Amikor a nedváramlás sebessége nulla $P=q_v+q_r$ ($q_f \approx 0$), így K_{vr} -t a következőképpen lehet meghatározni:

$$K_{vr} = \frac{P_0}{\Delta T_0}, \quad (5.2.8.)$$

ahol P_0 és ΔT_0 nulla nedváramlásnál mért értékek.

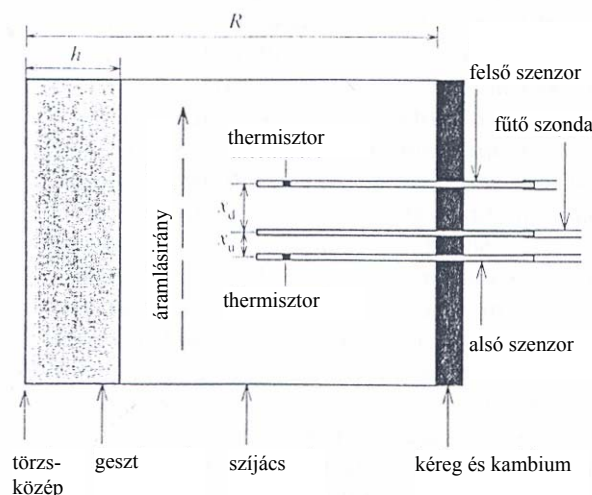
A többi komponenssel együtt a q_f -et is a hőegyensúly egyenletéből számítják, majd a fűtött zóna két középső szegmensén keresztülráamló tömegárammá alakítják:

$$F_{m,c} = \frac{q_f}{c_s \Delta T}, \quad (5.2.9.)$$

ahol c_s a nedv specifikus hőkapacitása, amelyet azonosnak vesznek a vízéval. $F_{m,c}$ értékét azután megszorozzák a két középső szegmens szélességének és a teljes törzskerületnek az arányával, hogy megbecsüljék a nedváramot az egész fára.

5.2.3. A hő-impulzus eljárás (HPM - heat-pulse method)

Ezzel az eljárással úgy lehet meghatározni a nedváramlás mértékét, hogy a mozgó nedv által szállított rövid hőimpulzus sebességét mérik. A fűtő és érzékelő szondákat a szíjácsba fűrt lyukakba kell helyezni, ezért csak azok a fák jöhetnek számításba, amelyek szíjácsa elég széles ahhoz, hogy magába foglalja a szondákat, de nem túl vastag ahhoz, hogy át ne ériék.



5.3. ábra. A hő-impulzus eljárás mérési elrendezése (Smith és Allen, 1996 nyomán)

Eszközleírás

Minden hő-impulzus szonda készlet tartalmaz egy fűtő szondát és két, kb. 1mm átmérőjű miniatűr termisztort magában foglaló érzékelő szondát. A fűtő szondák rozsdamentes acél hengerbe helyezett ellenállás drótból állnak, míg az érzékelő szondák termisztorait vagy teflon vagy rozsdamentes acél csőbe helyezik el. A 5.3. ábra egy készlet szonda elrendezését mutatja. A méréseket általában 4 készlet szondával végzik, úgy, hogy minden törzsnegyedbe installálnak egyet. Az általában 1.8-2.0 mm átmérőjű szondákat a törzsbe sugárirányban fűrt párhuzamos lyukakba helyezik az ábrán látható elrendezésben. A fűtő szondák rövid hő-impulzusokat bocsátanak ki periodikusan és az érzékelő szondák folyamatosan mérik az impulzusok sebességét, miként mozognak a nedvárammal.

Működési elv

A hő-impulzus eljárás során figyelembe kell venni, hogy a fatörzsben található rostok mátrixán, folyadékon és gázon keresztüli áramlás hőveszteséggel jár. Ezt a hatást a sebesség-megállapításnál kompenzálni kell. Ezt általában úgy érik el, hogy az érzékelő szondákat nem egyenlő távolságra helyezik el a fűtő szondától: a felső szondát távolabb helyezik el, mint az alsót. Az 1-2 másodperc hosszúságú hőimpulzus kibocsátása után, a hővezetés miatt, először az alsó szondán lesz nagyobb a hőmérséklet. A mozgó fanedv hőszállítása következtében azonban a felső szenzor hőmérséklete egy bizonyos - normális esetben 60 másodpercnél kevesebb - idő (t_e) múlva meg fog egyezni az alsóéval. A fanedváramlás sebességének növekedésével a t_e értelemszerűen csökken. Ezek szerint a hőimpulzus sebessége (v_h):

$$v_h = \frac{x_f - x_a}{2t_e}, \quad (5.2.10.)$$

ahol x_f a felső hőérzékelő szenzor és a fűtő szenzor közötti távolság, míg az x_a az alsó hőérzékelő szenzor és a fűtőszensor közötti távolság.

Marshall (1958) kimutatta, hogy fás növények esetében a v_h nem egyezik meg a nedváramlás sebességével. Kísérletei szerint a hő alacsonyabb sebességgel áramlik a fatörzsben, mint a nedv. Ennek oka az áramló nedv és a xylem edények, ill. tracheidák közötti szövetek közötti hőcsere. Hőmérsékleti szempontból homogén fákban, ahol a szállító elemek egyenlő távolságra vannak és a kötőszövetek vastagsága is elég kicsi ahhoz, hogy a fanedv és a faanyag-mátrix hőmérsékletének kiegyenlítéséhez szükséges idő elhanyagolható legyen, a nedváramlás sebessége (v_s) a következőképpen köthető a hőáramlás sebességéhez (v_h) Marshall szerint:

$$av_s = \frac{\rho_{sm} c_{sm}}{\rho_s c_s} v_h, \quad (5.2.11.)$$

ahol „a” a szíjács keresztmetszeti területének azon része, amit az áramló nedv elfoglal, ρ_s a fanedv sűrűsége, ρ_{sm} a fanedv és a faanyag-mátrix sűrűsége, c_s a fanedv hőkapacitása, c_{sm} a fanedv és faanyag-mátrix hőkapacitása. A szíjács egységnyi keresztmetszeti területére vonatkozó térfogati nedváram-sűrűség (u_v) a következő:

$$u_v = av_s, \quad (5.2.12.)$$

így a nedváram-sűrűség közvetlenül meghatározható a v_h értékek méréséből, ha az ρ_{sm} , ρ_s , c_{sm} és c_s értékek ismertek.

Mivel a fanedváramlás sebessége normális esetben a radiális mélységgel változik, a szenzorokat általában jóval a törzs kambiuma alá ültetik be, így meghatározható a nedváram-sűrűség radiális profilja a szíjácsban. A fanedv tömegárama (F_m) azután kiszámítható a szíjács keresztmetszeti területére vonatkozó fanedváram profil integráltjából (Green, Clothier, 1988):

$$F_m = \rho_s 2\pi \int_h^R r_d u'_v(r_d) dr_d, \quad (5.2.13.)$$

ahol $u'_v(r_d)$ a nedváram sűrűség (v_h korrigált értékéből számítva), mely a radiális mélység függvénye (r_d), R a sugár a kambiumnál, h pedig a geszt határánál. A $u'_v(r_d)$ függvény meghatározható a nedváram profilra illesztett másodrendű regressziós görbéből, vagy ha ez irreálisan magas értéket ad a kambiumnál, vagy a geszt határánál, akkor egy lépcsős függvény segítségével (Hatton et al., 1990).

Ezek alapján elmondható, hogy azoknál a fafajoknál, amelyeknél a szíjács hőmérsékletileg homogénnek tekinthető (puhafák, gyűrűs likacsú fák, vagy olyan szórt likacsú keményfák, amelyeknél a szállító edények közel helyezkednek el egymáshoz), a HPM kalibrálás nélkül használható a transzspiráció mérésére. Egyéb fák esetében, ahol az edények közötti kötőszövet vastagsága egy tapasztalati küszöbértéknél – 0.4 mm – kisebb (Swanson és Whitfield, 1981) tapasztalati kalibrációra kell támaszkodni, mivel a HPM eljárással mért nedváram gyakran alulbecsült (Green és Clothier, 1988).

5.2.4. A hődisszipációs eljárás (radiális hőárammérés)

A radiális nedváramlásmérő (Granier, 1985) 2 db hengeres, kb. 2mm átmérőjű szondát tartalmaz, amelyeket a fatestbe kell ültetni (5.4. ábra). Az alumíniummal borított hengerek általában 20 mm hosszúak, de rövidebb, vagy éppenséggel hosszabb szondákat is lehet használni. A felső egy konstantán ellenállás tartalmaz, és állandó teljesítménnyel van fűtve. Az alsó (referencia-) szonda nem fűtött, fahőmérsékleten marad. Mindegyik szonda tartalmaz egy réz-konstantán hőelemet. A rendszer a hőmérsékletkülönbséget méri. A két szonda közötti hőmérsékletkülönbséget ($\Delta T(u)$) a fanedv-áramlássűrűség (u) befolyásolja a fűtött szonda közelében. A szondák közötti távolság kb. 15 cm. Ez egy kompromisszumos távolság: elég nagy ahhoz, hogy a referencia-szonda direkt fűtését el lehessen kerülni, így a fahőmérsékletü marad, de elég kicsi ahhoz, hogy ne érvényesüljön a természetes hőmérsékleti gradiens hatása.

Amikor nincs nedváramlás (az éjszaka folyamán, amikor a párányomás egyenlő vagy majdnem egyenlő nullával), az összes energia szétoszlik a fa hővezetése következtében, így maximális hőmérsékletkülönbség alakul ki ($\Delta T(0)$). Amikor a fanedv áramlik a xylemben, ez a hőmérsékletkülönbség lecsökken, mivel a fűtött szondát az áramlás is hűti.

A mért adatok felhasználásával a következő képlet segítségével lehet kiszámítani a fanedváramlás-sűrűséget (Granier, 1985):

$$u = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\Delta T(0)}{\Delta T(u)} - 1 \right]^{1/\beta} \quad (5.2.14.)$$

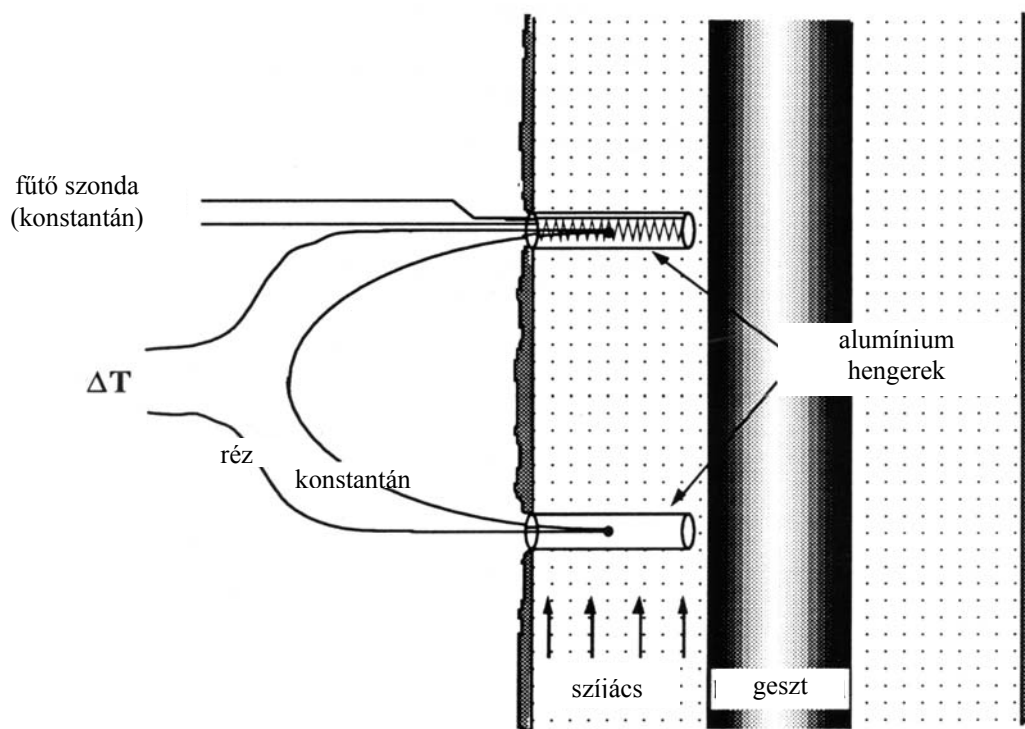
A fanedváramlás index $K = [\Delta T(0)/\Delta T(u) - 1]$, dimenzió nélküli szám.

Az α és β értékek megállapításához friss tő-, ág- és gyökér-részeket vizsgáltak meg laboratóriumi körülmények között. A mintadarabokra fanedváramlás-mérőt szereltek, és növekvő nyomású vizet áramoltattak keresztül rajtuk.

A fanedv-áramlást (F ($m^3 \cdot s^{-1}$)) a következő formula alapján kaphatjuk:

$$F = u \cdot SA \quad (5.2.15.)$$

ahol SA : a szíjács keresztmetszete a fűtött szonda magasságában (m^2).



5.4. ábra. A Granier-féle radiális nedvzárlás-mérő rendszersémája

A fanedvzárlás becsléséhez három esetet kell figyelembe venni aszerint, hogy milyen hosszú a szonda és milyen vastag a szíjács.

1. A szíjács hosszúság megegyezik a szonda hosszúságával. Ez a legideálisabb eset, a fanedvzárlás-mérő a teljes fanedvzárlást mér.
2. A szíjács szélesebb, mint a szonda. Ebben az esetben, a szonda csak egy részét mér a teljes fanedvzárlásnak. Ahhoz, hogy kiszámolhassuk a tényleges fanedvzárlást, szükségünk van az adott faj fanedvzárlás-sűrűség profiljára a sugár mentén.
3. A szíjács vastagság kisebb, mint a szonda hosszúsága. Ebben az esetben, a szonda átlagolja a szíjács (a fanedvzárlás-sűrűség = u) és a geszt (fanedvzárlás-sűrűség = 0) hőmérsékletét. Ezért a szonda "virtuális" fanedvzárlást mér (u'), amely alacsonyabb a ténylegesnél.

A szonda azon részének, mely a szíjácsba nyúlik, és a teljes szonda hosszúságának aránya nem lehet túl kicsi, mert ebben az esetben:

1. A bevitt energia legnagyobb része a geszt hővezetése miatt szétterjed, és csak egy kis részét szállítja el a nedvzárlás.
2. Áramlás jelenik meg a szonda szélé mentén, s ebben a zónában sugárirányú hővesztéssel kell számolni, amit nem lehet teljesen kiküszöbölni.

A Granier-féle tapasztalati módszer alapvető feltételezése, hogy a nedvzárlás-sűrűség egyenletében szereplő paraméterek nem függenek a fa karakterisztikájától, így a módszert kalibrálás nélkül is lehet alkalmazni. A módszer legnagyobb előnye, hogy könnyű a rendszer telepítése, egyszerűek a követelmények a regisztráló szenzorokhoz, a mérés alapján egyszerű a nedvzárlás becslés, valamint a legfontosabb, hogy alacsony költségű.

5.3. A termometriás nedváramlás adatsor spektrális elemzése

Az elektromos potenciálkülönbség méréssel párhuzamosan, 1999 júliusa és decembere között, fanedváramlás-sebesség mérést végeztem az 5.2 fejezetben ismertetett Granier-féle termometriás módszerrel, a 3. fejezetben leírt módon. A kapott termometriás adatokat hasonló módszerrel dolgoztam fel, mint az elektromos potenciálkülönbségeket (ld. 4. fejezet). A rövid periódusidejű idősor-elemzéshez 2 db minimum 6 napos mintát választottam ki, a hosszúperiódusú változások vizsgálatához pedig egy 3 hónapos (95 napos) adatsort állítottam össze (5.1-2. táblázat). Ez utóbbi adatsorban elszórva kb. 5 napnyi adathiány volt (a mintaadatsor 5,3%-a), amelyeket a hiányokat megelőző és követő napok adatsorainak átlagával pótoltam. A pótlások illeszkedését lineáris trend hozzáadásával javítottam, így a pótlás okozta torzítást minimalizálni tudtam.

Az adatsor vizsgálathoz a mért hőmérséklet adatokból csak a nedváramlással arányos „K” faktor lett meghatározva (Fenyvesi András – MTA ATOMKI – által), a konkrét sebességadatok nem, mivel a vizsgálat szempontjából nem annyira a fluxus nagysága, mint inkább a változása, a változás jellege és gyorsasága volt érdekes, s ezt a „K” görbék is ugyanolyan jól mutatják. (A 3.3. fejezetben ismertetett tapasztalati nedváram-sűrűség képlettel konkrét áramsűrűségeket is lehetne számítani, azonban ezek értéke nagyban függ attól, hogy milyen szakaszra és mit választunk $\Delta T(0)$ -nak. A feldolgozhatóság és az összevethetőség kedvéért Fenyvesi A. az egész mért adatsorra egyetlen $\Delta T(0)$ -t választott.) A mintaadatsorok mintavételi frekvenciája a rövidperiódusú elemzésnél a mérésnek megfelelő 5 perc, a hosszúperiódusú elemzésnél pedig 30 perc volt.

Kísérleti szakasz	Mintaszám	Dátum
II.	1.	1999.07.15-20.
	2.	1999.09.24.-10.03.
	3.	1999.07.15.-10.17.

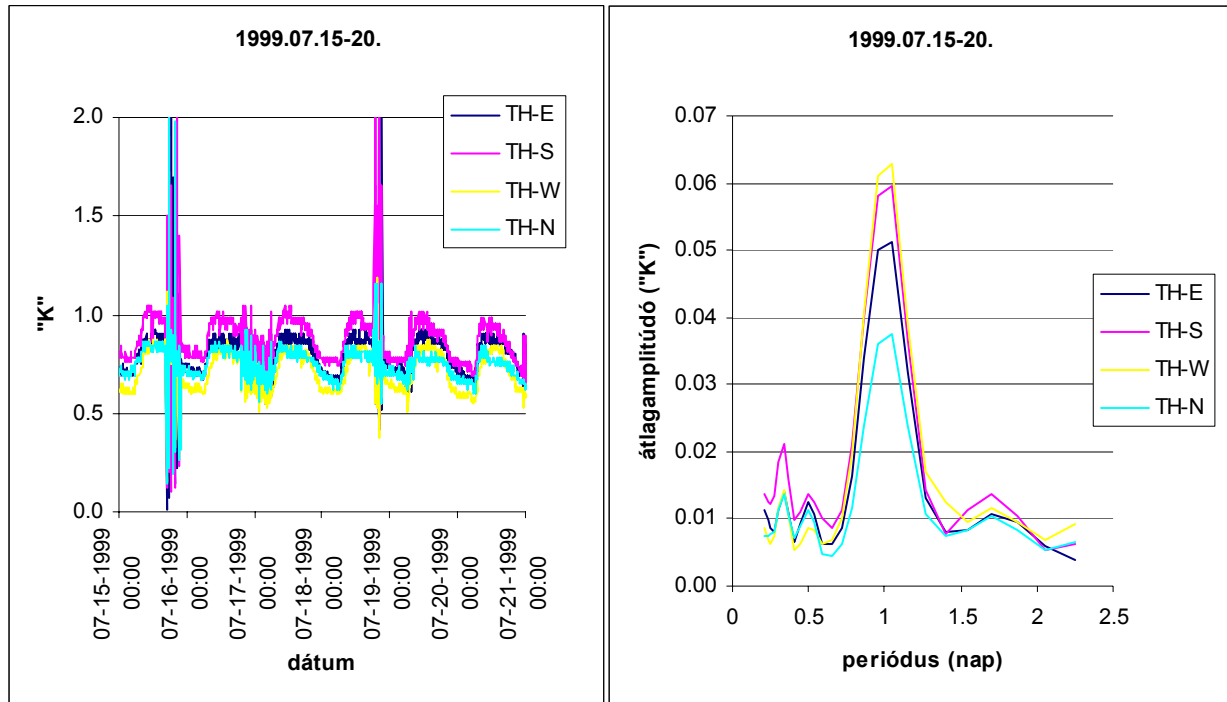
5.1. táblázat

minta sorszám	szűrő alsó határ (sec)	szűrő felső határ (sec)	digitális köz (sec)	szűrő sávszélesség	szűrő félhossz (periódus)
1,2.	18000	180000	300	1.1	4
3.	76000	3600000	1800	1.1	4

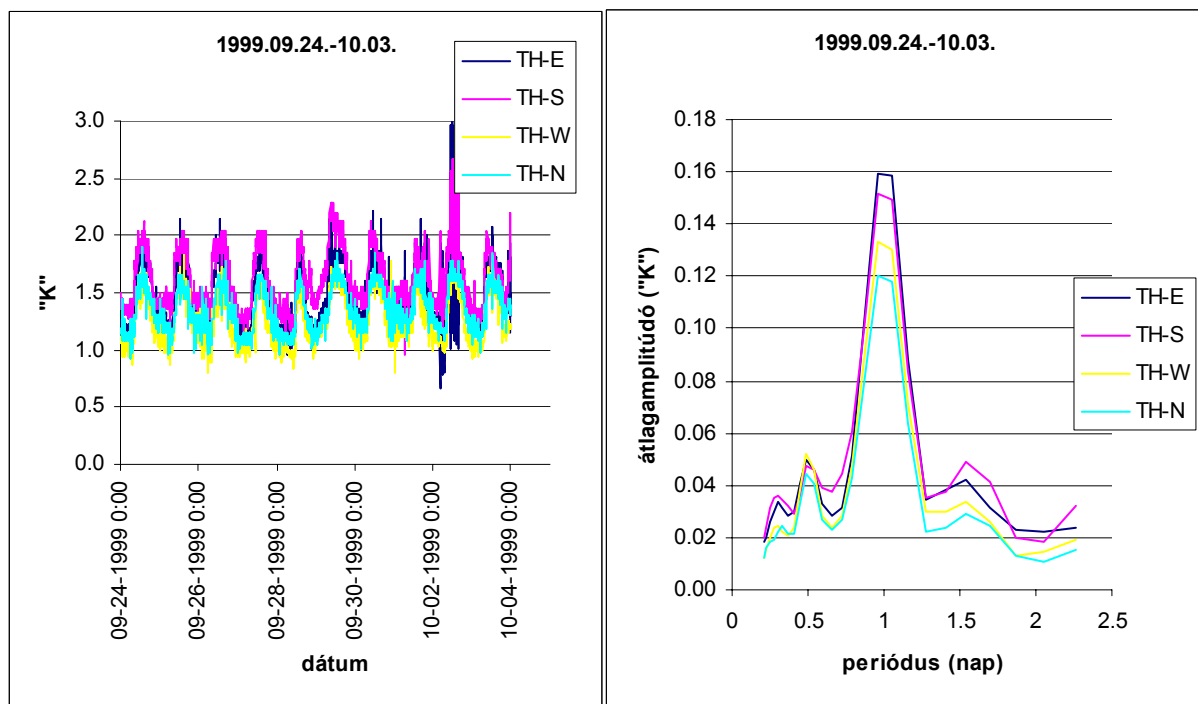
5.2. táblázat. Az 1-3. mintákhoz tartozó konvolúciós szűrőparaméterek

A rövidperiódusú változások vizsgálatához a szűrő alsó (5 óra) és felső (kb. 2 nap) határát úgy választottam meg, hogy a kapott spektrumok azt a tartományt öleljék fel, amelynél az elektromos potenciálkülönbségeknek a legjellemzőbb változásai figyelhetők meg.

A 5.5. és az 5.6. ábrákon látható, hogy a várakozásoknak megfelelően és az irodalmi adatokkal összhangban (Granier et al., 1994, Tognetti et al., 1996, és egy egyéb cikk hiv.), a fanedváramlás intenzitás legnagyobb energiájú változása a 24 órás változás. Az elektromos potenciálkülönbség adatsor elemzéseknél tapasztaltakhoz hasonlóan, a napi járás mellett ugyanúgy megfigyelhetők a periodogramokon a 12 órás és a 8 órás változások is, az 1 napos változásokénál jelenősen kisebb amplitúdóval (az 1. minta esetében a harmad napos változások markánsabban jelentkeznek, a félnapos változásokét meghaladó amplitúdóval).

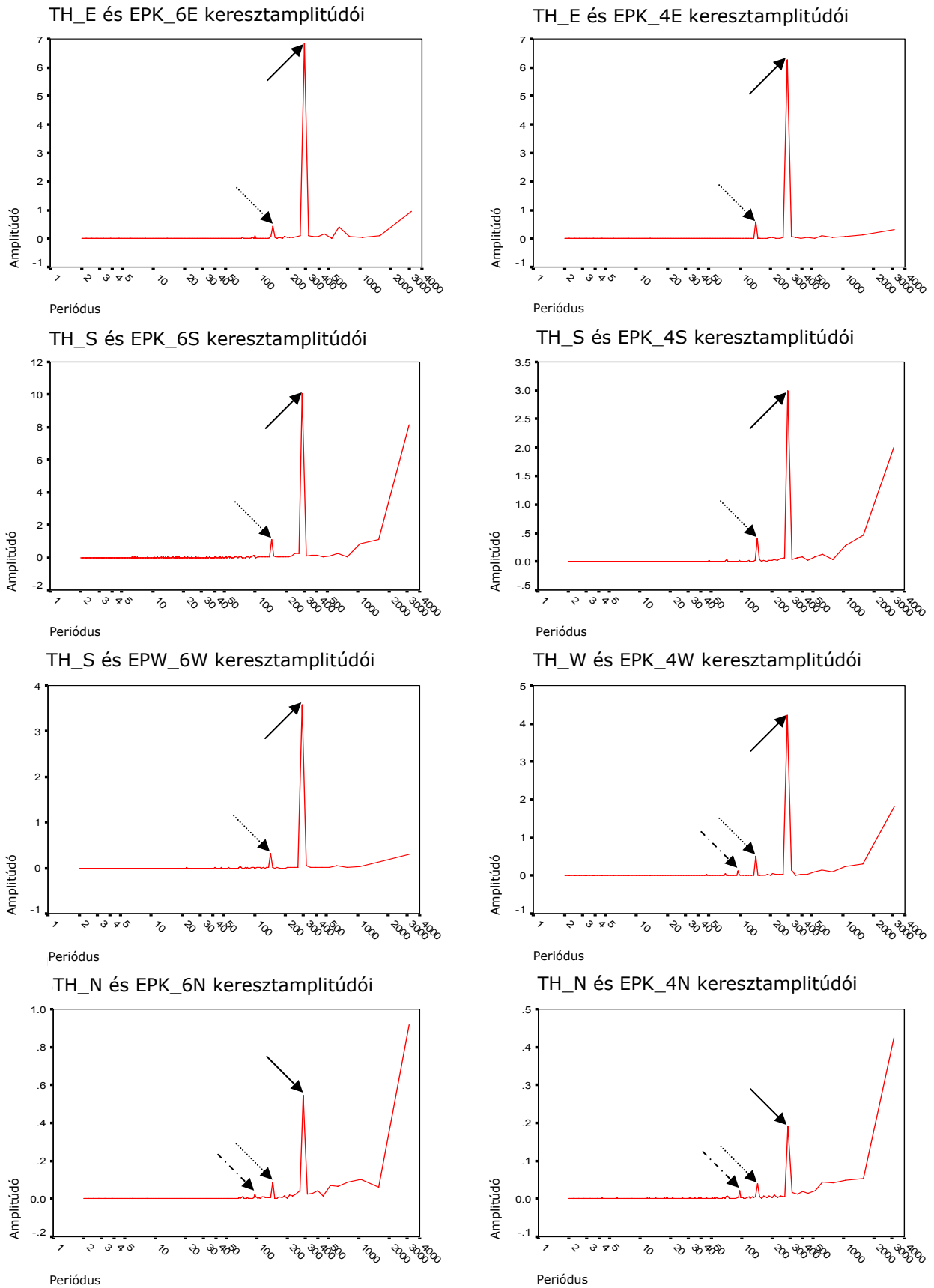


5.5. ábra. Az 1. termometriás minta adatsora és periodogramja



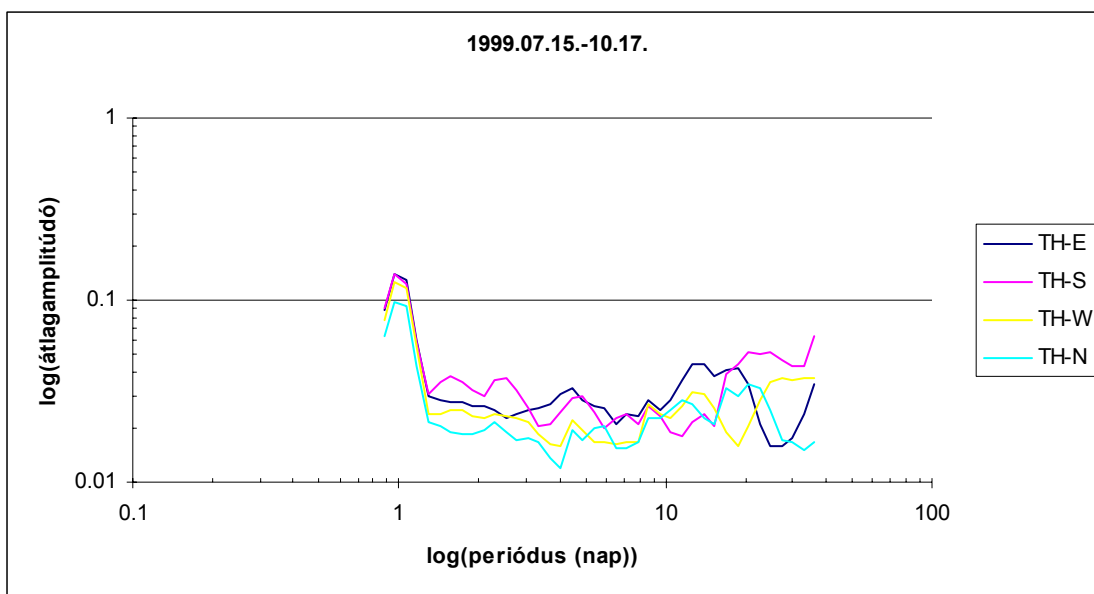
5.6. ábra. A 2. termometriás minta adatsora és periodogramja

Ezeket a jellemző periódusokat az 1999. 09.10-20. közötti időszakhoz tartozó termometriás és elektromos potenciálkülönbség adatsorok keresztspektrális elemzésével is sikerült kimutatni (5.7. a-h. ábra). Valamennyi ábrán jól megfigyelhető az 1 napos változás (a 288-as periódus értékhez tartozó csúcs: $288 \cdot 5 \text{ perc} = 1440 \text{ perc} = 1 \text{ nap}$) és a félnapos változás (a 144-es periódus értékhez tartozó csúcs). Némelyik (pl. az északi, valamint a 4m-es nyugati) csatornán tisztán kimutatható a 8 órás változás is (96-os periódus értékénél).



5.7. a-h. ábra. Az 1999.09.10-20. közötti időszakhoz tartozó termometriás és elektromos potenciálkülönbség adatsorok kereszt spektrumai

1 napos periódus
 12 órás periódus
 8 órás periódus

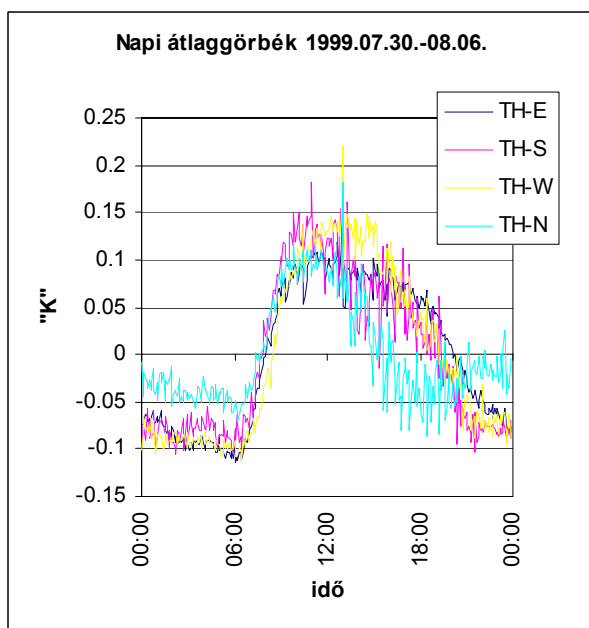


5.8. ábra. A 3. termometriás minta amplitúdóspektruma

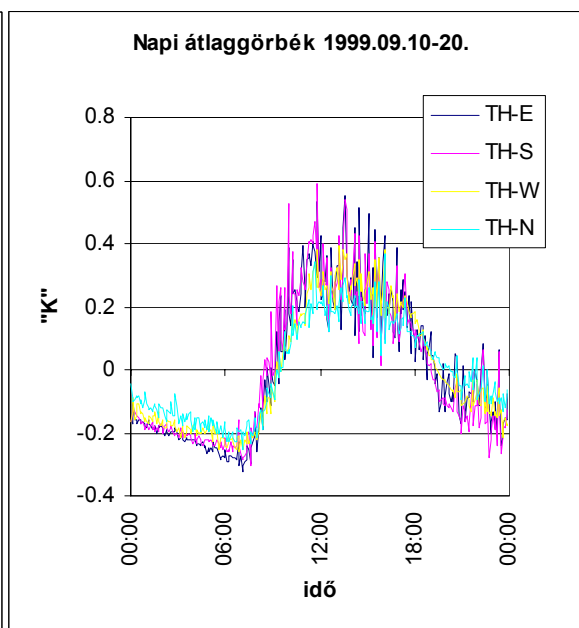
Az 5.8. ábrán a hosszúperiódusú elemzés eredménye látható. Mivel az adatsornak minimum 2 teljes periódus kell tartalmazni, így megbízhatóan a max. 1 hónapos változások mutathatók ki. A kapott eredmény ebben az esetben is hasonló az elektromos potenciálkülönbség adatsor elemzésénél kapotthoz, azaz a logaritmikus léptékű spektrumon a legnagyobb amplitúdóval az 1 napos változás jelentkezik, az e feletti periódustartományban nem található hasonló energiájú, karakterisztikus, valamennyi csatornán egyformán jelentkező változás.

5.3.1. A napi járás vizsgálata

Ha két kiválasztott időszak (1999.07.30.-08.06. és 1999. 09.10-20.) centrált napi



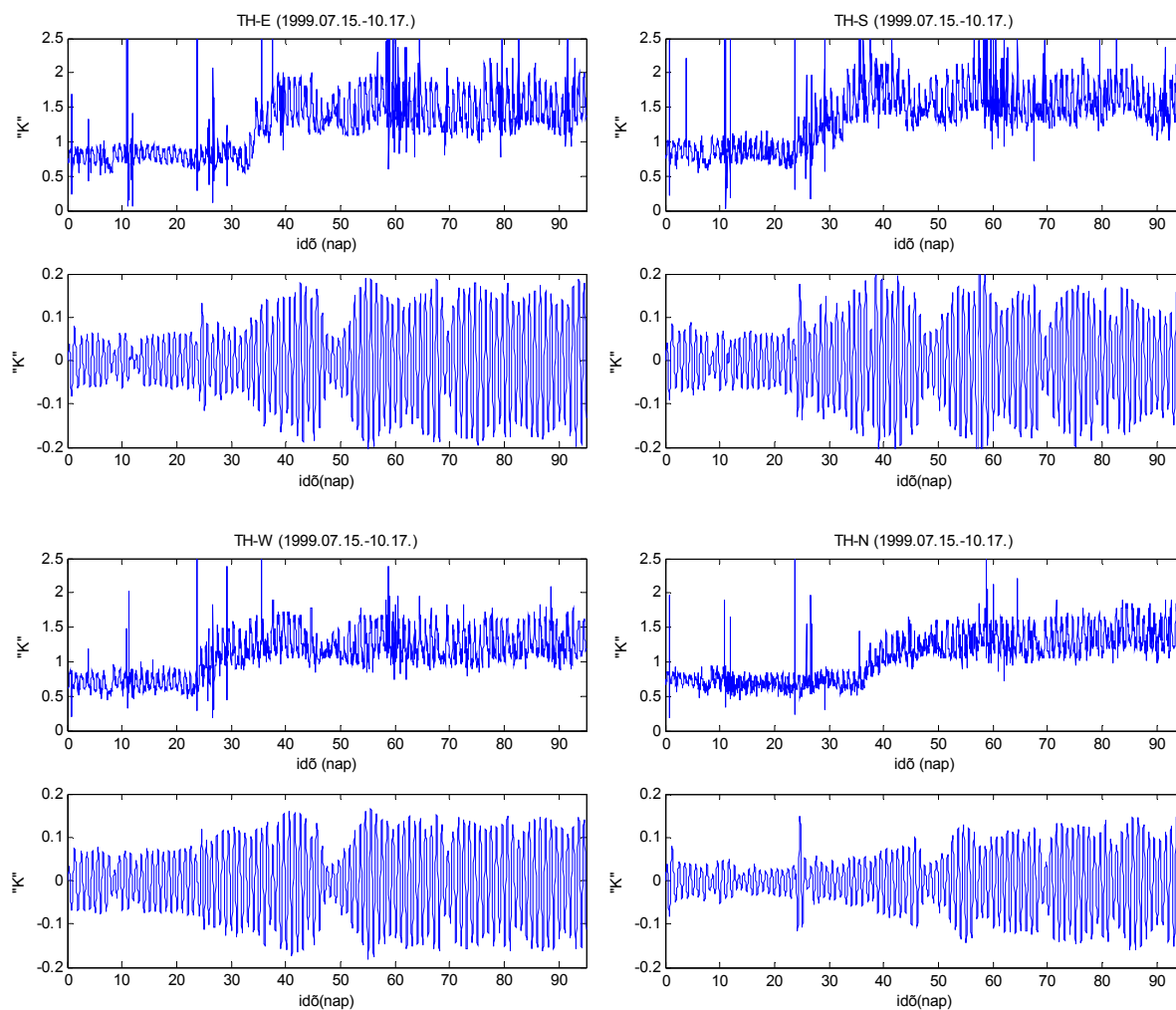
5.9. ábra. Az 1999. 07.30-08.06. időszakhoz tartozó termometriás napi átlaggörbék



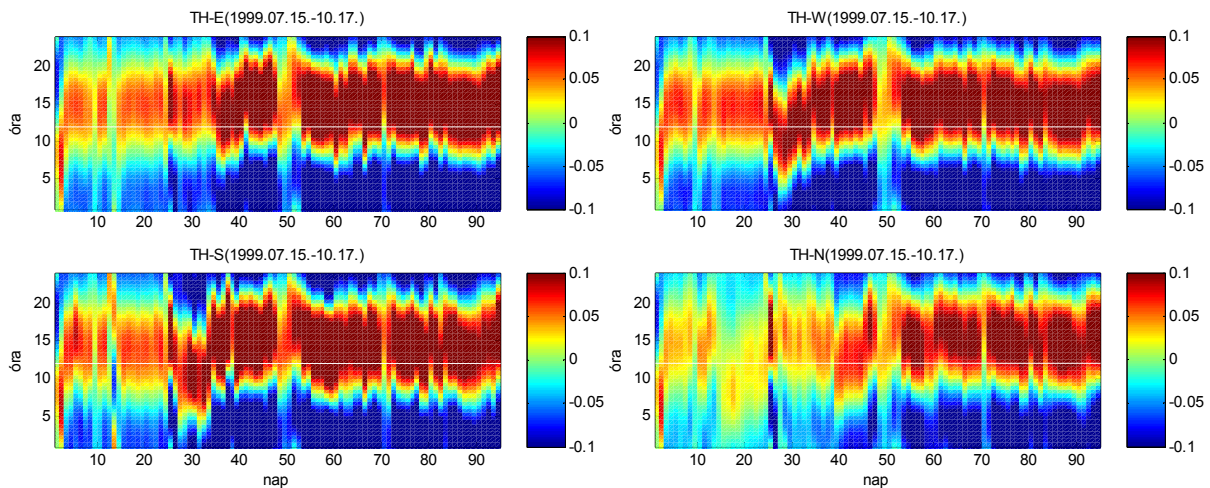
5.10. ábra. Az 1999. 09.10-20. időszakhoz tartozó termometriás napi átlaggörbék

átlaggörbéit (5.9.-5.10. ábra) megtekintjük, azt láthatjuk, hogy a karakterisztikus napi járás minimuma hajnali 6-7 óra táján van. A napi minimumot követően a nedvzárlás intenzitása meredeken nő, s a déli órákra (10-12 óra) eléri a maximumot. Az intenzitás a körülményektől (levegő vízpotenciál, talaj víztartalma, stb.) függően hosszabb-rövidebb ideig (2-5 óra hosszan) maximális marad, ezt követően előbb meredeken (este 19-20 óráig), majd egyre lassuló ütemben fokozatosan csökken. Ez a lefutási görbe megfelel az irodalmakban leírt (például Szalai I., 1994) jól ismert transzspirációs görbéknek.

A 4.2. fejezetben leírtakhoz hasonlóan megvizsgáltam, hogy a leghosszabb egybefüggő termometriás adatsorban (3. minta: 1999.07.15.-10.17.) változnak-e ill. hogyan változnak a napi maximum- és minimumhelyek. Ehhez első lépésben Butterworth IIR szűrővel leválasztottam a 24 órás (a 23 és 25 óra közötti) változásokat az adatsorról (5.11.a-d. ábra), majd ebből egy 48×95-ös mátrixot készítettem, ahol az oszlopvektorok egy-egy nap adatsorát tartalmazzák (5.12.a-d. ábra). A négy különböző kitétséghez tartozó adatsorokon a maximum- és minimumhelyek a napi átlaggörbék vizsgálatánál leírtaknak megfelelően (déli maximum, éjszakai-hajnali minimum) helyezkednek el, s jelentős fáziseltolódás (esetleg fázisátfordulás) sem figyelhető meg (az első két nap maximumának pár órával korábbra tolódása a Butterworth szűrő felfutási hibájából ered).



5.11. a-d. ábra. Az 1999.07.15.-10.17. közötti időszakhoz tartozó „K” nedvzárlás intenzitás index adatsorok és a szűrt 24 órás periódusú adatsorok

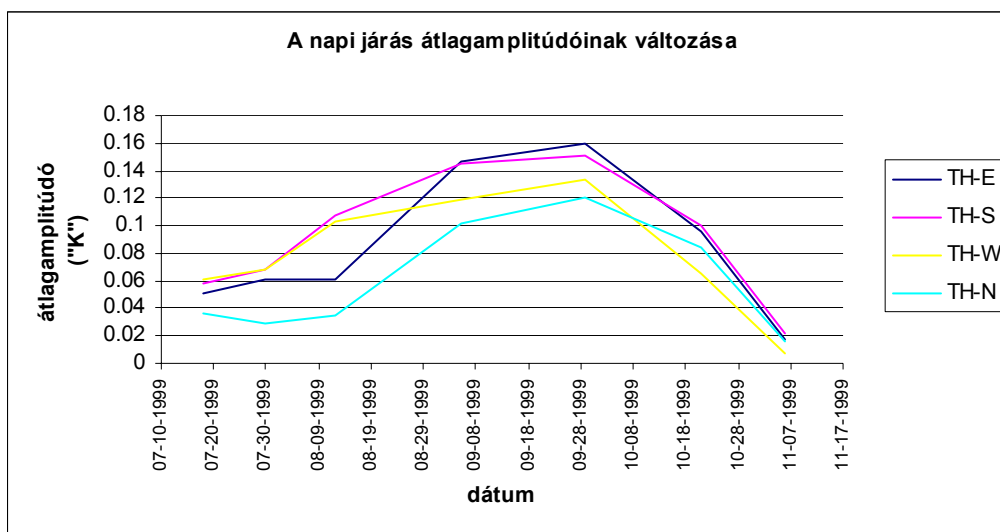


5.12. a-d. ábra. Az 1999.07.15.-10.17. közötti időszak 24 órás változásai

A 5.11. ábra szűrt (24 órás) adatsorain jól látszik, hogy a napi járás amplitúdója jelentősen változik. Ennek szemléltetésére a termometriás adatsorból kiválasztottam 7 db, min 5 napos intervallumot (5.3. táblázat), amelyeket a 4. fejezetben ismertetett konvolúciós szűrő technikával feldolgoztam. Így megkaptam az adott időszakokra jellemző napi változások átlagamplitúdóit (5.13. ábra).

Kísérleti szakasz	Dátum
II.	1999.07.15-20.
	1999.07.24.-08.05.
	1999.08.08-15.
	1999. 08.03-07.
	1999.09.24.-10.03.
III.	1999.10.20-24.
	1999.11.03-10.

5.3. táblázat. Az 1 napos ingadozás amplitúdójában bekövetkező változások meghatározásához kiválasztott időszakok

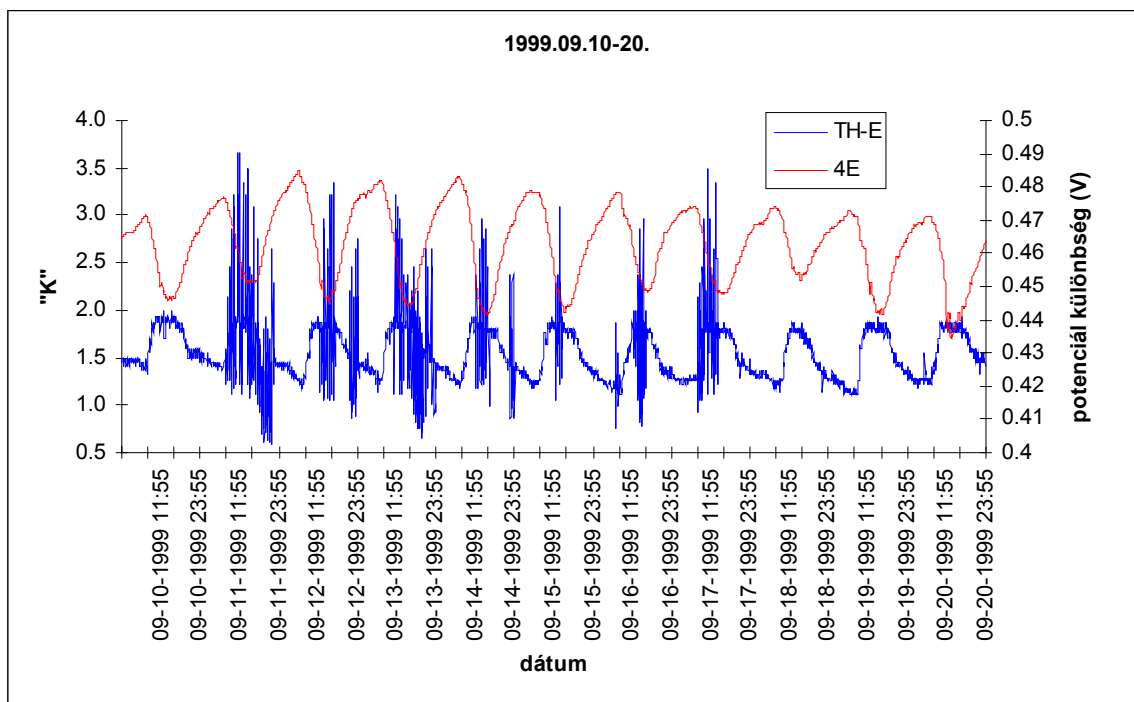


5.13. ábra. Az 1 napos járás átlagamplitúdójának változása a termometriás adatsorban (1999.07.15.-11.15.)

Az ábrán jól látszik, hogy a július végi szárazabb időszakot alacsonyabb fanedvaramlási sebesség jellemezte. Az augusztusi csapadékok hatására intenzívebbé vált a fa anyagcseréje, transzspirációja, jelentősen megnőtt a nedvaramlás sebessége. A vegetációs időszak végének közeledtével, a lombhullással, az áramlási sebesség fokozatosan lecsökkent.

5.4. Az elektromos potenciálkülönbség és a termometriás adatsorok összehasonlítása

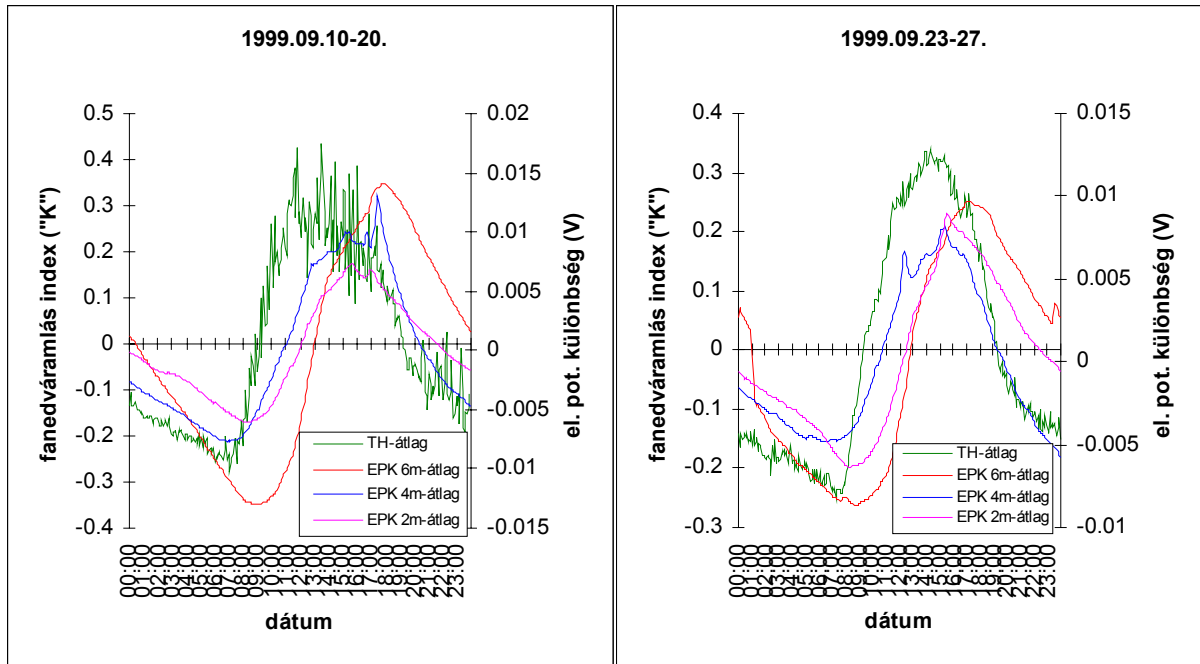
Az elektromos potenciálkülönbség és a termometriás adatsorokat közös diagramon ábrázolva (5.14. ábra: a keleti termometriás adatsor és a 4m-es keleti elektromos potenciálkülönbség adatsor) nyilvánvalóvá válik, hogy a két görbe lefutása nagyon hasonló, s megállapítható, hogy valószínűleg a két görbe között szoros negatív korreláció áll fenn (Koppán et al., 2000c).



5.14. ábra. Az 1999. 09.10-20. közötti időszakhoz tartozó termometriás és elektromos potenciálkülönbség napi átlaggörbék

Még szemléletesebben ábrázolható az összefüggés, ha a napi átlaggörbéket ábrázoljuk (5.15.-5.16. ábra; az összehasonlítás kedvéért az elektromos potenciálkülönbség adatsor inverzét ábrázoltam).

A részletes összehasonlító elemzést az 1999. 09.10-20. közötti időszakra végeztem el, 5 perces mintavételezési gyakoriságú adatsorokon (csatornánként 3168 adat). Az elektromos potenciálkülönbség adatsorok közül a talajszinti csatornák adatsorait a vizsgálatból kizártam, mivel a másik három szint csatornáihoz képest jelentősen eltértek, zajtartalmuk kimagasló volt (a napi járás amplitúdóját meghaladó energiával). A rossz adatok oka az volt, hogy a fa a vizsgálat kezdete óta eltelt időszak alatt körbenőtte az elektródokat, s a vezetőket a kéreg letolta az elektródokról. (A 6m É-i rövidekkel a vizsgálati időszak előtt lett kicserélve, valamint az előző okok miatt a 4m-es É-i és K-i is bizonytalan volt, így az ezekre a csatornákra vonatkozó vizsgálati eredmények megkérdőjelezhetők.)



5.15. ábra. Termometriás és elektromos potenciálkülönbség napi átlaggörbék (1999.09.10-20.)

5.16. ábra. Termometriás és elektromos potenciálkülönbség napi átlaggörbék(1999.09.23-27.)

A kapcsolat szorosságának számszerűsítéséhez korrelációelemzést végeztem az 1999.09.10-20. közötti időszakra (olyan időszakot választottam, amikor mind a két adatsor hiánytalanul rendelkezésemre állt, valamint nyugodt, napsütéses idő volt a jellemző) (5.4. táblázat, „•”-tal jelölt oszlopok).

	TH_E			TH_S			TH_W			TH_N		
	•	*	**	•	*	**	•	*	**	•	*	**
TH_E	1.000	1.000	1.000									
TH_S	0.842	0.916	0.922	1.000	1.000	1.000						
TH_W	0.781	0.928	0.936	0.816	0.941	0.962	1.000	1.000	1.000			
TH_N	0.715	0.918	0.927	0.742	0.903	0.927	0.862	0.969	0.972	1.000	1.000	1.000
EPK_6S	-0.186	-0.246	-0.578	-0.274	-0.366	-0.721	-0.324	-0.360	-0.664	-0.271	-0.326	-0.611
EPK_6W	-0.228	-0.310	-0.835	-0.163	-0.213	-0.796	-0.353	-0.396	-0.873	-0.349	-0.428	-0.854
EPK_6N	-0.184	-0.252	-0.247	-0.318	-0.434	-0.426	-0.313	-0.358	-0.347	-0.233	-0.288	-0.282
EPK_6E	-0.152	-0.215	-0.682	-0.113	-0.160	-0.685	-0.268	-0.315	-0.749	-0.292	-0.376	-0.756
EPK_4S	-0.360	-0.509	-0.629	-0.443	-0.618	-0.753	-0.520	-0.613	-0.698	-0.425	-0.541	-0.621
EPK_4W	-0.387	-0.542	-0.604	-0.463	-0.637	-0.701	-0.546	-0.637	-0.675	-0.450	-0.566	-0.597
EPK_4N	-0.113	-0.174	-	-0.240	-0.374	-	-0.186	-0.246	-	-0.110	-0.151	-
EPK_4E	-0.514	-0.710	-0.831	-0.427	-0.577	-0.748	-0.670	-0.773	-0.856	-0.626	-0.782	-0.847
EPK_2S	-0.308	-0.412	-0.679	-0.172	-0.222	-0.535	-0.385	-0.428	-0.657	-0.414	-0.503	-0.703
EPK_2W	-0.313	-0.426	-0.700	-0.301	-0.404	-0.707	-0.437	-0.495	-0.697	-0.372	-0.457	-0.694
EPK_2N	-0.318	-0.429	-0.577	-0.357	-0.478	-0.643	-0.421	-0.472	-0.599	-0.339	-0.409	-0.530
EPK_2E	-0.187	-0.256	-0.273	-0.301	-0.413	-0.426	-0.282	-0.324	-0.327	-0.193	-0.239	-0.244

5.4. táblázat. Pearson-féle korrelációs együtthatók (1999.09.10-20.)

- az eredeti adatsorok korrelációs együtthatói;
- * a szűrt termometriás adatsorokkal számított együtthatók;
- ** a szűrt termometriás adatsorokkal, eltolás után számított együtthatók

A termometriás adatsorokhoz tartozó Pearson-féle korrelációs együtthatók értékei ha nem is kirívóan magasak, de mindenképpen erős kapcsolatot mutatnak. Ez és a korábban ismertett idősorelemzések alapján elmondható, hogy a négy termometriás csatorna a vizsgált

időszakokban nagyon hasonlóan viselkedett, az egymáshoz képesti variabilitás jelentősen kisebb, mint az elektromos potenciálkülönbség adatsoroknál. Ez utóbbiaknál a változékonyság legvalószínűbb oka a vizsgált fa szerkezeti inhomogenitása, valamint az a tény, hogy az elektromos potenciálkülönbség mérés sokkal érzékenyebb a környezet zavaró hatásaira (csapadék, shunt jelenség, lélegelektromos zavarok stb.), mivel az elektródok nem voltak leszigetelve. Mindezek ellenére a 5.14. ábrán jól látszik, hogy a vegetációs időben a termometriás görbék és a potenciálkülönbség görbék jellege nagyon hasonló.

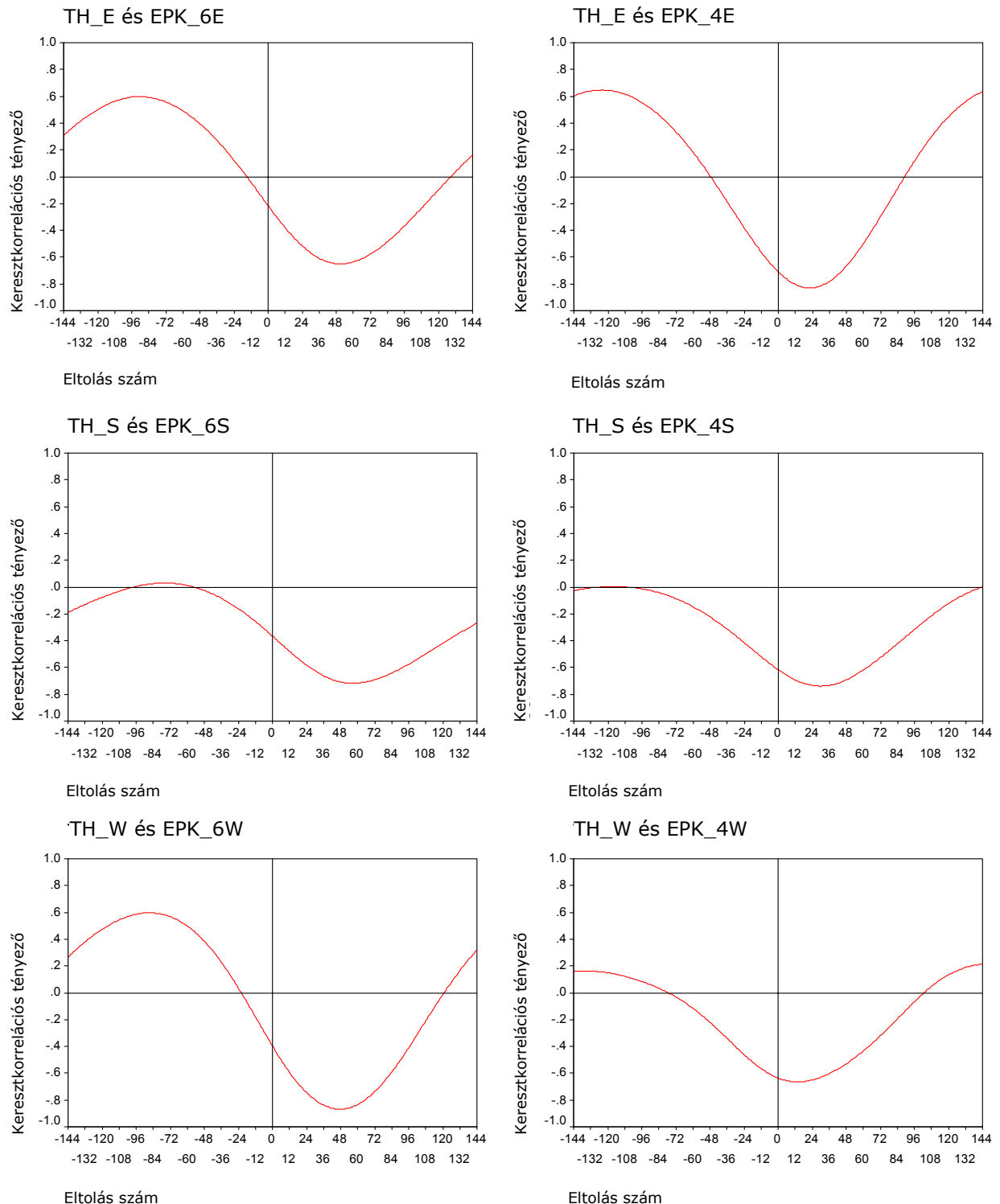
Az égtájaknak megfelelő elektromos potenciálkülönbség és termometriás adatsorok korrelációs koefficienseinek azonban sok esetben meglepően alacsony az értékük (pl. a koefficiens -0.113 –től -0.670 -ig változott a vizsgált időszakban). Az együttthatók alacsony értékének egyik oka az, hogy a választott időszakban a fanedváramlás index („K”) görbéken jó néhány nagy intenzitású, a napi járás amplitúdóját 2-3-szorosan meghaladó mértékű csúcs, „spike” található (ld. 5.15. ábra).

A termometriás adatsorokon megfigyelhető legnagyobb tüskék mind a 4 csatornán azonos időben jelentkeznek. Ez azt mutatja, hogy ez a jelenség független a transzspiráció napi járásától, tehát mindenképpen valamilyen külső eredetű hatásra vezethető vissza. Ezek a tüskék Fenyvesi és munkatársai (1998) szerint a kavitáció jelenségével függnek össze. A kavitáció során az embolizált edények körül radiális vízpotenciál-gradiens alakul ki, amely lehetővé teszi azt, hogy a szomszédos edényekből, szövetekből víz áramoljon a levegő tömítette edényekbe. Ha ezek a környező szövetek elegendő vizet tárolnak és a radiális hidrodinamikai ellenállás elég magas, illetve valamekkora küszöb-energia szükséges ahhoz, hogy a víz az edényekbe lépjen, akkor impulzus-szerű vízmozgás léphet fel a vízpotenciál-kiegyenlítődés (relaxáció) közben. Amennyiben az eltömődött edények környezetében nincs elegendő mennyiségű víz, a kérdéses tüskék nem jelennek meg és az edények rövid idő alatt véglegesen eltömődnek.

Ezeknek a gyors, nagyenergiájú változásoknak a hatására az elektromos potenciálkülönbség és termometriás adatsorok között fennálló kapcsolatot a korrelációelemzés a ténylegesnél gyengébbnek mutatta. Emiatt a termometriás adatsort megszürttem egy Butterworth IIR aluláteresztő szűrővel úgy, hogy a küszöbfrekvenciát $4.630 \cdot 10^{-5}$ Hz-nek választottam, azaz a kb. 6 óránál kisebb periódusidejű – gyors – változásokat leválasztottam az adatsorról (a szűrés miatt a kapott adatsorok 2 óra 40 perccel eltolódtak az eredeti „K” adatsorokhoz képest, ezt utólag korrigáltam). Az eredményül kapott fanedváramlás index adatsorokkal újra elvégeztem a korrelációanalízist (5.4. táblázat „*”-gal jelölt oszlopai). Az így kapott együttthatók valamennyi esetben magasabbak az eredetiéknél: a termometriás csatornák esetében $0.903 - 0.969$, az elektromos potenciálkülönbség adatsorok esetében pedig -0.160 és -0.782 között változnak.

A kiszűrt csúcsok melletti másik fontos kapcsolatgyengítő tényező a termometriás és az elektromos potenciálkülönbség adatsorok között jelentkező fáziseltolódás (Koppán et al. 2002), amelyet jól szemléltetnek az 5.15. és 5.16. ábrák: a szintátlagok a termometriás görbék átlagához képes esetenként több órás eltérésben vannak. Hogy meghatározzam a pontos időeltolódást, először számba vettem, milyen az egyes termometriás adatsorok egymáshoz képesti eltolódása. Keresztkorrelációs elemzéssel megállapítottam, hogy a vizsgált időszakban a déli termometriás adatsorhoz (TH-S) képest a keleti (TH-E) kb. 20 perccel, a nyugati (TH-W) mintegy 35 perccel, az északi (TH-N) kb. 40 perccel késik. A TH-S-t referenciának véve szintén keresztkorrelációs elemzéssel meghatároztam az elektromos potenciálkülönbség adatsorok időeltolódását (5.17. a-f. ábra és 5.5. táblázat). Az elemzéssel meghatározott idővel eltolt adatsorokra újból meghatároztam a korrelációs együttthatókat (5.4. táblázat „**”-gal jelölt oszlopai). Látható, hogy ez az eljárás tovább javította a kapcsolatok szorosságát: a termometriás adatsorok egymás közötti koefficiensei $0.922 - 0.972$, míg az elektromos potenciálkülönbségekkel kapcsolatosak -0.244 és -0.873 között változnak.

A fáziseltolódással kapcsolatban érdemes megjegyezni, hogy a legkisebb mértékű eltolódás a 4 m-es szint csatornáin esetében van, ennél nagyobb a 2 m-es szint csatornáinál, míg a legnagyobb mértékű késés a 6 m-es szint csatornáinál tapasztalható.



5.17. a-f. ábra. Az 1999.09.10-20. közötti időszak termometriás és elektromos potenciálkülönbség adatsorok keresztkorrelációs görbéi (az időeltolódás mértéke = Eltolás szám * 5 perc)

A késésnek többféle oka lehet. Valószínű, szerepet játszik benne az a tény, hogy két különböző fán végeztük a kísérleteket (abból a megfontolásból, hogy a termometriás mérés ne zavarja az elektromos potenciálkülönbség mérését). De egy lehetséges magyarázat az is, hogy

a fanedv iontartalma változik a napszakok során. Ez jelentősen befolyásolhatja az elektromos mérést, míg a termometriás mérésnél jóval kisebb a szerepe.

<i>EPK-6E</i> 4:35	<i>EPK-4E</i> 2:10	<i>EPK-2E</i> 2:10
<i>EPK-6S</i> 4:45	<i>EPK-4S</i> 2:25	<i>EPK-2S</i> 3:25
<i>EPK-6W</i> 4:30	<i>EPK-4W</i> 1:45	<i>EPK-2W</i> 3:05
<i>EPK-6N</i> 0:50	<i>EPK-4N</i> -	<i>EPK-2N</i> 2:55

5.5. táblázat. A TH-S, mint referencia-adatsor és az elektromos potenciálkülönbség adatsorok közötti időeltolódás (óra:perc)(1999.09.10-20.)

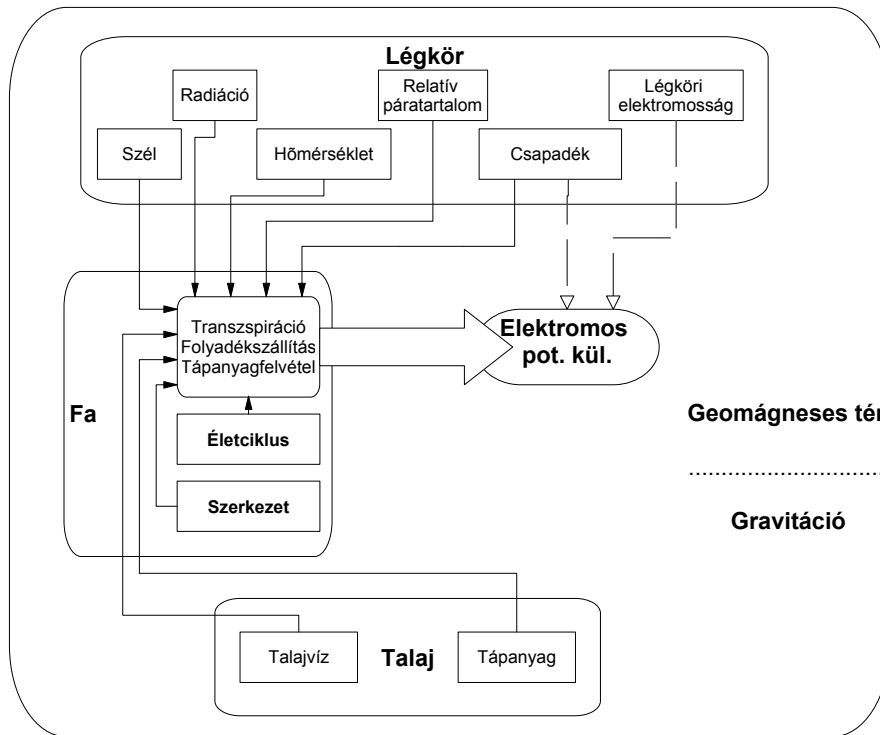
Összegzés

- a spektrális elemzés kimutatta a 24, a 12 és a 8 órás változásokat. A napi járásnak évszakos változása is van.
- A fanedváraamlás intenzitása („K”) és az elektromos potenciálkülönbség között kimutatható szignifikáns kapcsolat áll fenn.
- A nedváraamlás intenzitás és az elektromos potenciálkülönbség adatsorok között fáziseltolódás van. Az eltolódás mértéke eltérő a különböző szinteken.

A nedváraamlás és az elektromos potenciálkülönbségek fáziskülönbségének magyarázatára a nedv elemtartalmának pontos ismerete nélkül csak hipotéziseket lehet felállítani. Az 6.2. fejezetben ismertetem, hogy a fatörzs xylem-elemeiben a nedv ionkoncentrációja a magassággal változik (Dambrine et al., 1992). Amennyiben a transzspiráció miatti áramlás következtében a különböző magasságokban más és más időpontban következik be a nedv felhígulása ill. besűrűsödése, akkor a lokális vezetőképesség eltérő változása magyarázatul szolgálhat a szintekhez kapcsolódó fáziseltolódásra.

6. Az elektromos potenciálkülönbségek kapcsolata a belső folyamatokkal és a környezeti tényezőkkel

Az elektromos potenciálkülönbség és a nedvzárlás vizsgálata önmagában is sok információt szolgáltat, de teljesebb, átfogóbb kép az ok-okozati viszonyok, azaz a fa – elektromos potenciálkülönbség – környezeti tényezők közötti kapcsolatrendszer feltárásával nyerhető. A korábbi kísérletünk és az irodalmak alapján erről a kapcsolatrendszerről felállítottunk egy előzetes modellt, amit a 6.1. ábra szemléltet.



6.1. ábra. Előzetes modell az elektromos potenciálkülönbséget befolyásoló tényezőkről

A kezdeti feltételezés az volt, hogy elsősorban az életfolyamatok (transzspiráció, vízszállítás, ásványi anyagfelvétel és szállítás) felelősek az elektromos potenciálkülönbség kialakulásáért. A környezeti tényezők vagy közvetve (az életfolyamatokon keresztül) befolyásolják az elektromos potenciálkülönbségeket, vagy közvetlen hatásuk van. Ebből a megközelítésből egyes meteorológiai tényezőknek, mint a hőmérsékletnek, relatív páratartalomnak, radiációnak és szélnek közvetett, a transzspirációt és a nedvzárlást befolyásoló hatása van. Közvetlen hatást tetelezhetünk fel a légköri elektromos potenciálgradiensről (például zivatartevékenység alatt). A közvetlen hatásokat, mivel magáról a fáról nem nyújtanak információt, ebben a rendszerben zajnak tekinthetjük.

Felmerült a gondolat, hogy a mágneses tér esetleges (akár közvetett) hatását is ki lehet mutatni az elektromos potenciálkülönbségekben, ezért a modellbe a földi mágneses tér paramétereit is bevettem. Hasonlóképpen bevontam a vizsgálatba az ár-apály keltő erők okozta gravitációs gyorsulásváltozás adatsort is, mivel Burr (1944) 27 napos ciklusokat mutatott ki az elektromos potenciálkülönbség adatsorában, amelyeket a Hold hatásával hozott összefüggésbe.

A következőkben a modell alapján a következőkben az elektromos potenciálkülönbségeket létrehozó, az életfolyamatokkal összefüggő, elektrokémiai jelenségeket ismertetem, majd az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti tényezők kapcsolatrendszerének elemzését mutatom be.

6.1. Az elektromos potenciálkülönbség kialakulása

Az 5.1. fejezetben részletesen ismertettem a vízzállítás modelljét. A hajtóerő a talaj és a levegő vízpotenciálja közötti különbség, mely szívóerőt a különböző ellenállások csökkentik. A kezdeti modell alapján az az elképzelésünk alakult ki (amelyet a vonatkozó irodalmak – pl. Fensom és Morat munkái – megerősítettek), hogy a fánedv (mely lényegében ionokat tartalmazó oldat, tehát elektrolit) áramlása gyenge áramot hoz létre a fában. A következőkben tekintsük át, hogy mik azok a fizikai-kémiai jelenségek, amelyek az áram, s azon keresztül a potenciálkülönbségek kialakulásához vezetnek.

6.1.1. Elektrokinetikai jelenségek, áramlási potenciál

Az elektrokinetikai jelenségek során vagy különböző halmazállapotú anyagok mozdulnak el egymáshoz képest elektromos tér hatására, vagy megfordítva: a relatív elmozdulás hoz létre elektromos feszültséget vagy áramot. A jelenségek alapvetően négy csoportra oszthatók:

- Elektroforézis, mely abban áll, hogy folyadékban lebegő apró, szuszpendált vagy kolloidális részecskék, amelyek pl. ionok adszorpciója révén pozitív vagy negatív töltéssel bírnak, külső feszültség hatására a katód vagy az anód felé vándorolnak.

- Az elektroozmózis abban különbözik az elektroforézistől, hogy külső feszültség hatására nem a szilárd fázis mozdul el, hanem a folyadék jön áramlásba az általa nedvesített likacsos falon vagy egy hajszálcsövön keresztül.

- Az áramlási potenciál (áramlási áram) az a feszültség (ill. áram), amely az elektroozmózis megfordításakor, azaz a folyadéknak likacsos falon vagy egy kapillárison való átáramoltatásakor a fal két oldala, ill. a kapilláris két vége között keletkezik.

- Az ülepedési potenciál (elektroforetikus potenciál) az elektroforézis megfordításakor, azaz a folyadékban szuszpendált részecskék mozgásakor, pl. ülepedéskor jelentkező feszültség.

Az elektrokinetikai jelenségek arra vezethetők vissza, hogy a két fázis határán a kb. 10^{-8} cm vastagságú szabályos vagy Helmholtz-féle kettősréteg helyett diffúz kettősréteg alakul ki: a réteg egyik fegyverzetét a szilárd test felületére adszorbeálódott negatív ionok, a másik fegyverzetet pedig a folyadéknak közelben levő pozitív ionjai alkotják, amelyek azonban a hőmozgás miatt diffúz eloszlásúak. A szilárd test elmozdulásakor a belső súrlódás miatt bizonyos vastagságú folyadékhártya a testhez tapad. Ha ennek a folyadékhártyának a vastagsága kisebb, mint a diffúz kettősréteg vastagsága, az elszakadt felületek között feszültség lép fel. Ez a feszültség az elektrokinetikai potenciál („ ζ -potenciál”).

Két általánosan használt egyenlet (a Helmholtz-Smoluchowski egyenletek) írja le a folyadékok elektrokinetikus mozgását szűk csövekben. Egy adott elektromotoros erő a következő folyadékáramlást idézi elő:

$$f = \frac{q\varepsilon\zeta}{4\pi\eta} \frac{E}{l}, \quad (6.1.1.)$$

ahol f az elektro-ozmotikus áramlás mennyisége (cm^3/s); q a kapilláris keresztmetszeti területe (cm^2); E az alkalmazott elektromotoros erő; l a kapilláris hossza; ε a folyadék dielektromos állandója; ζ a zéta potenciál; η a folyadék viszkozitása nyugalmi állapotban.

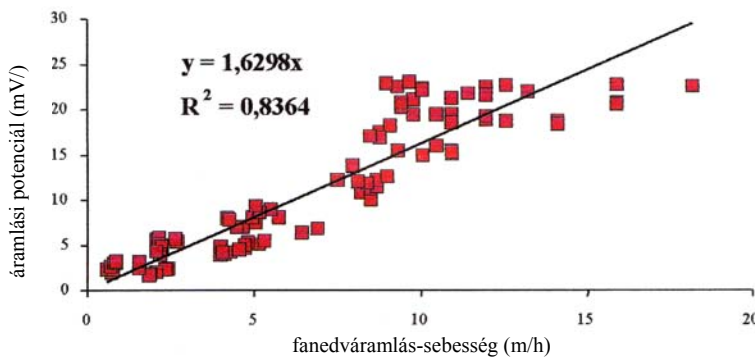
A következő az áramlási potenciál, ahol a nyomás hatására áramló folyadék elektromos potenciálkülönbséget hoz létre a folyadékoszlop két vége között:

$$V = \frac{\varepsilon \zeta p}{4\pi \eta \sigma}, \quad (6.1.2.)$$

ahol V az áramlási potenciál; p a nyomáskülönbség a kapilláris két vége között; σ a folyadék fajlagos vezetőképessége.

Lundegardh (1944) és Fensom (1957) számításokat végzett arra nézve, hogy mekkora elektromotoros erő szükséges ahhoz, hogy egy 150 cm-es szállító edényben a nedv 10 cm/óra nagyságú áramlási sebességet érjen el (elektrooszmózis). Az eredmény 4500 V volt. Ehhez képest másfél méteren belül fatörzsben a potenciálkülönbség ritkán haladja meg az 50 mV-ot. Fensom vizsgálta azt is, hogy mekkora áramlási potenciált képes létrehozni egy $2 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\Omega\text{m}$ fajlagos vezetőképességű elektrolit, melynek áramlási sebessége 10 cm/óra és 20 μm átmérőjű tracheákban áramlik. Számításai szerint ez mintegy 1mV nagyságú áramlási potenciált okozhat.

Az áramlási potenciál és az áramlást kiváltó nyomáskülönbség kapcsolatát vizsgálták Giardina és munkatársai (1976) mikor KCl oldatot áramoltattak át *Cucurbita sechium* szárszegmensen. Hasonló vizsgálatot végzett Gindl és Löppert (1998): állandó koncentrációjú K^+ és Ca^{2+} oldatot áramoltattak át levágott *Salix alba* L. ágakon (6.2. ábra). Ennek a kísérletnek az eredménye arra utal, hogy az elektromotoros erő és az áramlási sebesség aránya állandó, ha tiszta áramlás potenciálról van szó.



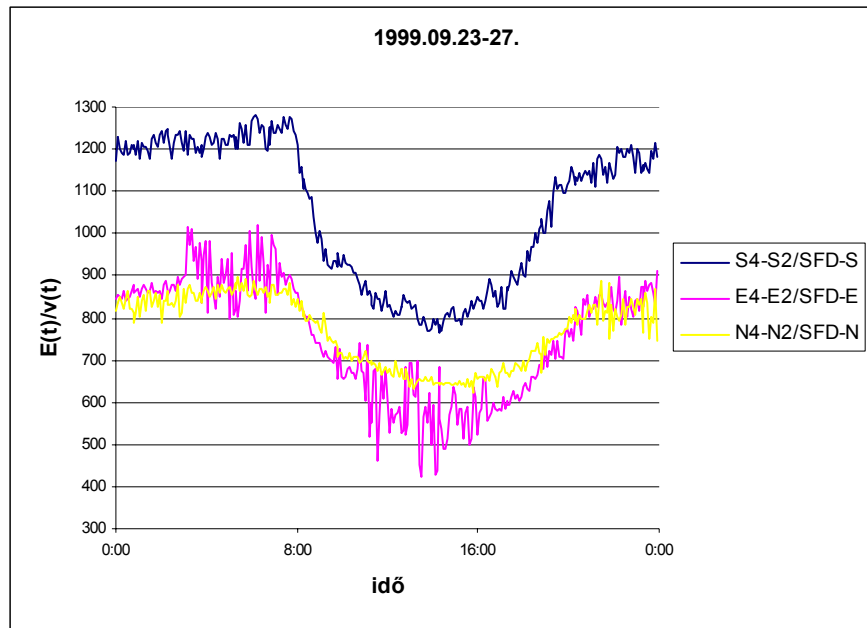
6.2. ábra. *Salix alba* L. hajtáson keresztüláramoltatott K^+ és Ca^{2+} oldat hatására jelentkező áramlási potenciál és az áramlási sebesség kapcsolata (Gindl és Löppert, 1998)

Az 5.1. fejezetben kitértem arra a jelenségre, hogy a xylem elemekben nem feltétlenül érvényes a Poiseuille-törvény. (Érdekes, hogy Giordano és munkatársai szerint [1978] az áramlási potenciál önmagában is képes előidézni eltérést a Poiseuille-törvénytől, megnövelvén a viszkozitást, jóllehet az ilyen hatás nem nagyobb általában, mint néhány százalék). Amennyiben mindezek ellenére feltételezzük, hogy a radiális fanedváramlás elhanyagolható és hosszanti irányú áramlásra érvényes a Poiseuille-törvény, akkor a szomszédos tracheákra ugyanaz az elektromotoros erő érvényes. Induljunk ki abból a feltételezésből, hogy az elektromotoros erőt tisztán az áramlási potenciál adja. Ekkor az elektromotoros erő és az áramlási sebesség aránya állandó.

$$\frac{|E(t)|}{v(t)} = \frac{8l\varepsilon}{r^2\sigma} \zeta, \quad (6.1.3)$$

ahol $E(t)$ két szint potenciálkülönbségének abszolút értéke (tér irányának figyelmen kívül hagyása). A $v(t)$ fanedváramlási sebesség értékeit a Granier-féle radiális fanedváramlásmérések adataiból számítottam. A 4 m-es és 2 m-es szintek közötti potenciálkülönbségek és az áramlási sebességek hányadosai a 6.3. ábrán láthatók.

A hányados görbéken jól megfigyelhető a jellegzetes napi periodicitás. A hajnali órákban enyhe emelkedés látható, majd 08 óra felé drasztikusan visszaesnek az értékek (amikor az áramlás a legintenzívebb) s csak napnyugta környékén kezdenek ismét növekedni. Amennyiben csak áramlási potenciálról van szó, akkor az ábra arra utal, hogy a transzspiráció



6.3. ábra. A 4 m-es és 2 m-es szint közötti elektromos potenciálkülönbség és a fánedváramlás-sűrűség hányadosa (1999.09.23-27.)

megindulása előtt a vezetőképesség a legkisebb. A transzspirációval a vezetőképesség nő. A xylem-nedv, mint elektrolit vezetőképessége úgy változhat meg, ha a nedvben változik az ionok koncentrációja (a legnagyobb koncentrációjú K^+ hatása a legvalószínűbb), valamint változik a hőmérséklet. A hőmérséklet a folyadék viszkozitásán keresztül hat a vezetőképességre, ugyanis a viszkozitás befolyásolja az ionok mozgékonyágát:

$$\sigma = F \sum |z_i| c_i u_i \quad \text{ahol} \quad u = \frac{ze}{6\pi\eta r}, \quad (6.1.4-5.)$$

F a Faraday állandó, z_i az i-dik ion vegyértéke, c_i az i-dik ion koncentrációja, u_i az i-dik ion mozgékonyága, illetve e az ion töltése, η a folyadék viszkozitása, r az ionsugár.

Ez alapján hajnalban-kora reggel alacsony hőmérsékletnél a leghigabb az erős elektrolitnak tekinthető xylem-nedv, míg később a hőmérséklet emelkedésével párhuzamosan besűrűsödik, azaz megnő az ionok koncentrációja. (A Gindl és Löppert féle kísérletben az állandó koncentrációjú oldat alkalmazása miatt mind a ζ -potenciál, mind a vezetőképesség konstans volt, ezért nem változott a görbe meredeksége.)

A fánedv összetételének és ionkoncentrációjának változása – kiváltképp, ha ezek a változások a fatörzs különböző pontjain eltérőek – koncentrációs potenciálok kialakulását is eredményezheti. Ehhez járul még az elektrolittal érintkező elektródokon kialakuló elektródpotenciálok. Mindezen belső eredetű hatásokhoz adódhat a külső környezetből származó hatások, mint például a légköri elektromos potenciálgradiens változása.

Az előzők alapján a különböző magasságokban mért elektromos potenciálkülönbség a következő potenciálok összege:

$$EPK = E_{\text{áramlási}} + E_{\text{elektród}} + E_{\text{koncentrációs}} + E_{\text{környezeti}} \quad (6.1.6.)$$

Az áramlási potenciál után a következőkben tekintsük át az elektród- és koncentrációs potenciálokat.

6.1.2. Elektródpotenciálok

Az elektródpotenciál definíciója a következő: egy egyensúlyi állapotban lévő, úgynevezett összehasonlító (referencia-) elektród és a vizsgált elektród közötti potenciálkülönbség. Az elektródpotenciálok esetében feltételezzük, hogy az elektródpotenciált a legkevésbé nemes fém határozza meg, tehát az elektród úgy viselkedik, mintha csak ez a fém merülne az oldatba. Ezek alapján a H₁ és H₂ magasságokban található elektródok potenciáljai:

$$\varepsilon_{H_1} = \varepsilon^0 + \frac{RT}{zF} \cdot \ln a_{\text{ion},H_1}, \text{ és } \varepsilon_{H_2} = \varepsilon^0 + \frac{RT}{zF} \cdot \ln a_{\text{ion},H_2}, \quad (6.1.7-8.)$$

ahol ε_0 az elektród standardpotenciálja, az $a_{\text{ion},H}$ ionaktivitás pedig:

$$a_{\text{ion},H} = \gamma_{\text{ion},H} \cdot c_{\text{ion},H}, \quad (6.1.9.)$$

ahol γ az ionaktivitási koefficiens, c pedig a koncentráció. A továbbiakban feltételezzük, hogy a fanedv kis koncentrációjú erős elektrolit (az elektrolit nagyobb hányada disszociált állapotban van), így az ionaktivitást a koncentrációval helyettesíthetjük (lényegében $\gamma=1$).

Ekkor a két elektród között mért potenciálkülönbség:

$$E_{\text{elektród}} = \varepsilon_{H_1} - \varepsilon_{H_2} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{c_{\text{ion},H_1}}{c_{\text{ion},H_2}}. \quad (6.1.10.)$$

6.1.3. Koncentrációs potenciálok

Ezekhez a potenciálokhoz jönnek még az ún. koncentrációs potenciálok, ugyanis ha azonos elektrolitok érintkeznek különböző koncentrációban, akkor a Nernst-féle koncentrációs potenciál lép fel, melynek értéke:

$$E_{\text{koncentrációs}} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{a_1}{a_2}, \quad (6.1.11.)$$

ahol R : univerzális gázállandó; T : abszolút hőmérséklet; z : vegyérték; F : Faraday-féle szám (96500 Coulomb); a_1 és a_2 : ionaktivitások.

Az ionok individuális aktivitásait, illetve aktivitási koefficienseit pontosan nehéz meghatározni, ezért ezek helyett a gyakorlatban az úgynevezett közepes aktivitást, illetve közepes aktivitási koefficiensalkalmazást alkalmazzák. A közepes aktivitás:

$$a_{\pm} = \sqrt{\gamma_{\text{kation}} \cdot \gamma_{\text{anion}} \cdot c_{\text{kation}} \cdot c_{\text{anion}}}, \quad (6.1.12.)$$

az ionok közepes aktivitási koefficiense pedig:

$$\gamma_{\pm} = \sqrt{\gamma_{\text{kation}} \cdot \gamma_{\text{anion}}}. \quad (6.1.13.)$$

Erős elektrolitoknál az ionok és az oldószer-molekulák, valamint az ionok közötti elektrosztatikus jellegű kölcsönhatások miatt az aktivitási koefficiensek koncentrációfüggését csak híg oldatokban lehet értelmezni.

Valamely erős elektrolit aktivitási koefficiense azonos valamennyi olyan oldatban, melynek ionerőssége azonos. Az ionerősség meghatározása a következő:

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2, \quad (6.1.14.)$$

ahol c_i az egyes ionok koncentrációja, z_i az ionok vegyértéke. A fenti (6.1.12.) összefüggésből következik, hogy az erős elektrolitok híg oldatának aktivitási koefficiense független az oldatban lévő ionok anyagi minőségétől, és kizárólag azok töltésétől és összkoncentrációjától függ.

Lewis és Linhart (1919) a közepes aktivitási koefficiens és az ionerősség kapcsolatára empirikus alapon a következő összefüggést adta meg:

$$\lg \gamma_{\pm} = -\text{konst.} \cdot \sqrt{I}. \quad (6.1.15.)$$

A konstans értéke híg oldatban:

$$\text{konst.} = A \cdot |z_{\text{kation}} \cdot z_{\text{anion}}| \text{ és} \quad (6.1.16.)$$

$$A = \frac{1.8246 \cdot 10^6}{(DT)^{3/2}}, \text{ ahol} \quad (6.1.17.)$$

D az oldószer dielektromos állandója, T a hőmérséklet.

A koncentrációs potenciál nagyságrendjének becsléséhez az egyszerűség kedvéért tételezzük fel, hogy a xylem-nedv csak K^+ és OH^- ionokat tartalmaz. Dambrine és munkatársainak vizsgálatai (1992) szerint lucfenyőben xylem-nedv kálium-ion koncentrációja a fa csúcsához közel (h_1 magasság) kb. 60 mg/l, azaz 0.00153 mol/l, míg a fa tövénél (legyen h_2 magasság) kb. 20 mg/l, azaz 0.00051 mol/l. A víz dielektromos állandója 81.1, míg a hőmérsékletet vegyük 25 °C-nak (298 K). Az ionerősségek a 6.1.12. alapján $I_{h_1} = 0.00153$ és $I_{h_2} = 0.00051$. A különböző magasságokhoz tartozó közepes aktivitási koefficiensek:

$$\gamma_{\pm, h_1} = 10^{\left(\frac{-1.8246 \cdot 10^6}{(81.1 \cdot 298)^{3/2}} \cdot |1-1| \cdot \sqrt{0.00153} \right)} = 0.91375,$$

$$\gamma_{\pm, h_2} = 10^{\left(\frac{-1.8246 \cdot 10^6}{(81.1 \cdot 298)^{3/2}} \cdot |1-1| \cdot \sqrt{0.00051} \right)} = 0.94926.$$

A közepes aktivitások 6.1.10. és 6.1.11. alapján:

$$a_{\pm, h_1} = \gamma_{\pm, h_1} \cdot c_{h_1} = 0.001402,$$

$$a_{\pm, h_2} = \gamma_{\pm, h_2} \cdot c_{h_2} = 0.000486.$$

Az aktivitásokból számolt koncentrációs potenciál:

$$E_{\text{koncentrációs}} = \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{a_{\pm, h_1}}{a_{\pm, h_2}} = 0.02723 \text{ V.}$$

Tehát modellünkben a fa töve és csúcsa között pusztán az eltérő ionkoncentráció miatt, mintegy 27 mV-os feszültségkülönbség alakulna ki.

A különböző koncentrációjú oldatok érintkezésénél megindul a töményebb elektrolit diffúziója a hígabb felé. A diffúzió hajtóereje a kémiai potenciál különbsége a két oldat között. Ennek hatására az ionok mozgékonyaságuknak megfelelő sebességgel vándorolnak. A két oldat között így kialakuló potenciálkülönbség a diffúziós potenciál:

$$E_{\text{diffúziós}} = \frac{RT}{zF} \cdot \frac{u_k - u_a}{u_k + u_a} \cdot \ln \frac{a_1}{a_2} \quad (6.1.18.)$$

(Ahol R: univerzális gázállandó, T: abszolút hőmérséklet, z: vegyérték, F: 96500 Coulomb, u_k és u_a : a kation, ill. anion mozgékonyasága, a_1 és a_2 : ionaktivitások). A diffúziós potenciál tehát annál nagyobb, minél nagyobb a különbség a kation és az anion mozgékonyasága között.

Az előbbi egyszerűsített modellnél maradva, kiszámítható a diffúziós potenciál is (a K^+ mozgékonyasága $7.62 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$, a OH^- mozgékonyasága pedig $20.64 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$):

$$E_{\text{diffúziós}} = \frac{8.31451 \cdot 298}{1 \cdot 96500} \cdot \frac{7.62 - 20.64}{7.62 + 20.64} \cdot \ln \frac{0.001402}{0.000486} = -0.01255 \text{ V.}$$

A két különböző koncentrációjú oldat közötti határrétegen tehát kb. tíz mV nagyságrendű potenciálkülönbség van elméletileg.

6.2. A xylem-nedv ásványianyag-tartalma és ennek mérési lehetőségei

A folyadékpotenciálok nagyságának meghatározásához elengedhetetlenül szükséges a xylem-nedv elemkoncentrációinak ismerete. További vizsgálatok szükségesek annak kiderítésére, hogy az egyes ionfajták koncentrációinak térbeli eloszlása milyen a fában, ugyanis csak ennek az információnak a birtokában lehet megbecsülni a folyadékpotenciál komponenseinek nagyságrendjét.

A xylem-nedv összetevőinek meghatározására, az ionkoncentráció időbeli és térbeli változásainak vizsgálatára különböző módszereket lehet találni a szakirodalomban. A következőkben röviden ezeket az eljárásokat (valamint előnyeiket, hátrányaikat) tekintem át.

A xylem-nedv mintavételezésekor a legnagyobb probléma az, hogy a xylem elemekben negatív nyomás uralkodik és mindeztidáig nem találtak módot arra, hogy meghatározzák az elemkoncentrációkat a xylemben ilyen viszonyok között. A jelenleg rendelkezésre álló metódusok (6.1. táblázat) „kijátsszák” a xylem-nedv negatív nyomását, legalábbis a mintavétel idejére. Teszik ezt vagy oly módon, hogy lecsökkentik a transzspirációs szívóhatást, vagy úgy, hogy nyomással kompenzálják azt.

Roncsoló eljárások	Mintavétel a gyökérből	Gyökér-exudáció Szabályozott áramlású gyökér-exudáció
	Más növényrészekből történő mintavétel	Scholander-nyomáskamrában történő mintavétel Nyomáscsökkentő eljárás Vákuumos kivonás Infiltrációs és kimosó technikák Centrifugás eljárások
Roncsolásmentes eljárások		Xylem nyomáspróba Xylem-evő rovarok alkalmazása Gyökér-nyomáskamra Guttáció

6.1. táblázat. xylem-nedv mintavételi eljárások (Schurr, 1998 nyomán)

6.2.1. Roncsoló eljárások

Amikor dinamikus változásokat kell elemezni, a roncsoló eljárásoknak két lényeges hátránya van: (1) mivel a növénypopuláció nem homogén, nagy mennyiségű mintát kell gyűjteni; (2) minden alkalommal nagy a veszélye annak, hogy a mintavételi eljárás megbolygat olyan alapvető folyamatokat, mint például a folyadékáramlás vagy az elemek laterális kicserélődése.

6.2.1.1. Gyökér-exudáció

Ennek lényege az, hogy a xylem-nedvet – a szár levágása után visszamaradt – gyökérből nyerik (ld. 5.1. fejezet). A xylem-elemekbe történő aktív sótranszport következtében ozmotikus koncentráció-különbség alakul ki az edények és az azokat körülvevő sejtek között. Ennek hatására nedv áramlik az edényekbe. Amennyiben nincs transzspiráció, az edényekben lévő nedv nyomása meghaladja a 0.1 MPa-t, s az a vágásfelületen kifolyik. A nedvet ily módon könnyű mintavételezni, azonban komoly hátulütői vannak a módszernek. Először is, a

szár levágása miatt a vágásfelületen megsérült sejtek anyaga a mintába kerülhet, illetve maga a szárlevágás sebzési reakciót válthat ki. Másodsor, a hajtás eltávolítása a transzspirációs folyadékáramlás megszakadásához vezet. Emiatt a levágott gyökérrendszerben a nedváramlás fluxusa jelentősen kisebb, és a tömegáram hígító hatása nagymértékben lecsökken ahhoz képest, mint amit az ép (intakt) növényben lehet tapasztalni (Schurr és Schulze, 1995; Else et al., 1995). Harmadszor, a gyökérben zajló folyamatok nagyban függenek a hancs transzportfolyamataitól, legalábbis a kis gyökéretű fiatal növények esetében, amelyek relatíve kis tárolókapacitással rendelkeznek a gyökér aktivitáshoz képest. Az ionfelvétel gyorsan reagál a hajtáslevágásra (Bloom és Caldwell, 1988), ugyanis a hancsban történő transzport megszakítása megbénítja a hajtásból a gyökérbe történő visszacsatoló jelek áramlását is.

6.2.1.2. Szabályozott áramlású gyökér-exudáció

A levágott gyökérrendszer exudációjának mértékét nyomáskifejtéssel meg lehet növelni, hogy elérje a transzspirációs áramlásnak megfelelő fluxust. Amint az exudáció mértéke megnő, a nedvben található ionok koncentrációja jelentősen lecsökken és eléri azt az értéket, ami a transzspirálás alatti állapotra jellemző (Schurr és Schulze, 1995). Ezt a módosított gyökér-exudációs eljárást szintén erősen befolyásolja az, hogy a megromcsolt hancsból cukrok, tápanyagok, jeltovábbító anyagok áramlanak be a xylembe, s ez tönkreteszi a hajtás-gyökér jeltovábbító rendszert, amely szabályozza a gyökerek fiziológiáját és ionfelvételét. Az áramlás mértékének megváltoztatása nem csak a xylem-nedv töménységét befolyásolja, hanem a különböző ionok relatív szintjét is az exudációs nedvben. Mindez azt mutatja, hogy a hagyományos módon kinyert exudációs nedv félrevezető információkat nyújt az abszolút ionkoncentrációról, valamint a nedvben mozgó különböző ionok relatív mennyiségéről is.

6.2.1.3. Mintavétel más növényrészből

Levágott növényrészek, hajtások xylem-nedvét pneumatikus nyomás alkalmazásával is ki lehet nyerni, a szabályozott áramlású gyökér-exudációhoz hasonló módon. Azonban figyelembe kell venni, hogy amíg a gyökér esetében a kivett folyadék – elvben – a talajból pótlódik, a levágott növényi résznél a veszteség a raktározott nedvből pótlódhat csupán. Emiatt csak annyi mintát szabad kivenni, amennyi nem bolygatja meg komolyan a folyadékviszonyokat.

A következő probléma az, hogy a folyadék a transzspiráló növényben tenzió alatt van. Amennyiben megszűnik a negatív nyomás, a folyadék újraeloszlik a növényben a kialakuló új nyomásviszonyok függvényében és ez támogatja az ionok újraeloszlását is a xylem-nedv és a szomszédos szövetek között.

A vákuumos, külső nyomásos, centrifugás eljárások alapötlete az, hogy elkülönítik a xylem-nedvet a többi résztől. Ezt meg lehet oldani, mivel optimális esetben a xylem-edények axiális ellenállása alacsony és így a xylem-nedv áramoltatásához kisebb erő szükséges, mint az egyéb növényi részek folyadékának mobilizációjához. A probléma itt is az, hogy a fluxus megváltozása, az oldalsó kicserélődés, a vágási sérülésből való beszivárgás valamint a kényszer (t.i. nyomás) alkalmazása miatt a nedv összetétele el fog térni a transzspiráló növényre jellemző xylem-nedv összetételétől.

Az infiltrációs és kimosó eljárások esetében, ahol a kivont nedvmennyiséget pótolják, az a probléma, hogy a vizsgálandó xylem-nedv összetételéhez hasonló (ideális) cserefolyadékot kell a xylembe juttatni, nehogy a xylem és a környező szövetek közötti koncentráció-gradiens lényegesen megváltozzon. Emiatt ezek az eljárások sok iterációt és időt igényelnek.

6.2.2. Roncsolásmentes eljárások

A roncsolásmentes eljárások során a xylem-nedvet ép, transzspiráló növényből nyerik, abból a célból, hogy fenntartsák azokat a folyamatokat, amelyek meghatározzák a xylem-nedv összetételét. A mintavétel során a fluxus és nyomásváltozások miatt mégis megváltozhatnak a transzport folyamatok. Emiatt valamilyen nyomkövető eljárással (izotópos nyomjelzés) vizsgálni kell azt, hogy a mintavétel során a nyomjelző anyagok eloszlása és áramlásának dinamikája változatlan marad-e. A nagy energia- és időráfordítás ellenére ezek az eljárások referenciaként szolgálhatnak a roncsolásos technikákhoz.

6.2.2.1. Xylem nyomáspróba

Ez a minimális sebzéssel járó mintavételező eljárás azon alapszik, hogy egy szondát szúrnak egyetlen xylem-edénybe. A szonda üvegkapillárisát addig nyomják be a szövetekbe, amíg a negatív nyomás nem jelenik meg rajta, ez jelzi ugyanis azt, hogy a csúcsa egy edénybe ért. A mintát úgy nyerik, hogy rövid ideig túlnyomást alkalmaznak a gyökérzeten, kompenzálódó a szívási tenziót. Ez az eljárás lehetővé teszi az edényen belüli nedvösszetétel-változás kimutatását is. A rövid ideig tartó túlnyomás alkalmazása azonban a laterális kicserélődés befolyásolása révén megváltoztathatja a xylem-nedv összetételét.

6.2.2.2. Xylem-evő rovarok

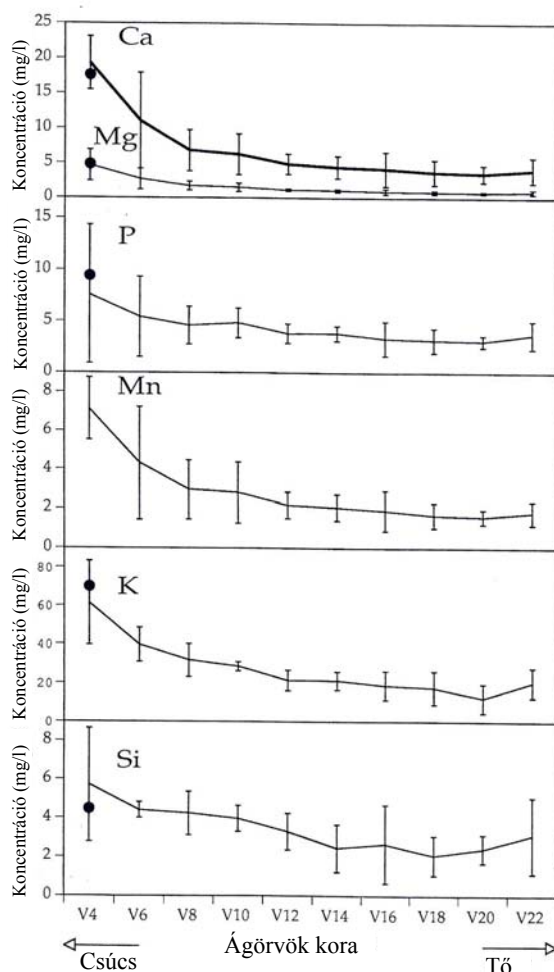
Számos rovar él xylem-nedven (pl. kabócák, levélbolhák). Mivel a xylem-nedv meglehetősen alacsony koncentrációban tartalmaz tápanyagokat, ezeknek a rovaroknak nagymennyiségű nedvet kell kiszívniuk, a táplálékul szolgáló összetevők kivonásához. A kinyert folyadék nagy részét azután felszabadítják, s ezt már mintavételezni lehet, s elemezni. Ez az eljárás lehetőséget nyújt a nedvösszetétel dinamikus változásának vizsgálatára. Például Andersen és munkatársai (1993) napi koncentráció-változásról számoltak be. A módszer legnagyobb nehézsége a rendelkezésre álló rovarok alacsony száma, valamint a gazdaspecifikusság.

6.2.2.3. Gyökér-nyomáskamra

Ez az eljárás tulajdonképpen hasonlít a szabályozott áramlású gyökér-exudációhoz, azzal a lényeges különbséggel, hogy a növény ép marad (Passioura és Tanner, 1985). A gyökérrendszeren alkalmazott pneumatikus nyomást úgy szabályozzák, hogy a xylemben lévő hidraulikus nyomás megegyezzen a légköri nyomással azon a helyen, ahová a nyomásmérő szenzort helyezik (kompenzációs nyomás). Az alkalmazott nyomás nem befolyásolja sem a gázcserét, sem a hajtás növekedését. A mintát úgy nyerik ki, hogy valamilyen módon lecsökkentik a transzspirációt (sötétbe helyezik a növényt, vagy megnövelik a páratartalmat), miközben a kompenzációs nyomást fenntartják. A nyomás hatására, általában egy elvágott éren keresztül, kifolyik a xylem-nedv. A mintavétel végén a szabályozó rendszer a transzspirációnak megfelelő értékre állítja be a kompenzációs nyomást.

A fentiek alapján elmondható, hogy a roncsolásos technikák nem igazán alkalmasak in vivo a xylem-nedv összetételének és az ionkoncentrációk vizsgálatára, vagy a dinamikus folyamatok monitorozására. Az általuk nyert eredményekből intakt (ép) növényekre extrapolálni Schurr (1998) szerint meglehetősen kockázatos. Azokban az esetekben

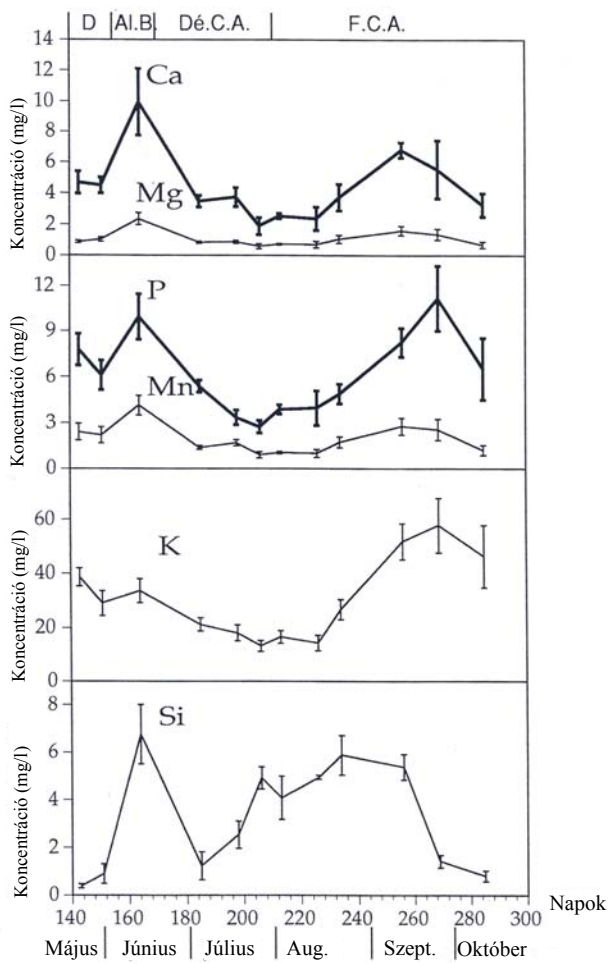
alkalmazzák őket, amikor a roncsolásmentes eljárásokra nincs lehetőség, pl. nagyméretű növények esetében.



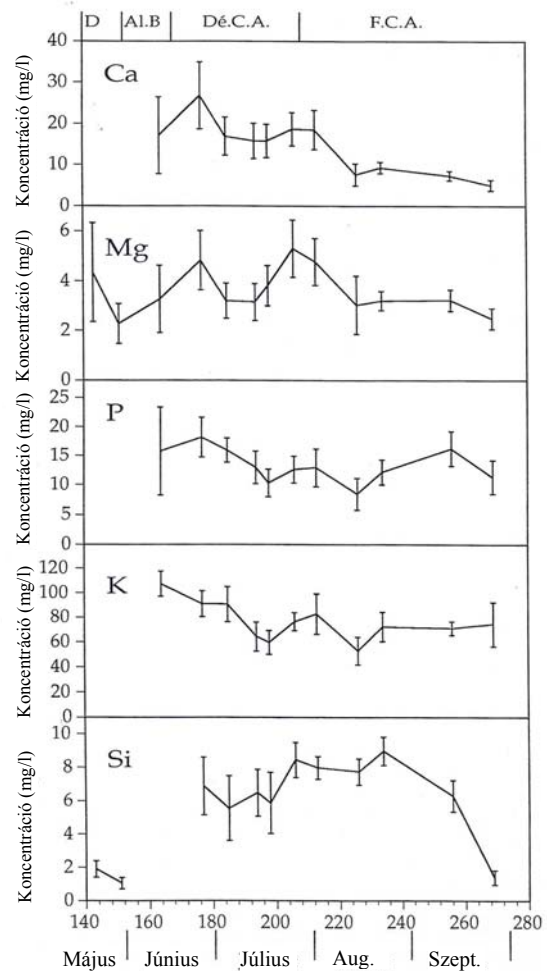
6.4.ábra. A törzsek xylem-nedvének elemtartalom változása a magasság (ágörvök) függvényében. A fekete pontok a 3. és 4. ágörv ágainak xylem-nedv elemtartalmát jelölik (Dambrine et al., 1992)

A fák esetében elvégzett kevés számú xylem-nedv elemzés között ki kell emelni Dambrine és munkatársai munkáját (1992). Kísérletük során egy 30 éves lucfenyőállományban monitorozták a törzsek és ágak xylem-nedv összetételét egy vegetációs időszakon keresztül 1990-ben. Roncsolásos technikát alkalmaztak és a monitorozást úgy oldották meg, hogy átlagosan négy fát vágtak ki kéthetente. Minden kivágott fa alsó részéről 3 törzsdarabot valamint a harmadik és negyedik ágörvből négy ágat vizsgáltak meg a napfelkelte előtt. A nedv mintavételezését közvetlenül a fák kivágása után végezték. A törzsdarabokból 1 m magas vízoszlop nyomásával, az ágakból pedig csekély többlet légnyomással préselték ki a nedvmintát Scholander-kamrában.

Az elemzés eredményeként azt kapták, hogy a nedv elemtartalma szisztematikusan magasabb koncentrációjú volt a koronában, mint a törzs alsó részén (6.4. ábra). A törzsből kinyert nedv ásványi elemkoncentrációjának szezonális változása elemenként eltérő volt: a Ca, K, Mg és P esetében a rügyfakadás során illetve után volt a csúcs, azután a



6.5. ábra. A törzs xylem-nedv szezonális elemtartalom-változása. D: rügyfakadás; AIB: a rügyek megnyúlása; DCA: a tülvelek növekedésének kezdete; FCA: A tülvelek növekedésének vége (Dambrine et al., 1992)

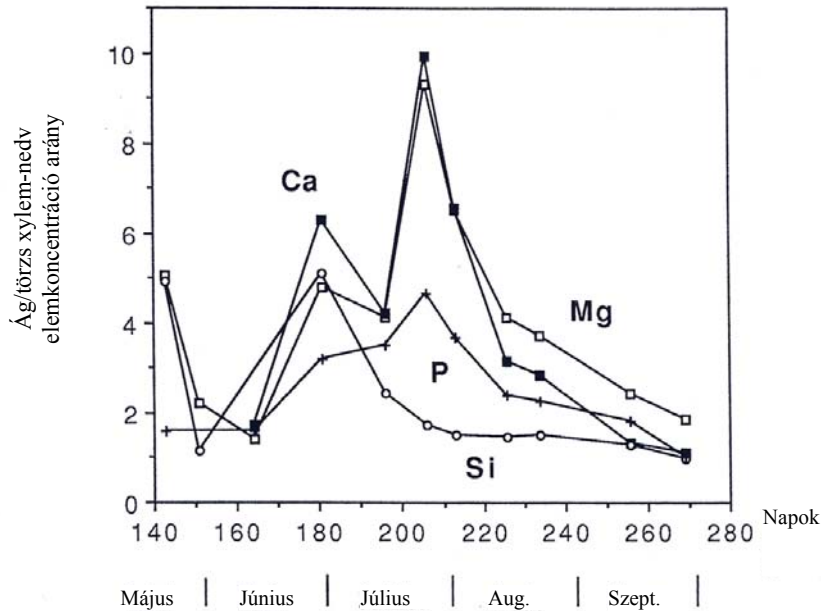


6.6. ábra. A 3. és 4. ágörv ágainak xylem-nedv elemtartalom-változása (Dambrine et al., 1992)

koncentrációjuk lecsökkent, és alacsonyan maradt a nyár folyamán, és csak a vegetációs időszak végén nőtt meg ismét. A Si koncentrációja a szárazsággal nőtt (6.5. ábra). Az ágakból kinyert nedv esetében a szezonális változás kevésbé volt jellegzetes (6.6. ábra).

A Ca, P és K a hajtás és tünövekedés idején mutatott magas értéket (a törzsben tapasztaltnál később). A Mg nem nagyon változott, míg a Si koncentrációja a szárazsággal párhuzamosan nőtt. Az ág és törzs elemkoncentrációinak aránya a Ca és Mg esetében a legnagyobb (6.7. ábra), amelyek korlátozott mennyiségben állnak a fa rendelkezésére. Az egyes elemek fluxusát összehasonlították a fának a hasonló elemekre vonatkozó becsült nettó felvételével. A Ca és Mg esetében – a törzsből vett minták alapján – a fluxus nagyjából megfelelt a nettó felvételnek, míg a K és P fluxusa sokkal nagyobb volt, mint a nettó felvétel. Az ágak xylem-nedvét megvizsgálva azt tapasztalták, hogy valamennyi elem fluxusa nagyobb volt, mint a nettó felvétel. Mindezek azt mutatják, hogy az ásványi elemek folyamatos körforgásban vannak a fában, különösen a koronában.

Ezek az eredmények mindenképpen megerősítik azt a feltételezésünket (szándékunkat), hogy az ionkoncentrációt egy fa esetén is úgy kell vizsgálni, hogy mind a térbeli, mind az időbeli (akár napi) változások nyomon követhetők legyenek. A Dambrine és munkatársai által alkalmazott módszer számunkra nem volt megfelelő, mivel az EPK mérésekkel párhuzamosan a rendszerint ugyanazon a fán kellett volna monitorozni a fanedv ion-koncentrációját. Ezért a különböző metódusok közül csak a roncsolásmentes eljárások jöhettek volna szóba. Azonban a fenti eljárások leginkább lágyszárú növényekre lettek kifejlesztve, vagy csak a leveleken



6.7. ábra. Az ág/törzs xylem-nedv elemkoncentráció arány szezonális változása (Dambrine et al., 1992)

lennének alkalmazhatók. Más megoldások pedig a behatárolt anyagi lehetőségek miatt nem valósulhattak meg (pl. ionszelektív elektródok alkalmazásával elvileg a xylem-nedv összetételének napi változását is lehetne tanulmányozni, kérdés, hogy ezek fában in vivo működnek-e).

A fákon egyszerűen és megbízhatóan alkalmazható mérési módszer kifejlesztéséig a koncentrációs, vagy az ionkoncentrációval valamely módon összefüggő potenciálok meghatározásának problémáját el kell vetni.

6.3. Az elektromos potenciálkülönbséget befolyásoló környezeti tényezők

A következőkben az elektromos potenciálkülönbség és nedvágam-mérés mellett regisztrált azon környezeti (meteorológiai és geofizikai) paramétereket mutatom be röviden, amelyek az előzetes modellben szerepeltek, mint befolyásoló tényezők. A további elemzések során ezeket a paramétereket használtam fel.

6.3.1. Meteorológiai paraméterek

6.3.1.1. Napsugárzás

A növények a leveleik által felfogott fénysugarak egy részét visszaverik, más részét pigmentjeik révén abszorbeálják és hasznosítják, míg további részek a levélen hasznosítás nélkül áthaladnak (transzmisszió). Mindhárom jelenség a hullámhossz függvénye. A radiáció a növényekben két szinten hat; az egyik a fotokémiai reakció, a másik a fejlődést szabályozó fotoindukció.

A növényi vízforgalomban a fény a sztómák viselkedésének befolyásolása útján hat. A legtöbb növénynél a sztómák nappal kinyílnak (fotoaktív nyitódás), és éjszaka bezáródnak (fotoaktív záródás). Azonban az endogén ritmus, a CO₂ koncentráció és a hőmérséklet hatása miatt a sztómák nem mindig nyílnak ki fényre, és záródnak be sötétben. Éjszakai megvilágításnál a sztómák sokszor csak nehezen nyílnak ki, és nappali elsötétítésnél nem záródnak be teljesen. Bizonyos esetekben a nyitáshoz néhány óra kell, máskor viszont csak néhány perc (ez akár fáziseltolódáshoz is vezethet). Ennek oka, hogy a sztómák nyitódásának és záródásának a napszakok változása miatt 24 órás endogén ritmusa van. A zárósejteknél folyamatos sötétségben is megfigyelhető egy ritmusos szélesedés (turgornövekedés), bár a sztóma nem nyílik ki (előkészül a kinyílásra). Ezért az elsötétítés ideje a fény hatására történő kinyílás gyorsaságát alapvetően befolyásolja. Természetes körülmények között is megfigyelték, hogy a sztómák még a hajnali fény előtt kinyílnak (bár ez a kinyílás rendkívül kis mértékű).

A radiáció és az elektromos potenciálkülönbség között gyenge negatív korreláció mutatható csak ki (-0.3 – -0.4 az együttható értéke). Ennek oka az, hogy a potenciálkülönbség több órás (4-5 óra) fáziskéséssel követi a sugárzást. A fáziseltolódás megszüntetésével a korreláció javul (-0.6 – -0.7).

6.3.1.2. Hőmérséklet

A hőmérséklet a növények fejlődésének az egyik legjelentősebb befolyásoló tényezője. Az életfolyamatok ugyanis igen szűk hőmérsékleti határok között működnek. Az alsó határ – a hőmérsékleti minimum – a víz fagyáspontja, a felső – a hőmérsékleti maximum – pedig a fehérjék denaturálódásánál, kb. 50°C-nál van, míg hőmérsékleti optimum az a legmagasabb hőmérséklet, amely mellett a növekedés állandó marad. Egy adott hőmérsékleten a növény hőegyensúlyát az abszorbeált sugárzás, valamint a hőelvezetéssel, transzspirációval és kisugárással leadott energia mennyisége, illetve egymáshoz viszonyított aránya befolyásolja. A hőabszorpciót a levelek helyzete - a levéllemez síkja és a beeső fénysugár által bezárt szög - határozza meg. Az abszorbeált hő 63%-a hőelvezetéssel távozik. A hőelvezetés hatásosságát a növény anatómiai, morfológiai sajátosságai, valamint a környező levegő fizikai tulajdonságai befolyásolják. A másik jelentős hőegyensúlyi tényező a transzspiráció. A levelek dm²-enként és óránként 5-6 g vizet párologtatnak el, ami a megkötött hőenergiának kb. 23%-át elvonja. A harmadik hő-elvonó faktor a kisugárzás, amellyel a megkötött hőnek kb. 9%-a távozik.

A hőmérsékletnek a sztóma-mozgásra gyakorolt hatása komplex, és nem lehet elválasztani a levegő illetve a sztóma alatti üreg CO_2 koncentrációjának hatásától. A CO_2 koncentráció növekedése sztóma záródáshoz, csökkenés pedig sztóma nyitáshoz vezet. A CO_2 koncentrációt a fotoszintézis csökkenti, a légzés pedig növeli. Ha a felhasználás és a termelés egyensúlyban van, akkor az intercellulárisok CO_2 koncentrációja nem változik. Ez az érték a CO_2 kompenzációs pont, amely a hőmérséklettel változik (különböző hőmérsékleten eltérő a légzés és a fotoszintézis intenzitása). Általánosságban elmondható, hogy a hőmérséklet emelkedése növeli a transzspirációt, ami elősegíti a sztómák zárását.

A levegő hőmérséklete közvetett, de jelentős szerepet tölt be a párolgás szabályozásában, ugyanis a léghőmérséklet hatással van a vízgőz telítettségének mértékére.

Ami a hőmérsékletnek az elektromos potenciálkülönbséggel való kapcsolatát illeti, itt egy közepes erősségű negatív kapcsolat figyelhető meg (-0.5 körüli a korrelációs koefficiens nyugodt, napsós időjárású időszakokban), amelyben egy körülbelül két és fél órás fáziseltolódás is jelentkezik. A fáziskülönbség megszüntetésével a kapcsolat erőssége akár a -0.7 – -0.8 körüli értéket is eléri.

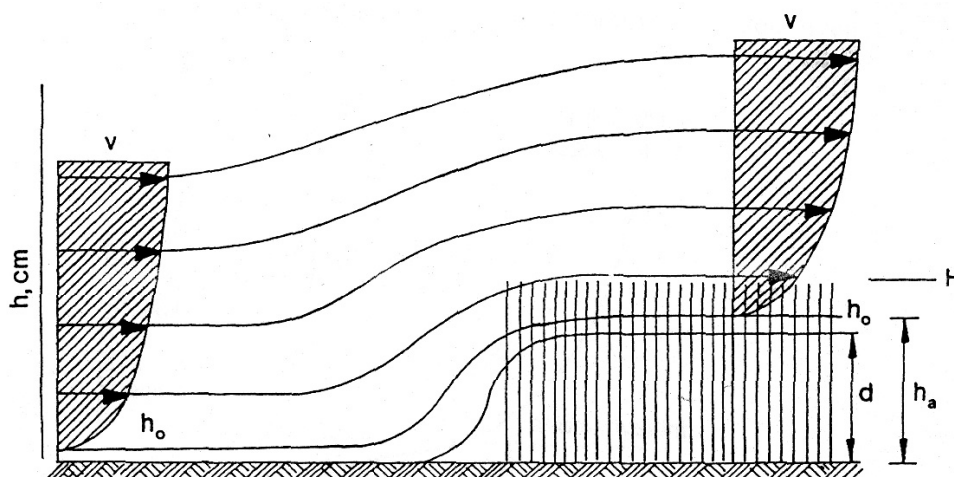
6.3.1.3. Relatív páratartalom

A levegőben lévő vízgőz telítettségi állapota döntő mértékben határozza meg az evaporáció és transzspiráció mértékét (ld. 5.1. fejezetben a levegő vízpotenciálja). A vízgőz-koncentráció a párolgó felület közelében a legnagyobb, attól távolodva csökken.

Az elektromos potenciálkülönbség adatsor és a relatív páratartalom adatsor között 2-3 órás fáziskülönbséget lehet kimutatni. E mellett azt is meg kell említeni, hogy a csatornák többsége jól követi a relatív páratartalom változásait (a korrelációs együttható fázisban -0.5 – -0.6 körüli, azaz közepesen erős negatív korreláció).

6.3.1.4. Szél

A szél a mikro- és állományklíma egyik legfontosabb szabályozóeleme. Az áramló levegő a növényállományhoz érve sebességváltozásra kényszerül, ami abban jut kifejezésre, hogy a sebességmezők megemelkednek. A sebesség rétegződésbeli módosulása 10-15 cm-es növényzetmagasságnál indul meg.

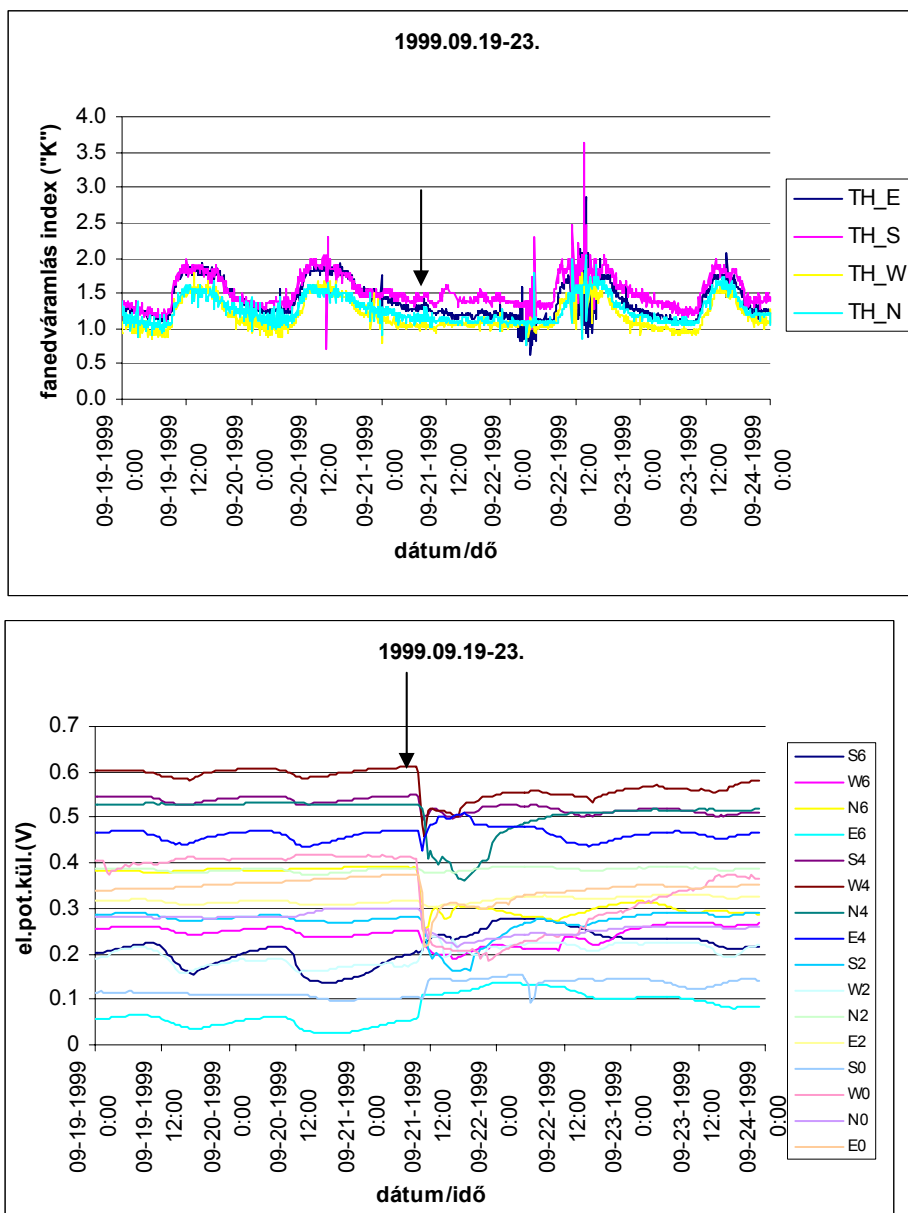


6.8 ábra. Szélesebességprofil a talaj és növényállomány felett; h_0 – érdességi magasság; h_a – aerodinamikailag aktív réteg; d – 0-pont eltolódási szint; H – állománymagasság (Szász – Tőkei, 1997)

A növénytakaró növekedésével a h_0 -szint (az érdességi magasságnak megfelelő szint) felemelkedik. A h_0 és a talajfelszín közötti távolság az ún. 0-pont eltolódás (d , lásd 6.8. ábra). A d és h_0 magasságok összege az aerodinamikailag aktív zóna a h_a , amely felett a függőleges mentén logaritmikus sebességeloszlás jelenik meg. A szélesebbé válásával arányosan nő a levelek feletti páradús levegő kicserélődése (Szász, 1977).

6.3.1.5. Csapadék és talajnedvesség

A 4.4. fejezetben, a transzienváltozások vizsgálatánál utaltam már arra, hogy a zivatarjelenségeknek közvetlen hatása van az elektromos potenciálkülönbségekre. Ezt a hatást jól szemléltetik a következő ábrák (6.9. a-b. ábra). 1999. szeptember 21-én (a nyilak által jelzett időponttól kezdődően) 10,6 mm csapadék hullott.

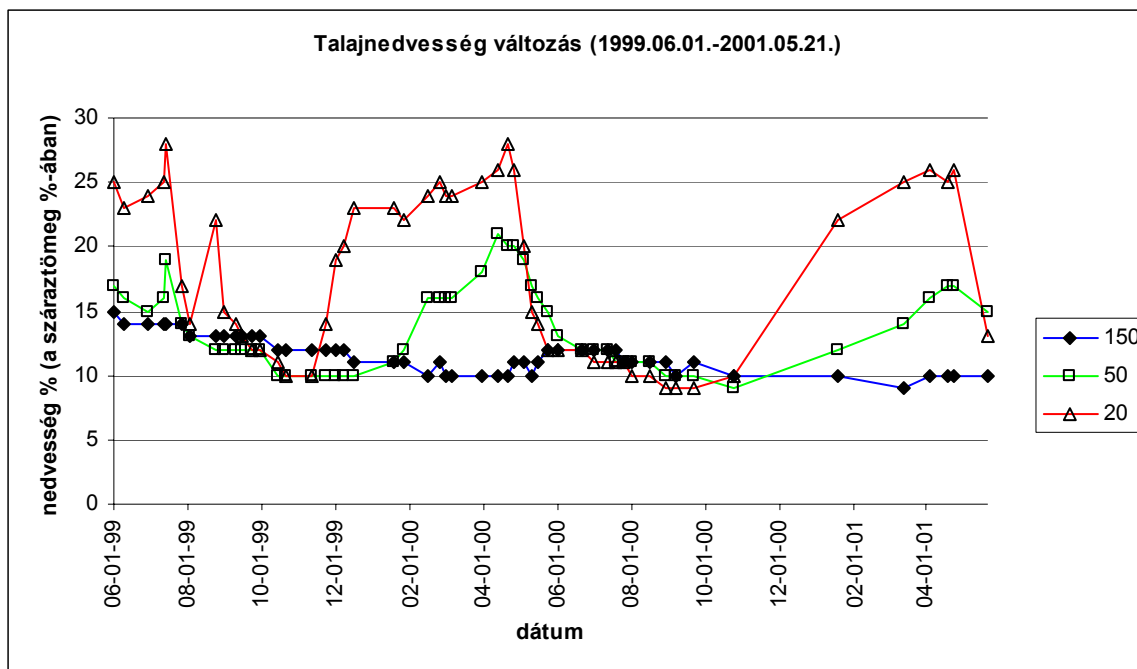


6.9.a-b. ábra. Az 1999. szeptember 21-i csapadék hatása a fanedvaramlásra és az elektromos potenciálkülönbségre

Ha megvizsgáljuk a fanedváramlás görbét, láthatjuk, hogy reggel kb. 8 óráig normális lefutásúak a görbék, majd a magas relatív páratartalom és a csapadék hatására, a fanedváramlás (s nyilvánvalóan a transzspiráció is) szinte az egész nap folyamán minimális maradt, elmaradt a napi felfutás. Az elektromos potenciálkülönbség adatsoron ugyanekkor a következő jelenség figyelhető meg: délelőtt 9-10 óráig normális lefutásúak a görbék, majd egy gyors, a napi változás amplitúdóját meghaladó mértékű (néhány csatornán a tizedvoltot is elérő) zajhatás tapasztalható. Látható, hogy a csatornák közötti potenciálkülönbség erőteljesen lecsökken. A jelenség azzal magyarázható, hogy a lehullott csapadék ekkorra áztatta el a kérget, s ez egyfajta shunt-jelenséget hozott létre, ami a potenciálkülönbségek kiegyenlítődése irányában hat.

Az elektromos potenciálkülönbség és a környezeti tényezők kapcsolatrendszerét elemző vizsgálatokat alapvetően csapadékmentes, napos időszakokra végeztem el, így a csapadék, mint vizsgálandó paraméter ezekben a vizsgálatokban nem szerepelt. Próbaképpen azonban egy csapadékos, zivataros időszakra (1999.09.02-07.) is lefuttattam a faktoranalízist, azonban az adatrendszer a nagy zajtartalom miatt alapvetően korrelálatlannak bizonyult, s ily módon alkalmatlanná vált a faktoranalízisre (a faktoranalízisre való alkalmassági próbák szerint).

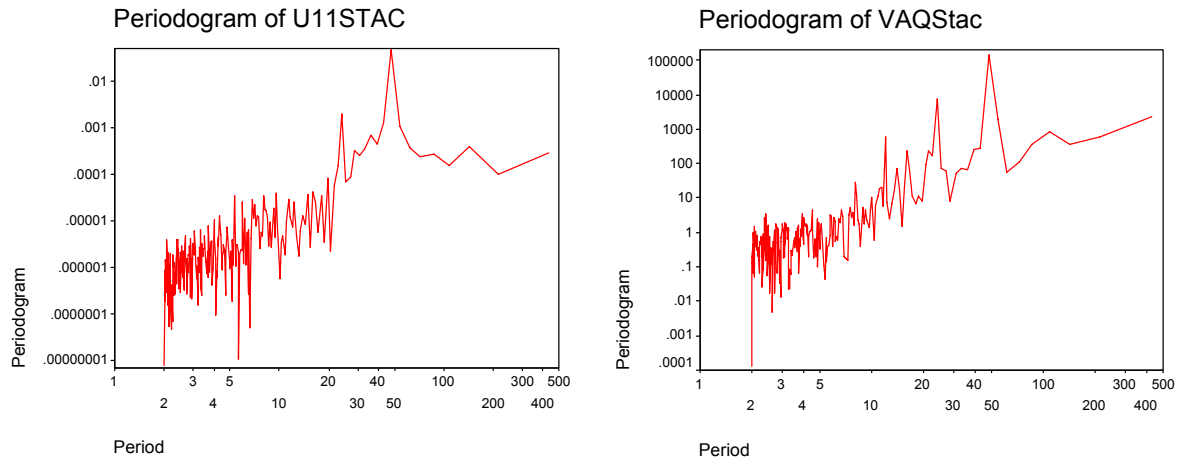
Nem vettem be a vizsgálatokba a talajnedvesség adatokat sem, egyrészt mivel nem állt rendelkezésemre megfelelő felbontású adatsor, másrészt mivel a talajnedvességet, a 6.10. ábrán bemutatott mérési eredmények tanúsága szerint, körülbelül egyhetes időszakok alatt állandónak vehetjük. Mindazonáltal pár mondat erejéig érdemes foglalkozni ezzel a paraméterrel is.



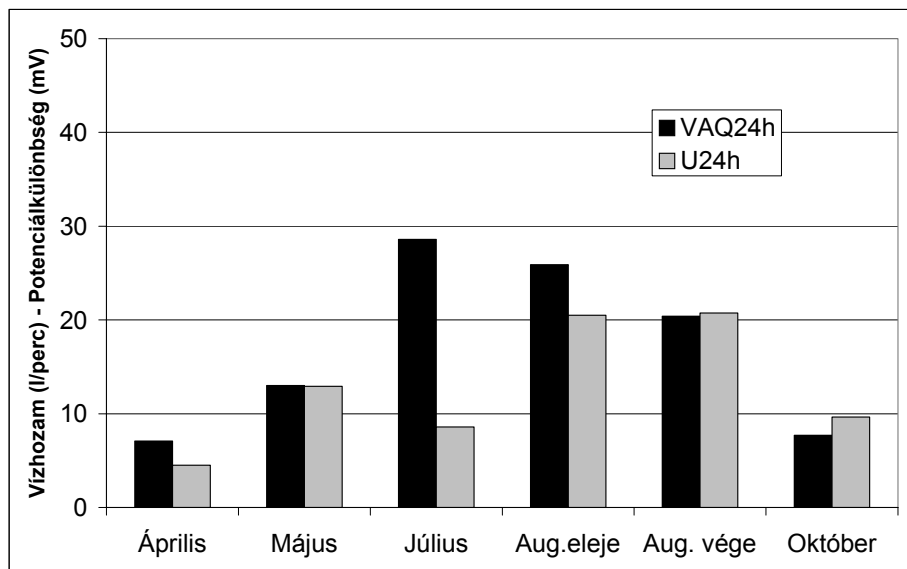
6.10. ábra. A talajnedvesség szezonális változása (1999.06.01.-2001.05.21.) három szinten (20 cm, 50 cm, 150 cm)

A 6.10. ábrán látható, hogy a talaj nedvességtartalmának határozott évi járása van. Általánosságban elmondható, hogy a legnagyobb amplitúdójú (15-18%-os) változást a 20 cm-es szondán lehetett tapasztalni, az 50 cm mélyen lévő szondán ennek mintegy a felét-kétharmadát (7-11%), míg a másfél méter mélyen elhelyezkedő szonda nedvességtartalma lényegében alig változott egy-egy év alatt (a mérés időtartama alatt összesen kb. 6%-ot

változott). A maximumok tavasszal jelentkeznek, mivel ebben az időszakban a párolgási veszteség kis mértékű, és a felszín vízfelvétele csaknem a legnagyobb (csapadék és olvadék víz). A nedvességtartalomban az evapotranszpiráció hatására bekövetkező nagymértékű csökkenések rendre nyár végén ill. ősszel figyelhetők meg.



6.11. a-b. ábra. (a) A potenciálkülönbség (U) és (b) a vadkan-árok alapvízhozam (VAQ) nyári periodogramjai (periódus*30 perc) (Gribovszki, 2003)



6.12. ábra. A vadkan-árok patak vízhozamának (VAQ24h) és az elektromos potenciálkülönbség (U24h) napi amplitúdóinak évszakos változása 2001-ben (Gribovszki, 2003)

A talajvíz és közvetve a talajnedvesség hatását jól szemlélteti az elektromos potenciálkülönbségek napi amplitúdójának és a vadkan-árok patak vízhozam-változásának összehasonlítása (Gribovszki, 2003). A két adatsor hasonló, erre utal a félórás felbontású adatsorok periodogramjainak hasonlósága (6.11.a-b. ábra), amelyeken jól megfigyelhetők az 1 napos és a félnapos változások. A 6.12. ábrán a 24 órás amplitúdók évszakos változását lehet látni 2001-ben. Az elektromos potenciálkülönbségek napi amplitúdóinak alakulása némileg eltér a korábban tapasztaltaktól, de jól korrelál a vadkan-árok patak vízhozamának napi amplitúdó-változásával. A júliusi mintánál az eltérést az okozta, hogy a szárazság miatt a talajnedvesség az Observatóriumban lecsökkent, s emiatt csökkent a cser transzspirációja is.

6.3.2. Geofizikai paraméterek

6.3.2.1. Légköri elektromos potenciál gradiens

A Földet elektromos tér veszi körül. Sík, pusztá szárazföldön vagy tengeren, a felszíntől felfelé kiindulva az elektromos potenciál tiszta napokon mintegy 130 V-tal nő méterenként (Feynman et al, 1969). A tér iránya arra vall, hogy a Föld felszínének negatív töltése van. A talajtól a légkör legfelső rétegéig a teljes potenciálkülönbség kb. 400 000 V. A levegő fajlagos vezetőképessége a magassággal nő, ennek megfelelően a potenciálgradiens csökken (10 km magasságban a potenciálgradiens már csak 4 V/m). A levegő vezetőképessége az ionizáció hatására keletkező elektromos töltésű részecskéktől származik. A Föld felszínének közelében a talajban és a levegőben előforduló radioaktív anyagok sugárzása, valamint a kozmikus sugárzás idézi elő az ionizációt.

A légköri elektromos jelenségeknek a fákra, ill. általában a növényekre gyakorolt hatásai jelenleg még nem tisztázottak. Fák esetében elvégzett elektrofiziológiai kísérletek döntő többsége azokra az elektromos potenciálokra koncentrál, amelyek a fiziológiai folyamatok közben keletkeznek, miközben az elektromos terek fákra gyakorolt hatásával nagyon kevés munka foglalkozik. Az élő fa fajlagos ellenállása kb. 10^2 - 10^3 Ω m, míg a levegő fajlagos vezetőképessége a talaj mentén $1,3 \cdot 10^{-14}$ S/m. Mivel a fa nagyságrendekkel jobb vezető, mint a levegő, az elektromos tér ekvipotenciális felületei a fa mentén eltorzulnak, így a levegőben az elektromos potenciálkülönbség a fa koronája és töve között csaknem zérus. Valószínűsíthető, hogy a környezet elektromos tere, de inkább annak gyors, nagymértékű változása hatást gyakorol a fa életfolyamataira.

Bencze és Márcz (1963) vizsgálatai szerint a zivatartevékenység idején jelentkező csúcskisülési áramok létrejöttét az ütközési ionizáció okozza. Az ionizáció következtében az ionok száma ugrásszerűen megnő, a levegő vezetőképessége emelkedik, és az uralkodó térerősség hatására áram indul meg. Az alsó légrétegekben az ionok energiája normális körülmények között nem elegendő ahhoz, hogy a levegő molekulákkal való ütközés ionizációt okozhasson. Így csúcskisülési áramok csak abban az esetben jöhetnek létre, ha a légköri elektromos térerősség meghaladja az ionizációs energiát biztosító értéket. Ekkora térerősségek erősen görbült felületek, élek, csúcsok közelében (ahol a potenciálgradiens a nagyobb felületi töltéssűrűség miatt a sík felületek felett uralkodóknak a sokszorosa) már akkor mutatkoznak, ha a potenciálgradiens értéke a homogén térben (sík felület felett) eléri a 700-800 V/m-t.

A csúcs környezetében pozitív és negatív ionok egyaránt keletkeznek, melyek közül csak a potenciálgradiens előjelével egyező előjelűek vezetődnek le a csúcson keresztül. A visszamaradó ionok tértöltését a légáram elszállítja, így a folyamat, ha a potenciálgradiens nem változik, bizonyos idő után újrakezdődik.

6.3.2.2. Geomágneses tér, telluráramok

A Föld körüli mágneses tér, amit földi mágneses térnek neveznek, mintegy 90%-ban leírható egy, a forgástengelytől mintegy 11.5 fokkal eltérő irányítottágú mágneses dipólussal. A földi mágneses térnek három forrása van. A tér zömét az ún. fő tér adja, mely a Föld magjának külső részében és a földköpenyben lejátszódó lassú konvektív áramlások által keltett elektromágneses dinamóhatástól származik. A második forrás az anomális tér, melynek kialakításában elsődleges szerepe van a ferromágneses anyagoknak és a velük összefüggő remanens mágnesezettségnek. A harmadik forráshoz, mely a teljes térnek kb. 5%-a, a fő térre szuperponálódó külső eredetű változások tartoznak. A külső eredetű tér legfőbb energiaforrása a napszél kinetikus energiája.

A mágneses térnek szabályos napi változása van (20-80 nT nagyságúak), mely jelenség az ionoszférikus plazmában (az ionoszféra ún. E tartományában, 90-130 km magasságban) a termikus és a gravitációs árapály révén mozgásba hozott elektronoknak tulajdonítható. Időnként ezektől a szabályos változásoktól eltérő, aperiodikus variációk is észlelhetők. A mágneses háborgások között a legjelentősebbek a mágneses viharok. Jellemző időtartamuk néhány óra, de előfordulhatnak több napig tartó viharok is. Keletkezésük vagy a gyors napszéllyalábok és a magnetoszféra közötti energiaátadásra, vagy a fler által kilökött részecskefelhő találkozására a Föld magnetoszférájával vezethető vissza.

A Föld változó mágneses terének hatására a földben, mint vezető közegben tellurikus áramok indukálódnak. A napi perióduson belül finomabb ingadozások is mérhetők, ezek az ún. pulzációk. A pulzációk mérete néhány mV/km. Érdekes tapasztalat, hogy az elektródok között mérhető potenciál villámcsapás hatására jelentősen megváltozik, sok esetben néhány 10 mV/km-rel, s ez a megváltozott potenciál akár 10-20 óráig megmarad, majd lassan visszatér az előző szintre (Verő, 2001).

A földi mágneses tér és a földi áramok változásainak élő szervezetekre gyakorolt hatását az utóbbi néhány évben kezdték el vizsgálni, így ez a terület még feltáratlan. A geomágneses térnek a kapcsolatát a naptevékenységgel már említettem korábban. A naptevékenység 11 éves ciklusát már a fák évgyűrűszerkezetében is kimutatták. Az csaknem bizonyosan állítható, hogy a geomágneses tér változásának indukciós hatása a fában elhanyagolható (Wesztergom vizsgálatai és szóbeli közlése alapján). Körülbelül 10^2 - 10^3 Hz-es frekvencia-tartományú mágneses térváltozás indukálhatna egyáltalán örvényáramokat egy fa nagyságú testben (a skin effektus miatt, ugyanis a nagyobb periódusidejű hullámok anélkül haladnak át a fán, hogy áramot indukálnának, azaz e hullámok számára a fa „láthatatlan”). A mágneses viharok élettani hatásainak vizsgálatánál további nehézséget jelent a napfizikai jelenségekkel ugyancsak korrelációt mutató háttérhatások (mint pl. az időjárás) kiküszöbölése.

6.3.2.3. Gravitáció

A Föld felszínén adott pontban meghatározott nehézségi gyorsulás értéke időben periodikus, kis amplitúdójú változást mutat. Az időbeli változás az árapálykeltő erők következtében jön létre.

Az árapálykeltő erők a Nap és a Föld, illetve a Hold és a Föld közös súlypontja körüli keringés következtében alakulnak ki. A közös súlypont körüli keringés két erő egyensúlya következtében jön létre. Az egyik erő a két égitest (Föld és Hold, Föld és Nap) között fellépő tömegvonzási erő. (Mivel a Föld-Hold távolság a Föld sugarának mintegy hatvanszorosa, és a tömegarány 80:1, a Föld és a Hold közös tömegközéppontja a Föld belsejébe esik.) A másik erő a keringés következtében fellépő centrifugális erő. A Föld felszínén a tömegvonzási erő az adott pont és a perturbáló égitest relatív helyzetétől függ, a centrifugális erő a Föld minden pontjában azonos. Az árapály leírásában gyakran használják az ún. árapályállandókat:

$$T = \frac{3}{4} \frac{GMr^2}{R^3}, \quad (6.3.2.1.)$$

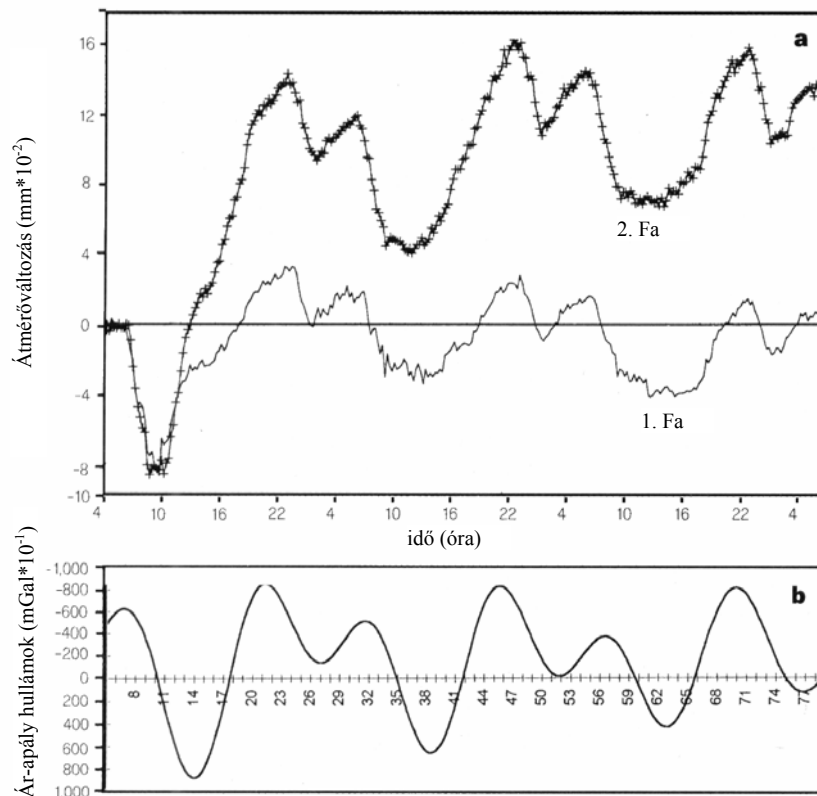
ahol G az univerzális gravitációs állandó, M a Földre ható égitest tömege, r a Föld sugara, R a Földre ható égitest és a Föld távolsága. Mivel az állandó az égitest tömegével egyenesen, az égitest Földtől mért (átlagos) távolsága harmadik hatványával fordítottan arányos, a Hold hatása valamivel több, mint kétszerese a Napénak. Emiatt újhold és telihold idején (amikor a két hatás közelítőleg összeadódik) jelentősen, mintegy háromszorosan nagyobb az amplitúdó, mint a növekvő, ill. csökkenő negyed idején (amikor a két hatásnak közelítőleg a különbsége érvényesül). A Föld alakját jól közelítő geoid (a nehézségi erőtér azon nívófelülete, amely

egybeesik a közepes tengerszinttel) a Hold hatására maximálisan 0,267 m-t, a Nap hatására 0,123 m-t változik, merev Földet feltételezve.

A szabadban illetve a laboratóriumban, szabályozott körülmények között növekvő fák törzsének átmérőjére egyfajta ritmikus ingadozás jellemző, amely független olyan napi periodikus tényezőktől, mint a fény, hőmérséklet és relatív páratartalom. A törzsátmérőnek ez a ritmikus változása megjelenik azokon a fiatal fatörzseken is, amelyeket elválasztottak a gyökerüktől és a koronájuktól. Ezek a ciklusok egyidejűleg több faegyeden is megjelennek, és több hónapon keresztül megfigyelhetők még leválasztott törzs-szegmenseken is, egészen addig, amíg a kambium élő marad; megmaradnak folyamatos megvilágításban illetve sötétségben, a nyugalmi periódus alatt vagy akár fordított fotoperiódusban is. A megfigyelések szerint a ciklus kétszűcsű és a periódusa kb. 25 óra.

A változás periódusa és természete emlékeztet a fűrőlyukakban megjelenő talajvíz szintjének változására, vagy a források vízáramának változására. Ezek a változások hasonló természetűek, mint a tengerparti árapályok, de sokkal kisebb az amplitúdójuk és fordított előjelűek.

A napi Hold-együttállási ritmus hatása a fákra, ill. általában az edényes növényekre még nem felderített. A jelenséggel az utóbbi időkben kezdtek el részletesebben foglalkozni. Zürher et al. (1998) a fa pozíciójára vonatkozó, számított gravimetrikus görbék inverz értékeit hasonlították össze a fák törzsének átmérőváltozásaival. Szisztematikus korrelációt találtak a görbék között, bár néhány esetben fáziseltolódást tapasztaltak.



6.13. ábra. a. két fiatal lucfenyő törzsátmérő-változása;
b. számított gravitációs árapály görbe (Firenze, 1988. 07. 17-20.).
(Zürher et al., 1998)

A 6.13. ábrán két fiatal, 150 cm magas lucfenyő (*Picea abies*) átmérőjének ritmikus változását lehet látni. Mindkét fácskát különálló konténerben nevelték, és az 1998. július 17 és 20 közötti időszakban szabályozott relatív páratartalom és hőmérsékleti viszonyok között,

teljes sötétségben tartották. A sötétséggel a napi fotoperiódus interferáló hatását lehet kiszűrni. Ezzel, valamint a többi környezeti paraméter szabályozásával el lehetett érni, hogy a sztómák zárva maradjanak. Így a transzspiráció miatt létrejövő nedvzárlás zavaró hatását is ki lehetett küszöbölni. A két görbe nagyon hasonló képet mutat, pusztán a mért amplitúdóban térnek el egymástól, és a kettős csúcsok mindkét görbén határozottan felismerhetők. Összehasonlítva ezeket a görbéket a számított árapály görbével, nyilvánvaló a szinkronitás.

Abból a tényből, hogy a változatlan víztartalmú, izolált törzsszegmenseken is megfigyelhető ez a jelenség, következik az, hogy egy aktív, visszafordítható vízáram jön létre a sejtekben a szimplasztól az apoplaszt felé. Ezért minden rövid ideig tartó átmérő-növekedésért a sejtfaalak vízakumulációja a felelős (a fatechnológiában ez az ún. kötött víz, amely mérhető duzzadást okoz).

Noha a saját adatsorom idősor elemzésekor 27 napos periódust nem sikerült kimutatnom, a fentebb leírt jelenségek, valamint az – a fejezet bevezetőjében már említett – tény, hogy Burr (1944) 27 napos periódusokat mutatott ki az általa mért elektromos potenciálkülönbségekben (ezt a periodicitást a Hold hatásával hozta összefüggésbe), arra ösztönöztek, hogy a mérés helyére kiszámított, árapálykeltő erőktől származó elméleti gravitációs gyorsulás adatsort az elemzésbe bevonjam.

6.4. Empirikus modell felállítása

Az előbbieken ismertetett környezeti paraméterek, valamint az elektromos potenciálkülönbség adatsorok és a fanedváramlási adatsorok közötti kapcsolatrendszer felderítéséhez a faktoranalízis (ld. 3.5.3 fejezet) és a regresszió-analízis (ld. 3.5.4.) módszereit hívtam segítségül. Az így kapott kapcsolatrendszer alapján lehetővé vált, hogy ezekből a paraméterekből kifejezzem az elektromos potenciálkülönbséget, azaz előzetes sztochasztikus modellt állítottam fel.

6.4.1. Az elektromos potenciálkülönbség adatok és a környezeti paraméterek közötti kapcsolatrendszer feltárása faktoranalízissel

6.4.1.1. Adatrendszerek

Az elektromos potenciálkülönbség, a fanedváramlás és a környezeti paraméterek adatai közötti kapcsolatrendszer feltárásához két, csapadékmentes, napos időszak adataiból összeállított adatrendszerre végeztem el a faktoranalízist. Az adatrendszerek összeállítása során az egyes változók idősorait standardizáltam, majd a standardizált adatsorok fáziseltolódását az SPSS programrendszer keresztkorrelációs elemzésével meghatároztam, s az adatsorokat azonos fázisba toltam.

1. adatrendszer: 1999.09.10-20.

Az adatrendszerbe egy elektromos potenciálkülönbség adatsort, egy termometriás fanedváramlás index adatsort választottam. Melléjük a levegő hőmérséklet, relatív páratartalom, sugárzás, légköri elektromos potenciálgradiens, elméleti gravitációs adatsort vettem be, továbbá az É-D és K-Ny tellurikus adatsorokat, valamint a földi mágneses tér eredőjének adatsorát. Az adatrendszer mintavételi gyakorisága 15 perces.

1. adatrendszer komponensei	Jelölés az elemzések során
Elektromos potenciálkülönbség, 6m, nyugat	W6_st
Thermometriás nedváramlás, nyugat	TH_W_st
Hőmérséklet	TEMP_st
Relatív páratartalom	Rel_hum_tr_st
Radiáció	Radiation_st
Légköri elektromos potenciálgradiens	Potgrad_st
Gravitáció (elméleti adatsor)	GRAV_st
É-D tellurikus adatsor	EX_3o
K-Ny tellurikus adatsor	EY_3o
Földi mágneses tér eredőjének vektora	F_st_inv

6.2. táblázat. Az 1. adatrendszer komponensei

Az elektromos potenciálkülönbség adatsorok közül a 6m-es szint nyugati csatornáját választottam ki, ugyanis ez mutatta a legszorosabb kapcsolatot a fanedváramlás index adatsorokkal. A fanedváramlás index adatsorok közül az elektromos potenciálkülönbség adatsornak megfelelő nyugati adatsort választottam (bár mind a négy nagyon szoros kapcsolatot mutatott egymással). A spike-ok zavaró hatásának kiküszöbölésére az adatsort 3 órás Butterworth IIR szűrővel megszürttem, így a korreláció az elektromos potenciálkülönbség adatsor és a környezeti paraméterek adatsoraival javult. A relatív páratartalom adatsoron nagyon erős trendhatás érvényesült, ezt egy ötödfokú polinommal leválasztottam az

adatsorról. A 15 perces légköri elektromos potenciálgradiens adatsort egy 1 órás adatsorból állítottam elő spline interpolációval. A tellurikus adatsorok, a fanedváramlás index adatsorhoz hasonlóan, kis periódus idejű, nagy amplitúdójú változásokat tartalmaztak, ezeket szintén 3 órás Butterworth IIR szűrővel szedtem ki az adatsorokból.

2. adatrendszer: 2001.08.12-19.

Ebben az időszakban nem volt termometriás nedváramlás mérés, ezért ebből az adatrendszerből ez a fajta adatsor hiányzik. Az 1. adatrendszerrel eltérően nem választottam ki egy elektromos potenciálkülönbség adatsort sem, hanem a 16 csatornára főkomponens-elemzést végeztem, hogy az adatszámot redukáljam. A 16 csatorna két főkomponensbe oszódott szét (6.3. táblázat), s a két főkomponens közül azt választottam, amelyikkel több csatornát lehet helyettesíteni (EPK 1).

	S6_ST	W6_ST	N6_ST	E6_ST	S4_ST	W4_ST	N4_ST	E4_ST	S2_ST	W2_ST	N2_ST	E2_ST	S0_ST	W0_ST	N0_ST	E0_ST
EPK 1	0.90	0.18	-0.54	0.23	-0.14	0.98	0.89	0.48	0.96	0.97	0.97	0.98	0.34	0.99	0.85	0.82
EPK 2	0.40	0.88	0.76	0.96	0.92	-0.03	-0.41	0.37	0.23	-0.06	0.16	-0.09	0.84	0.10	0.41	0.49

6.3. táblázat. Az 2001.08.12-19. közötti időszak elektromos potenciálkülönbség adatsoraiból képzett főkomponensek (EPK 1 és EPK 2)

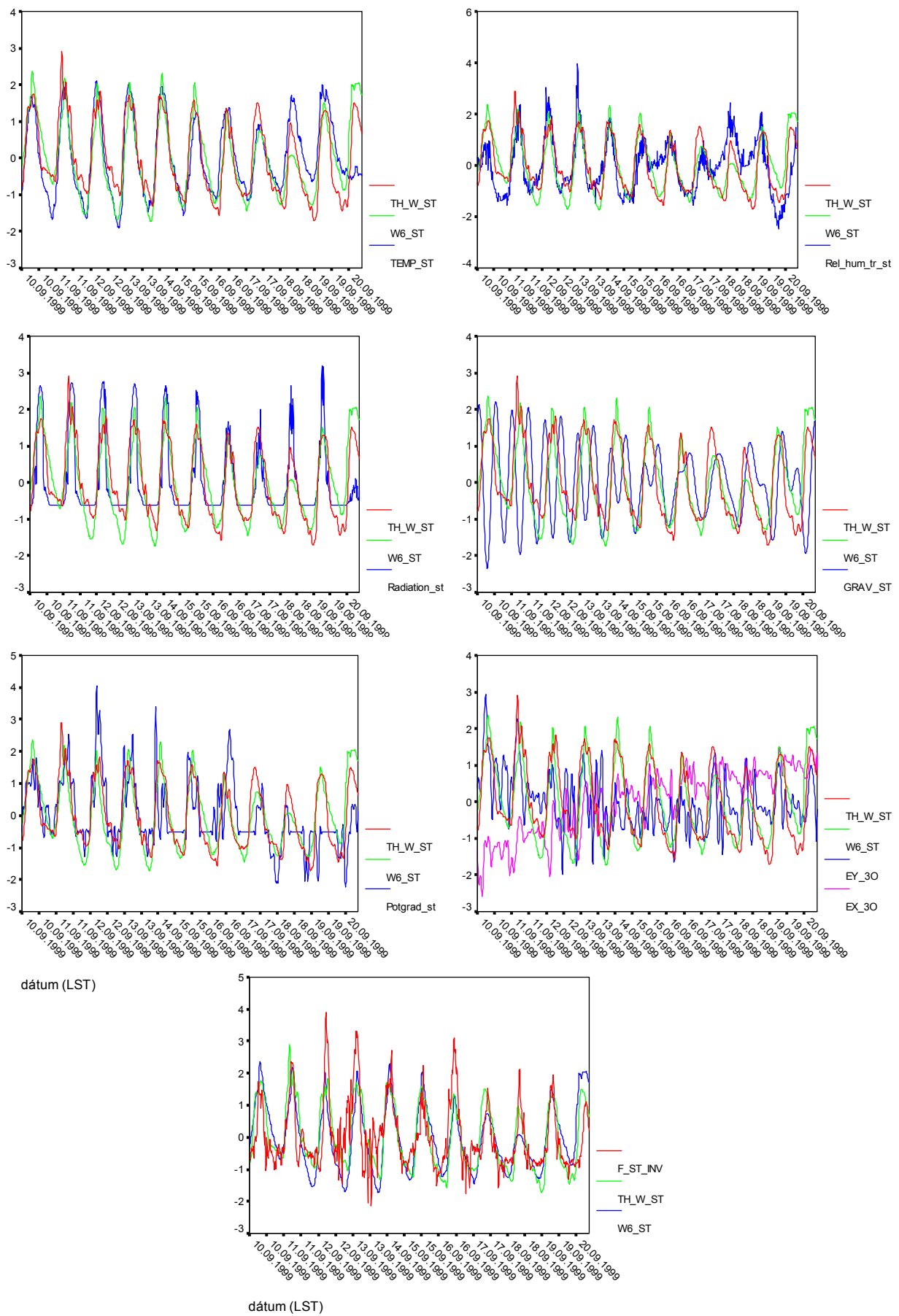
A meteorológiai és geofizikai adatsorok az 1. adatrendszerének felelnek meg, annyi eltéréssel, hogy az elméleti gravitációs adatsort kihagytam, míg a szélesség adatokat, valamint a geomágneses totáltér-vektor mellé az egyes komponenseinek adatsorait (horizontális komponens: H; vertikális komponens: Z; deklináció: D) is bevettem az adatrendszerbe. A tellurikus adatsorokon ez alkalommal is végrehajtottam a 3 órás szűrést a nagyenergiájú, nagyfrekvenciás jelek kiküszöbölésére. A hőmérséklet és relatív páratartalom adatsorokról ötödfokú polinommal leválasztottam a hangsúlyos trendet.

2. adatrendszer komponensei	Jelölés az elemzések során
Elektromos potenciálkülönbség	EPK 1
Hőmérséklet	TEMP_tr_st
Relatív páratartalom	Rel_hum_tr_st
Radiáció	Radiation_st
Szélesség	Wind_speed_st
Légköri elektromos potenciálgradiens	Potgrad_st
É-D tellurikus adatsor	EX_3o
K-Ny tellurikus adatsor	EY_3o
Földi mágneses tér horizontális komponense	H_st_inv
Földi mágneses tér vertikális komponense	Z_st_inv
Deklináció	D_st_inv
Földi mágneses tér eredőjének vektora	F_st_inv

6.4. táblázat. A 2. adatrendszer komponensei

6.4.1.2. Az 1. adatrendszer faktoranalízise

Az 1999.09.10-20. közötti időszak adatsoraiból összeállított 1. adatrendszer (6.14. ábra) faktoranalízisét az SPSS programrendszerrel végeztem: a principal axis factoring módszert (a h^2 -et a többszörös determinációs együtthatók módszerével becslő) használtam varimax forgatással.



6.14. a-h ábra. Az 1.sz. adatrendszer standardizált idősorai

A faktoranalízisnek egy adatállományon csak akkor van értelme, ha az adatok összefüggenek (korreláltak). Ezt az analízis kezdetekor ellenőrizni kell. Az SPSS programrendszer az ellenőrzésre kiszámolja a Kaiser-Meyer-Olkin mértéket, valamint elvégzi a Bartlett-féle gömb próbát.

A Kaiser-Meyer-Olkin mérték a korrelációs mátrixhoz egy 0 és 1 közé eső számot rendel a következő képlet alapján:

$$KMO = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^p r_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^p \rho_{ij}^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^p r_{ij}^2} \quad (6.4.7)$$

ahol r_{ij} az i -edik és a j -edik változók korrelációs együtthatója, $\rho_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sqrt{R_{ii}R_{jj}}}$ pedig az i -edik és j -edik változó parciális korrelációs együtthatója (R_{ij} a korrelációmátrix (i,j) eleméhez tartozó aldeterminánsát jelöli). Ha a kapott érték ≥ 0.5 , akkor az adatrendszer alkalmas faktoranalízisre.

KMO és Bartlett teszt

Kaiser-Meyer-Olkin mérték		.828
	Approx. Chi-Square	7173.683
Bartlett-féle gömb próba	Df	45
	Sig.	.000

6.5. táblázat. Faktoranalízisre való alkalmassági vizsgálat az 1999.09.10-20. közötti időszak adatrendszerére

Az 6.5. táblázatban látható, hogy az 1.sz. adatrendszerre vonatkozó Kaiser-Meyer-Olkin mérték alapján az idősorok alkalmasak faktoranalízisre. Ugyanez az eredménye a Bartlett próbának, azaz a nullhipotézis (vagyis, hogy a változók függetlenek) a szignifikancia szint < 0.05 miatt elvetendő, tehát az adatrendszer változói összefüggnek, így van értelme a faktoranalízisnek.

Az értelmezett teljes variancia

Faktor	Kezdeti sajátértékek			Faktorok előállításakor			Elforgatás után		
	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %
1	5.142	51.421	51.421	4.894	48.945	48.945	4.835	48.354	48.354
2	1.334	13.335	64.756	.985	9.847	58.792	.968	9.682	58.036
3	1.120	11.197	75.953	.552	5.524	64.316	.628	6.279	64.316
4	.785	7.850	83.803						
5	.523	5.232	89.036						
6	.378	3.784	92.820						
7	.317	3.167	95.987						
8	.195	1.948	97.935						
9	.109	1.095	99.029						
10	.097	.971	100.000						

Előállítási eljárás: Principal Axis Factoring.

6.6. táblázat. A faktorokhoz tartozó sajátértékek és a teljes varianciának a faktorokkal magyarázott hányadai

Az SPSS algoritmus a faktorokat a maximum variancia kritérium alapján határozza meg úgy, hogy a hozzájuk tartozó sajátérték nagysága alapján sorba is rendezi. Minden

rákövetkező faktor annak a varianciának a legnagyobb részét írja le, amelyet nem magyaráznak meg az előző faktorok. A 6.6. táblázat az egyes faktorokhoz tartozó sajátértéket tartalmazza, valamint a teljes varianciának az egyes faktorok által magyarázott részeit. Az algoritmusok általában az egynél nagyobb sajátértékű faktorokat számítják ki és veszik be a további analízisbe. Esetünkben az első három faktornak nagyobb egynél a sajátértéke. Ez a három faktor a teljes varianciának 64,316 %-át magyarázza, ami a vizsgálat szempontjából még megfelelő.

Faktor mátrix

	Faktor		
	1	2	3
TH_W_ST	.912	-.156	.143
W6_ST	.843	-.011	.176
TEMP_ST	.893	.188	.169
Rel_hum_tr_st	.726	.137	-.063
Radiation_st	.925	.159	-.333
GRAV_ST	-.039	-.224	.460
Potgrad_st	.603	-.323	.194
EY_30	.414	-.160	-.224
EX_30	-.051	.837	.224
F_ST_INV	.795	.039	-.088

Előállítási eljárás: Principal Axis Factoring.

Elforgatott faktor mátrix

	Faktor		
	1	2	3
TH_W_ST	.909	-.184	.128
W6_ST	.853	-.031	.111
TEMP_ST	.916	.148	.030
Rel_hum_tr_st	.724	.034	-.157
Radiation_st	.897	-.060	-.429
GRAV_ST	-.009	-.042	.511
Potgrad_st	.596	-.291	.257
EY_30	.379	-.268	-.179
EX_30	.027	.862	-.090
F_ST_INV	.784	-.072	-.149

Előállítási eljárás Principal Axis Factoring.

Forgatási eljárás: Varimax Kaiser normalizációval.

6.7. táblázat. A faktoregyütthatók mátrixa

6.8. táblázat. A faktoregyütthatók mátrixa varimax forgatás után

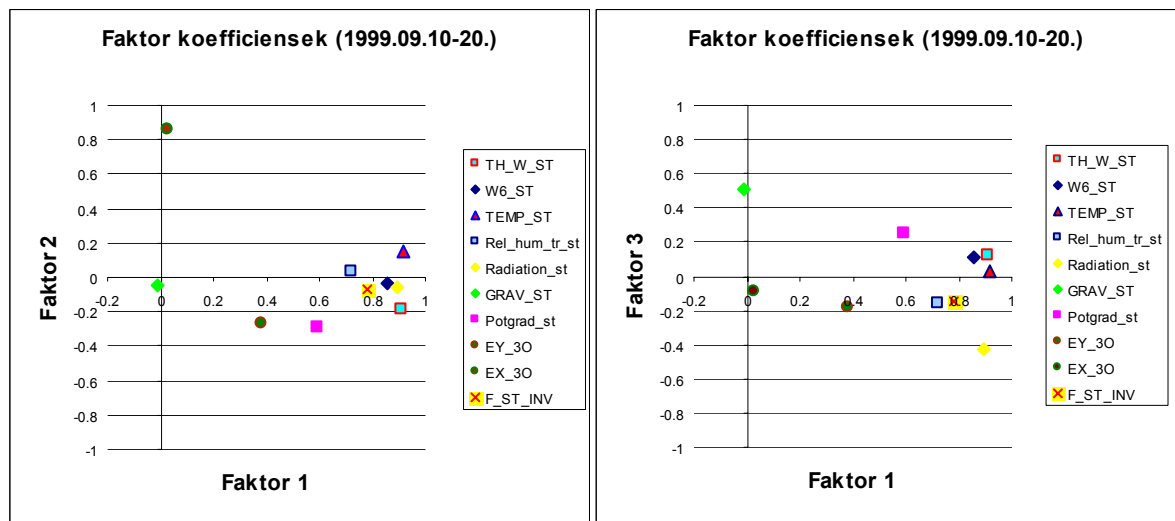
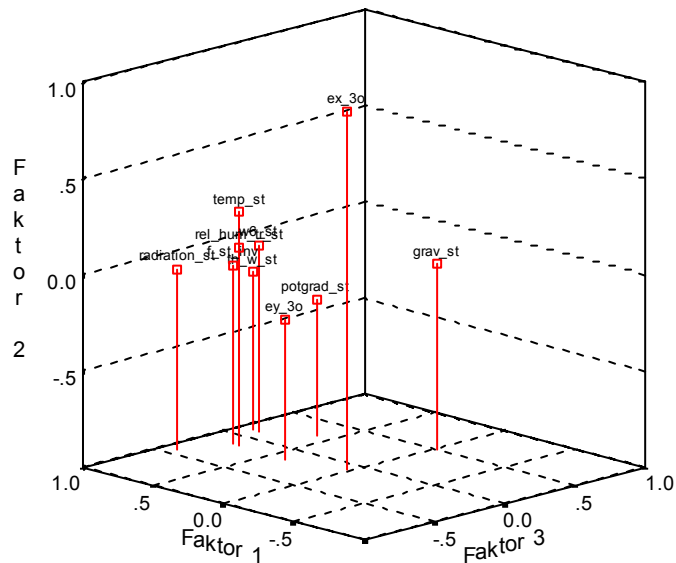
A kiválasztott három faktor faktoregyütthatóit a 6.7. táblázat tartalmazza. A faktoregyütthatók úgy is értelmezhetők, mint a megfigyelési változók és a faktorok közötti korrelációs együtthatók. Látható, hogy a különböző megfigyelési változókhoz tartozó faktoregyütthatók többnyire megoszlanak a faktorok között. Noha ezek a változók a faktorok, mint tengelyek által meghatározott faktortérben ábrázolva csoportokba tömörülhetnek, általában nem egyetlen tengely mentén, hanem a tengelyek által közrefogott szektorokban helyezkednek el. Ez megnehezíti a változóknak egyetlen háttérváltozóval való értelmezését. A 6.4.1. fejezetben említett egyszerű struktúra érdekében a tengelyeket el lehet (ortogonálisan vagy ferdeszöggel) forgatni, úgy, hogy a tengelyek áthaladjanak a csoportokon. A varimax ortogonális forgatással kapott faktoregyütthatókat tartalmazza a 6.8. táblázat, míg a 6.15. ábra a megfigyelési változóknak a faktortérben való elhelyezkedését szemlélteti.

Látható, hogy az első (csoport-) faktor a fanedvaramlás (TH_W_st), az elektromos potenciálkülönbség (W6_st), a hőmérséklet (TEMP_st), a relatív páratartalom, sugárzás, valamint a geomágneses tér változóit tartalmazza nagy súllyal. Közepes súllyal (0.596) jelentkezik ebben a faktorban a légköri potenciálgradiens, s gyenge közepessel (0.379) a K-NY-i tellurikus adatsor (Ey).

A második faktor egy egyedi faktor, és az É-D irányú tellurikus adatsor határozza meg. A harmadik faktor legjellemzőbb változója a gravitációs adatsor (kisebb negatív súllyal jelentkezik itt még a sugárzás). Lényegében ez azt mutatja, hogy a gravitációnak a 6.3.2.3. fejezetben ismertetett törzsátmérő-módosító, s ezen keresztül fanedvaramlás-befolyásoló hatása esetünkben nem mutatható ki, elhanyagolható.

A tellurikus és a földi mágneses adatsorok közötti nyilvánvaló összefüggés azért nem egyértelmű az analízis alapján, mert a tellurikus adatsorban a nagyobb periódustartományokban már nem a földi mágneses tér indukciós hatása fog érvényesülni, nagyobb lesz a zaj hatás (a periodusidő növekedésével az indukciós hatás csökken).

(Figyelembe kell venni azt a tényt is, hogy mivel a mágneses térváltozások periódusidejétől függ a tellurikus és mágneses adatok közötti fáziseltolódás mértéke, a fix idejű fáziseltolás nem feltétlenül javítja a korrelációt.) Ez tulajdonképpen nem probléma, mert a kísérlet szempontjából nem a szekundumos tartományú pulzációkra voltunk kíváncsiak, hanem arra, hogy a nagyobb periódusú földi áramok hogyan befolyásolják a fa elektromos terét. Az analízis alapján a fatörzsön mérhető elektromos potenciálkülönbségek és az É-D irányban mért tellurikus adatsor között egyáltalán nincs kapcsolat, míg a K-Ny irányú komponens esetében egy gyenge hatás mutatható ki.



6.15. a-c. ábra. A megfigyelési változók elhelyezkedése a faktortérben (a); az 1. és 2. faktor síkjában (b); az 1. és 3. faktor síkjában (c)

6.4.1.2. A 2. adatrendszer analízise

A 2. adatrendszer faktoranalízisét – az 1. adatrendszerhez hasonlóan – az SPSS programrendszer végeztem (principal axis factoring varimax forgatással). A 6.9. táblázat

tartalmazza a 2. adatrendszerre vonatkozó Kaiser-Meyer-Olkin mértéket valamint a Bartlett próbát, melyek alapján az adatrendszer alkalmas a faktoranalízisre.

KMO és Bartlett teszt

Kaiser-Meyer-Olkin mérték		.849
Bartlett-féle gömb próba	Approx. Chi-Square	12498.921
	df	66
	Sig.	.000

6.9. táblázat. Faktoranalízisre való alkalmassági vizsgálat a 2001.08.12-19. közötti időszak adatrendszerére

Az értelmezett teljes variancia

Faktor	Kezdeti sajátértékek			Faktorok előállításakor			Elforgatás után		
	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %	Teljes	A variancia %-ában	Kumulatív %
1	6.747	56.226	56.226	6.525	54.373	54.373	3.822	31.851	31.851
2	1.469	12.244	68.470	1.252	10.435	64.808	3.353	27.944	59.795
3	1.219	10.162	78.632	.930	7.752	72.560	1.532	12.765	72.560
4	.700	5.833	84.465						
5	.568	4.736	89.201						
6	.432	3.603	92.804						
7	.287	2.392	95.196						
8	.157	1.305	96.501						
9	.150	1.253	97.754						
10	.112	.937	98.691						
11	.102	.853	99.545						
12	.055	.455	100.000						

Előállítási eljárás: Principal Axis Factoring.

6.10. táblázat. A 2. adatrendszer faktoraihoz tartozó sajátértékek és a teljes varianciának a faktorokkal magyarázott hányadai

Elforgatott faktor mátrix

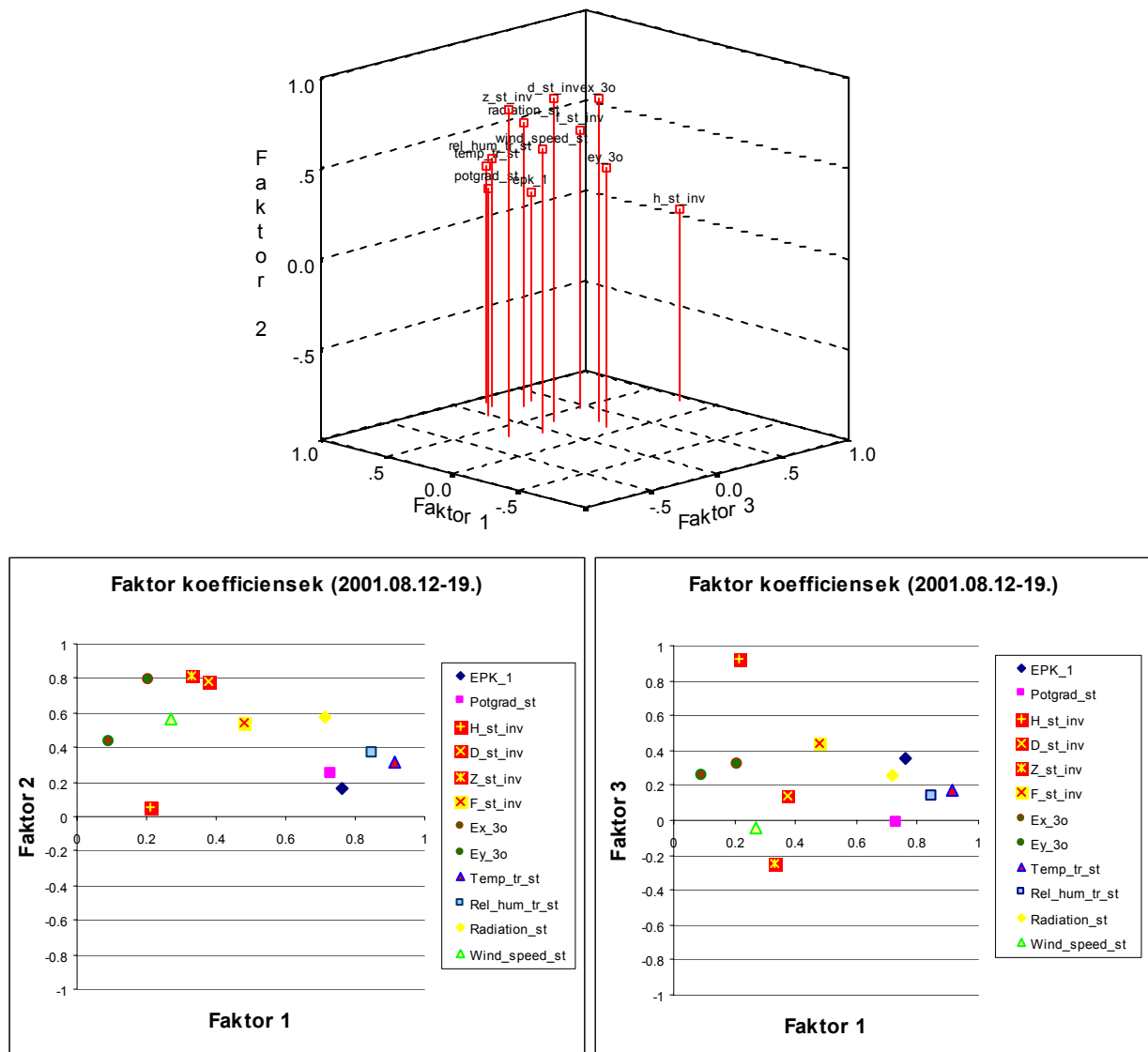
	Faktor		
	1	2	3
EPK_1	.761	.163	.350
Potgrad_st	.728	.254	-.007
H_st_inv	.212	.059	.924
D_st_inv	.376	.787	.138
Z_st_inv	.330	.811	-.247
F_st_inv	.479	.542	.438
Ex_3o	.207	.789	.318
Ey_3o	.094	.436	.253
Temp_tr_st	.911	.312	.168
Rel_hum_tr_st	.848	.371	.142
Radiation_st	.716	.573	.260
Wind_speed_st	.272	.560	-.043

Előállítási eljárás: Principal Axis Factoring.

Forgatási eljárás: Varimax Kaiser normalizációval

6.11. táblázat. A faktoregyütthatók mátrixa varimax forgatás után

A 2. adatrendszer 3, egynél nagyobb sajátértékű faktorai a teljes varianciának mintegy 72.56%-át magyarázzák (6.10. táblázat), ami a vizsgálat szempontjából jónak mondható.



6.16. a-c. ábra. A megfigyelési változók elhelyezkedése a faktortérben (a); az 1. és 2. faktor síkjában (b); az 1. és 3. faktor síkjában (c)

A kiválasztott három faktor varimax ortogonális forgatással kapott együtthatóit a 6.11. táblázat tartalmazza, míg a 6.16. ábra a megfigyelési változóknak a faktortérben való elhelyezkedését mutatja be. Megfigyelhető, hogy az egyes megfigyelési változók az 1. adatrendszer hasonló változóihoz képest kevésbé szóródtak szét a faktortérben, azonban az első faktort alapvetően ugyanazok a megfigyelési változók határozzák meg, mint az 1. adatrendszer esetében. Az elektromos potenciálkülönbség adatsorokból kialakított 1 főkomponens (EPK_1) mellett a hőmérséklet (TEMP_tr_st), a relatív páratartalom (Rel_hum_tr_st), a napsugárzás (Radiation) és a légköri elektromos potenciálgradiens (Potgrad_st) jelentkezik nagy súllyal, míg közepes factorsúlya van a földi mágneses tér totál vektorának (F_st_inv).

A második faktort leginkább a mágneses és tellurikus változók (a H_st_inv kivételével), valamint a sugárzás és a szélsébség (Wind_speed_st) alkotják, míg a 3. faktort a horizontális mágneses adatsor (H_st_inv).

6.4.2. Többváltozós regressziós modellek

6.4.2.1. Az 1. adatrendszer regresszió-analizise

A modellépítéshez a lépésenkénti (stepwise) lineáris regressziót választottam. A 6.12. táblázat a modellépítéshez felhasznált változókat, valamint a beléptetés kritériumait tartalmazza, a következő 6.13. táblázat pedig az egyes modellek magyarázóerejét mutatják be.

Beléptetett/eltávolított változók(a)

Modell	Beléptetett változók	Eltávolított változók	Eljárás
1	TH_W*	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
2	REL_HUM	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
3	POTGRAD	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
4	EY	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
5	Radiation	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
6	EX	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
7	GRAV	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).

a Fügő változó: W6

6.12. táblázat. A modellépítéshez felhasznált magyarázó változók és a beléptetés kritériumai

Modell összegzés(h)

Modell	R	R ²	Helyesbített R ²	A becslés std. hibája
1	.865(a)	.748	.748	.00379090
2	.879(b)	.773	.772	.00360068
3	.881(c)	.776	.776	.00357462
4	.883(d)	.779	.778	.00355351
5	.884(e)	.782	.781	.00353394
6	.885(f)	.783	.782	.00352290
7	.886(g)	.784	.783	.00351691

a Magyarázók: (konstans), TH_W*

b Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM

c Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation

f Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX

g Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX, GRAV

h Fügő változó: W6

6.13. táblázat. Az 1. adatrendszer regressziós együtthatói

Az R² regressziós együttható, mint ahogy a 3.5.3.2. képlet alapján látható, a regressziós értékek varianciájának és a függő változó varianciájának hányadosa, s azt mutatja meg, hogy a magyarázó változók a függő változó heterogenitásának mekkora részét magyarázzák. Az 1. adatrendszer esetében a magyarázóerő nagynak mondható: az elektromos potenciálkülönbség változásának csaknem mintegy 75%-át magyarázza a termometriás nedvzárlás-mérésből származó adatsor. Látható, hogy a másik négy változó hozzájárulása kb. 3%, ugyanis ezek beléptetésével az R² 78%-ra nő.

Az F-próba a szórásnégyzetek (varianciák) összehasonlításával mondja meg, hogy a megmagyarázott hányad elég nagy-e. Ha az F-értékekhez tartozó szignifikancia kicsi

(általában 0.05-nél kisebb), akkor el kell vetni azt a nullhipotézist, hogy a magyarázó változók és a magyarázandó változó függetlenek egymástól. A variancia-analízis táblázatban (6.14. táblázat) található nulla közeli értékű szignifikanciák így arra utalnak, hogy a regressziós modellek a teljes heterogenitás szignifikáns hányadát testesítik meg.

ANOVA(h) – variancia-analízis

Modell	Négyzet- összegek	Szabadsági fokok df	Variancia	F	Szig.	
1	Regresszió Reziduális Teljes	.044 .015 .058	1 1022 1023	.044 1.437E-05	3032.739	.000(a)
2	Regresszió Reziduális Teljes	.045 .013 .058	2 1021 1023	.023 1.296E-05	1736.736	.000(b)
3	Regresszió Reziduális Teljes	.045 .013 .058	3 1020 1023	.015 1.278E-05	1180.083	.000(c)
4	Regresszió Reziduális Teljes	.045 .013 .058	4 1019 1023	.011 1.263E-05	898.892	.000(d)
5	Regresszió Reziduális Teljes	.046 .013 .058	5 1018 1023	.009 1.249E-05	729.568	.000(e)
6	Regresszió Reziduális Teljes	.046 .013 .058	6 1017 1023	.008 1.241E-05	613.019	.000(f)
7	Regresszió Reziduális Teljes	.046 .013 .058	7 1016 1023	.007 1.237E-05	527.873	.000(g)

a Magyarázók: (konstans), TH_W*

b Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM

c Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation

f Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX

g Magyarázók: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX, GRAV

h Független változó: W6

6.14. táblázat. A lineáris regressziós modellek varianciánálízise

A 6.15. táblázat tartalmazza a regressziós együtthatókat, de mielőtt ezekre rátérnénk, meg kell vizsgálni azt, hogy az egyes független változók hatása szignifikáns-e. Ezt a kérdést a t-statisztikákkal lehet eldönteni. A t-érték valójában a regressziós együttható (B) és a hozzá tartozó standard hiba hányadosa. Amennyiben a t-értékhez tartozó szignifikancia kicsi (általában kisebb, mint 0.05), akkor el kell vetni azt a nullhipotézist, hogy nincs lineáris összefüggés a változók között, azaz ebben az esetben az egyes változók hatása szignifikáns.

A modellparamétereket vizsgálva felmerül a kérdés, hogy a meteorológiai paraméterek közül a hőmérséklet miért nem került be a modellbe. A kérdésre a választ a 6.16. táblázat mutatja meg, amely a modellből kizárt változókat tartalmazza. Látható, hogy a hőmérséklet változója a sugárzás modellbe lépésével kerül ki végelegesen a modellből, ugyanis a t-értékéhez tartozó szignifikancia ekkor nő meg 0.625-re, azaz a többi független változó hatásán túl már nem képes szignifikánsan hozzájárulni a magyarázathoz. A földi mágneses tér totális vektorának (F) t-értékéhez tartozó szignifikanciája a modellalkotás során pedig egyszer sem csökkent a választott küszöbérték, a 0.05-os szint alá. Ezzel kapcsolatban érdemes megvizsgálni a multikollinearitást (ez az a jelenség, amikor a független változók között lineáris összefüggés tapasztalható) mértékét meghatározó tolerancia-mutatókat is. A tolerancia ($T = 1 - R_j^2$) azt mutatja meg, hogy a j-dik független változó heterogenitásából mennyit hagy magyarázatlanul az összes többi független változó. A nullához közeli alacsony értékek magas multikollinearitást jeleznek. Látható, hogy a hőmérséklet és a mágneses

adatsorok esetében a tolerancia-mutató alacsony, azaz ezek a változók (a többi változó hatása miatt) nem nagyon járulnak hozzá a modellek magyarázóerejének növeléséhez.

Együtthatók(a)

Modell	Nem standardizált regresszós együtthatók		Standardizált regr. együtthatók	t	Szig.	95%-os konfidencia intervallum B-re		
	B	Std. hiba	β			Alsó határ	Felső határ	
1 (Constant)	.2927	.001		391.473	.000	.2912	.2941	
	TH_W*	-.0313	.001	-.865	-55.070	.000	-.0324	-.0302
2 (Constant)	.3467	.005		67.183	.000	.3366	.3568	
	TH_W*	-.0311	.001	-.859	-57.583	.000	-.0322	-.0300
	REL_HUM	-.0007	7.034E-05	-.158	-10.575	.000	-.0009	-.0006
3 (Constant)	.3518	.005		66.665	.000	.3414	.3621	
	TH_W*	-.0294	.001	-.812	-42.772	.000	-.0307	-.0280
	REL_HUM	-.0008	7.247E-05	-.174	-11.332	.000	-.0010	-.0007
	POTGRAD	-4.3923E-05	1.100E-05	-.077	-3.993	.000	-6.5509E-05	-2.2336E-05
4 (Constant)	.3504	.005		66.635	.000	.3401	.3607	
	TH_W*	-.0292	.001	-.807	-42.596	.000	-.0305	-.0278
	REL_HUM	-.0007	8.612E-05	-.138	-7.550	.000	-.0008	-.0005
	POTGRAD	-4.9011E-05	1.103E-05	-.086	-4.445	.000	-7.0646E-05	-2.7376E-05
	EY	-3.3209E-06	9.158E-07	-.066	-3.626	.000	-5.1180E-06	-1.5239E-06
5 (Constant)	.3431	.006		60.912	.000	.3320	.3541	
	TH_W*	-.0273	.001	-.754	-31.347	.000	-.0290	-.0256
	REL_HUM	-.0006	8.890E-05	-.120	-6.373	.000	-.0007	-.0004
	POTGRAD	-4.2211E-05	1.113E-05	-.074	-3.791	.000	-6.4060E-05	-2.0362E-05
	EY	-3.6488E-06	9.155E-07	-.073	-3.985	.000	-5.4453E-06	-1.8523E-06
	Radiation	-3.0929E-06	8.811E-07	-.081	-3.510	.000	-4.8219E-06	-1.3639E-06
6 (Constant)	.3599	.008		43.005	.000	.3435	.3764	
	TH_W*	-.0269	.001	-.743	-30.542	.000	-.0286	-.0252
	REL_HUM	-.0005	8.888E-05	-.116	-6.166	.000	-.0007	-.0004
	POTGRAD	-4.6284E-05	1.120E-05	-.081	-4.132	.000	-6.8263E-05	-2.4306E-05
	EY	-4.2429E-06	9.385E-07	-.084	-4.521	.000	-6.0845E-06	-2.4013E-06
	Radiation	-2.7183E-06	8.891E-07	-.071	-3.057	.002	-4.4630E-06	-9.7361E-07
	EX	-2.1166E-06	7.788E-07	-.044	-2.718	.007	-3.6448E-06	-5.8837E-07
7 (Constant)	.3592	.008		42.952	.000	.3428	.3756	
	TH_W*	-.0272	.001	-.751	-30.529	.000	-.0289	-.0254
	REL_HUM	-.0006	8.937E-05	-.121	-6.385	.000	-.0007	-.0004
	POTGRAD	-4.7109E-05	1.119E-05	-.083	-4.211	.000	-6.9063E-05	-2.5154E-05
	EY	-3.9721E-06	9.456E-07	-.079	-4.201	.000	-5.8277E-06	-2.1166E-06
	Radiation	-2.9681E-06	8.954E-07	-.078	-3.315	.001	-4.7252E-06	-1.2110E-06
	EX	-1.8862E-06	7.851E-07	-.039	-2.403	.016	-3.4267E-06	-3.4559E-07
	GRAV	6.999E-07	3.312E-07	.034	2.113	.035	5.001E-08	1.350E-06

a Független változó: W6

6.15. táblázat. A modellek együtthatói

Kizárt változók(h)

Modell	β	t	Szig.	Parciális korreláció	Kollinearitás	
					Tolerancia	
1	EY	-.128(a)	-8.448	.000	-.256	1.000
	POTGRAD	-.019(a)	-.941	.347	-.029	.632
	F	.036(a)	1.622	.105	.051	.514
	TEMP	-.199(a)	-8.300	.000	-.251	.404
	REL_HUM	-.158(a)	-10.575	.000	-.314	.999
	Radiation	-.132(a)	-5.698	.000	-.176	.444
	EX	-.030(a)	-1.793	.073	-.056	.898
	GRAV	.021(a)	1.220	.223	.038	.861
2	EY	-.056(b)	-3.058	.002	-.095	.665
	POTGRAD	-.077(b)	-3.993	.000	-.124	.587
	F	.032(b)	1.541	.124	.048	.514
	TEMP	-.100(b)	-3.725	.000	-.116	.304
	Radiation	-.086(b)	-3.773	.000	-.117	.424
	EX	-.030(b)	-1.887	.059	-.059	.898
	GRAV	.033(b)	2.063	.039	.064	.856
3	EY	-.066(c)	-3.626	.000	-.113	.654
	F	.016(c)	.776	.438	.024	.493
	TEMP	-.077(c)	-2.787	.005	-.087	.283
	Radiation	-.071(c)	-3.097	.002	-.097	.409
	EX	-.034(c)	-2.204	.028	-.069	.894
	GRAV	.039(c)	2.443	.015	.076	.849
4	F	.013(d)	.599	.549	.019	.492
	TEMP	-.064(d)	-2.295	.022	-.072	.277
	Radiation	-.081(d)	-3.510	.000	-.109	.405
	EX	-.051(d)	-3.218	.001	-.100	.840
	GRAV	.033(d)	2.046	.041	.064	.838
5	F	-.045(e)	-1.769	.077	-.055	.326
	TEMP	-.016(e)	-.489	.625	-.015	.197
	EX	-.044(e)	-2.718	.007	-.085	.819
	GRAV	.040(e)	2.465	.014	.077	.827
6	F	-.043(f)	-1.677	.094	-.053	.326
	TEMP	-.024(f)	-.726	.468	-.023	.196
	GRAV	.034(f)	2.113	.035	.066	.811
7	F	-.035(g)	-1.351	.177	-.042	.317
	TEMP	-.012(g)	-.364	.716	-.011	.190

a Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*

b Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM

c Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation

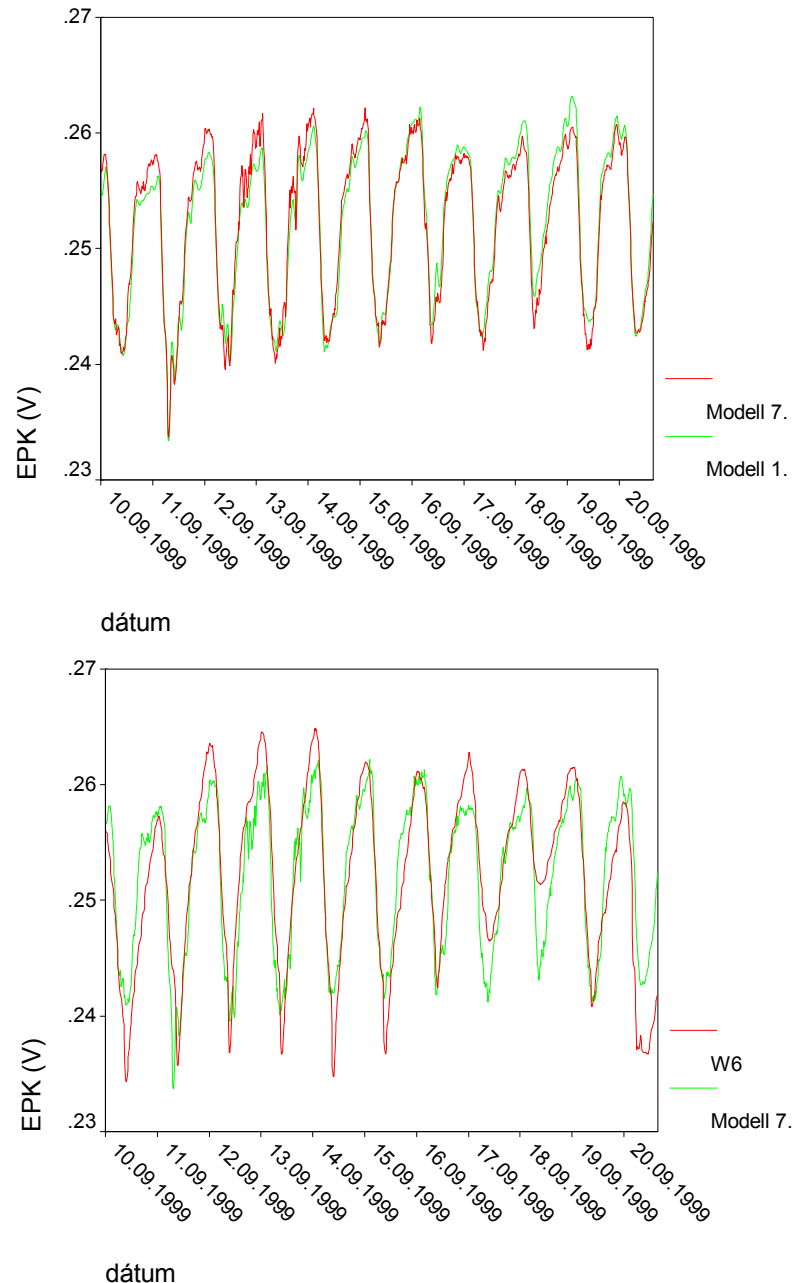
f Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX

g Magyarázó változók a modellben: (konstans), TH_W*, REL_HUM, POTGRAD, EY, Radiation, EX, GRAV

h Független változó: W6

6.16. táblázat. A modellekből kizárt változók

A β (standardizált regressziós együttható) értékek jelzik, hogy ténylegesen melyik változó hatása erősebb az adott modellben. Ezek kiszámítása úgy történik, hogy az összes változót standardizálva (egységnyi szórás, 0 várható érték) léptetjük be a modellbe. Így a független változók eltérő szóródásából származó torzítások kiküszöbölhetők. Ezek alapján elmondható, hogy valamennyi modell esetében a termometriás adatsor határozza meg legjobban az elektromos potenciálkülönbség változását (a β értékek rendre -0.8 körül változnak a TH_W esetében, míg a többi változónál lényegesen kisebb abszolút értékűek).

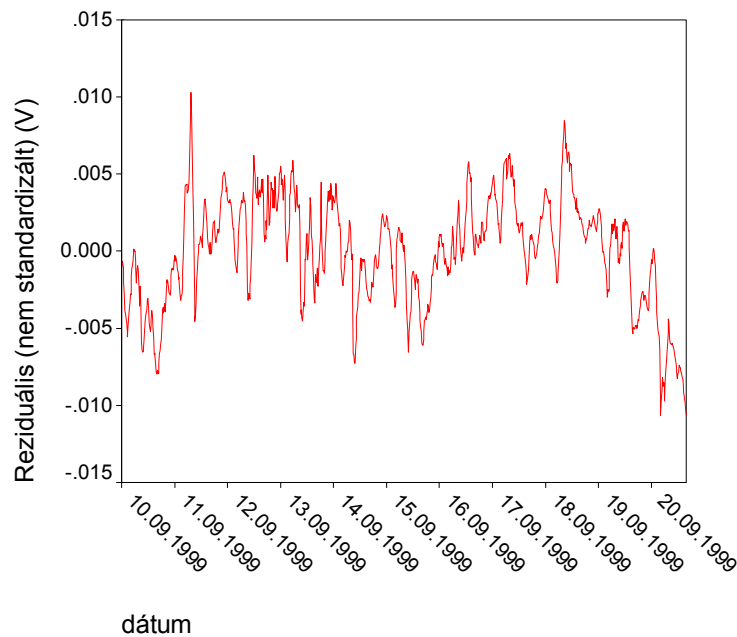


6.17. a-b. ábra. A modell 1. és modell 7. összehasonlítása (a); valamint a W6 és a modell 7. összehasonlítása (b.)

A legjobb illeszkedést biztosító 7. modell alapján a függő és független változók között a következő összefüggést lehet felírni a vizsgált időszakra:

$$\begin{aligned}
 W6^* = & (-0.027 \pm 0.0018) \cdot TH_W - (0.0006 \pm 1.78 \cdot 10^{-4}) \cdot REL_HUM - \\
 & (4.711 \cdot 10^{-5} \pm 2.24 \cdot 10^{-5}) \cdot POTGRAD - (3.972 \cdot 10^{-6} \pm 1.89 \cdot 10^{-6}) \cdot Ey - \\
 & (2.968 \cdot 10^{-6} \pm 1.79 \cdot 10^{-6}) \cdot Radiation - (1.886 \cdot 10^{-6} \pm 1.57 \cdot 10^{-6}) \cdot Ex + \\
 & (6.999 \cdot 10^{-7} \pm 6.62 \cdot 10^{-7}) \cdot GRAV + (0.343 \pm 0.0112)
 \end{aligned}
 \tag{6.x.9.}$$

Ezt az összefüggést (az eredeti W6 adatsorral összehasonlítva) ábrázolja a 6.17.b. ábra. A becsült és a mért adatsorok eltérését az 6.18. ábra mutatja be. Látható, hogy az eltérés javarészt néhány mV, így a modell illeszkedését jónak vehetjük a vizsgált, napsütéses, csapadékmentes időszakra.



6.18. ábra. A W6 és a modell 7. közötti eltérés (reziduálisok)

Mivel a legegyszerűbb és a legösszetettebb modell között lényegében elhanyagolható a különbség (6.17.a. ábra), a nedvzárlás és a mért elektromos potenciálkülönbség adatsorok közötti sztochasztikus kapcsolat leírására az első 3-4 modell valamelyike még megfelelően használható.

Ezek alapján elmondható, hogy az elektromos potenciálkülönbséget legfőképp a nedvzárlás és a relatív páratartalom határozza meg, valamint statisztikai kapcsolat mutatható ki a légköri elektromos potenciálgradienssel és a telluráramokkal kapcsolatban is.

6.4.2.2. A 2. adatrendszer regresszió-analízise

A 2. adatrendszer vizsgálatához a komponens-együtthatók (ld. 6.4.2. fejezet 1. táblázat) alapján előállítottam az eredeti, nem standardizált elektromos potenciálkülönbség adatsorokból az 1. főkomponensnek megfelelő EPK1 változót, s a regresszió-analízisbe ezt a változót, mint függő változót vontam be.

Beléptetett/eltávolított változók(a)

Modell	Beléptetett változók	Eltávolított változók	Eljárás
1	TEMP	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
2	REL_HUM	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
3	POTGRAD	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
4	EY	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
5	Wind_speed	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
6	Z	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
7	D	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).
8	Radiation	.	Lépésenkénti (Kritérium:F valószínűsége a belépéshez <= .050, F valószínűsége az eltávolításhoz >= .100).

a Függő változó: EPK1

6.17. táblázat. A modellépítéshez felhasznált magyarázó változók és a beléptetés kritériumai

Modell összegzés(i)

Modell	R	R ²	Helyesbített R ²	A becslés std. hibája
1	.966(a)	.934	.934	.00298527
2	.972(b)	.945	.945	.00270897
3	.974(c)	.948	.948	.00264433
4	.975(d)	.950	.950	.00258808
5	.975(e)	.951	.951	.00257506
6	.976(f)	.952	.952	.00254800
7	.976(g)	.953	.952	.00253191
8	.976(h)	.953	.953	.00252042

a Magyarázók: (konstans), TEMP

b Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM

c Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed

f Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z

g Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D

h Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D, Radiation

i Függő változó: EPK1

6.18. táblázat. A 2. adatrendszer regressziós együtthatói

A 6.17. táblázat tartalmazza a modellépítéshez felhasznált változók listáját, míg a 6.18. táblázat az adatrendszer regressziós együtthatóit mutatja be. Látható, hogy valamennyi modell esetében a magyarázó változók szinte teljesen megmagyarázzák a függő változó heterogenitását: $0.934 < R^2 < 0.953$.

ANOVA(i) – variancia-analízis

	Modell	Négyzet- összegek	Szabadsági fokok df	Variancia	F	Szig.
1	Regression	.126	1	.126	14148.817	.000(a)
	Residual	.009	1006	8.912E-06		
	Total	.135	1007			
2	Regression	.128	2	.064	8699.453	.000(b)
	Residual	.007	1005	7.339E-06		
	Total	.135	1007			
3	Regression	.128	3	.043	6103.530	.000(c)
	Residual	.007	1004	6.992E-06		
	Total	.135	1007			
4	Regression	.128	4	.032	4790.087	.000(d)
	Residual	.007	1003	6.698E-06		
	Total	.135	1007			
5	Regression	.128	5	.026	3873.142	.000(e)
	Residual	.007	1002	6.631E-06		
	Total	.135	1007			
6	Regression	.129	6	.021	3300.267	.000(f)
	Residual	.006	1001	6.492E-06		
	Total	.135	1007			
7	Regression	.129	7	.018	2866.840	.000(g)
	Residual	.006	1000	6.411E-06		
	Total	.135	1007			
8	Regression	.129	8	.016	2532.685	.000(h)
	Residual	.006	999	6.353E-06		
	Total	.135	1007			

a Magyarázók: (konstans), TEMP

b Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM

c Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed

f Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z

g Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D

h Magyarázók: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D, Radiation

i Független változó: EPK1

6.19. táblázat, A lineáris regressziós modellek varianciánálízise

A variancia-analízis (6.19. táblázat) alapján a kapott nyolc modell esetében el kell vetni azt a nullhipotézist, hogy a magyarázó változók és a függő változó függetlenek egymástól, azaz a modellek szignifikáns hányadot magyaráznak az EPK1 heterogenitásából.

A 6.20. táblázat tartalmazza az egyes modellek paramétereit. Jól látható, hogy a vizsgált időszakban lényegében a hőmérséklet (TEMP) határozza meg az elektromos potenciálkülönbségek változását. Ez a tény már a modellek regressziós együtthatóit (6.18. táblázat) szemügyre véve is nyilvánvalóvá válik, tekintve, hogy a hőmérséklet, amikor egyedüli független változó, az elektromos potenciálkülönbség varianciájából 93.4%-ot megmagyaráz, míg az összes többi változó hozzájárulása kevesebb, mint 2%! A modellparaméterek táblázatának β oszlopa, mely a standardizált regressziós együtthatókat tartalmazza, azt is megmutatja, hogy a hőmérséklet mellett még a relatív páratartalom (REL_HUM) is érzékelteti hatását, bár ez a hatás a hőmérsékletének (-1.111) mintegy a hetede (-0.163).

A végső modellbe bekerült többi változó standardizált regressziós együtthatója abszolút értékben kisebb, mint 0.1, azaz ezeknek a változóknak a magyarázóereje csekélynek mondható.

A modellekből ezúttal a geomágneses tér totál vektora (F), a horizontális komponens (H), valamint az É-D irányú tellurikus adatsor (Ex) esett ki a modellekből (6.21. táblázat), mivel a többi független változóhoz képest nem tudtak szignifikáns részt hozzátenni a magyarázathoz (a t-khez tartozó szignifikancia nagyobb volt, mint 0.05).

Együtthatók(a)

Modell	Nem standardizált regresszós együtthatók		Standardizált regr. együtthatók	t	Szig.	95%-os konfidencia intervallum B-re	
	B	Std. hiba	β				B
1 (konstans)	.447	.0004		1028.189	.000	.4461	.4478
TEMP	-.002	1.822E-05	-.966	-118.949	.000	-.0022	-.0021
2 (konstans)	.486	.0027		181.531	.000	.4807	.4912
TEMP	-.002	2.188E-05	-1.060	-108.712	.000	-.0024	-.0023
REL_HUM	-.001	4.303E-05	-.144	-14.720	.000	-.0007	-.0005
3 (konstans)	.495	.0029		171.517	.000	.4890	.5003
TEMP	-.003	2.782E-05	-1.117	-90.053	.000	-.0026	-.0025
REL_HUM	-.001	4.657E-05	-.176	-16.677	.000	-.0009	-.0007
POTGRAD	6.220E-05	8.732E-06	.067	7.123	.000	4.506E-05	7.933E-05
4 (konstans)	.461	.0057		81.134	.000	.4503	.4726
TEMP	-.003	2.839E-05	-1.141	-90.142	.000	-.0026	-.0025
REL_HUM	-.001	4.602E-05	-.186	-17.806	.000	-.0009	-.0007
POTGRAD	6.272E-05	8.547E-06	.067	7.339	.000	4.595E-05	7.949E-05
EY	9.067E-06	1.350E-06	.051	6.717	.000	6.418E-06	1.172E-05
5 (konstans)	.467	.0059		78.904	.000	.4557	.4789
TEMP	-.003	2.917E-05	-1.152	-88.573	.000	-.0026	-.0025
REL_HUM	-.001	4.863E-05	-.198	-17.976	.000	-.0010	-.0008
POTGRAD	6.019E-05	8.538E-06	.065	7.050	.000	4.344E-05	7.694E-05
EY	8.376E-06	1.359E-06	.047	6.164	.000	5.710E-06	1.104E-05
Wind_speed	.001	.0003	.027	3.342	.001	.0004	.0016
6 (konstans)	-2.357	.5968		-3.949	.000	-3.5277	-1.1856
TEMP	-.003	3.143E-05	-1.126	-80.347	.000	-.0026	-.0025
REL_HUM	-.001	5.559E-05	-.168	-13.356	.000	-.0009	-.0006
POTGRAD	6.348E-05	8.477E-06	.068	7.489	.000	4.685E-05	8.012E-05
EY	7.702E-06	1.352E-06	.043	5.696	.000	5.049E-06	1.036E-05
Wind_speed	.002	.0003	.044	5.027	.000	.0010	.0022
Z	6.538E-06	1.381E-06	.048	4.732	.000	3.827E-06	9.248E-06
7 (konstans)	-3.586	.6793		-5.279	.000	-4.9192	-2.2531
TEMP	-.003	3.138E-05	-1.131	-80.833	.000	-.0026	-.0025
REL_HUM	-.001	5.574E-05	-.162	-12.824	.000	-.0008	-.0006
POTGRAD	5.917E-05	8.503E-06	.064	6.958	.000	4.248E-05	7.585E-05
EY	5.158E-06	1.508E-06	.029	3.419	.001	2.198E-06	8.118E-06
Wind_speed	.001	.0003	.041	4.679	.000	.0009	.0021
Z	9.456E-06	1.582E-06	.070	5.977	.000	6.351E-06	1.256E-05
D	-2.097E-06	5.652E-07	-.043	-3.710	.000	-3.2060E-06	-9.8780E-07
8 (konstans)	-2.972	.7032		-4.226	.000	-4.3516	-1.5918
TEMP	-.002	3.415E-05	-1.111	-72.986	.000	-.0026	-.0024
REL_HUM	-.001	5.550E-05	-.163	-12.936	.000	-.0008	-.0006
POTGRAD	6.878E-05	8.986E-06	.074	7.653	.000	5.114E-05	8.641E-05
EY	4.920E-06	1.503E-06	.028	3.273	.001	1.970E-06	7.871E-06
Wind_speed	.002	.0003	.051	5.519	.000	.0012	.0025
Z	8.036E-06	1.637E-06	.060	4.909	.000	4.823E-06	1.125E-05
D	-2.346E-06	5.680E-07	-.048	-4.129	.000	-3.4602E-06	-1.2309E-06
Radiation	-1.954E-06	6.135E-07	-.046	-3.185	.001	-3.1578E-06	-7.4990E-07

a Fügő változó: EPK1

6.20. táblázat. A lineáris modellek együtthatói

Kizárt változók(h)

Modell	β	t	Szig.	Parciális korreláció	Kollinearitás	
					Tolerancia	
1	POTGRAD	-.001(a)	-.081	.935	-.003	.721
	H	-.043(a)	-4.505	.000	-.141	.721
	D	.006(a)	.661	.509	.021	.737
	Z	.084(a)	10.615	.000	.318	.951
	F	.056(a)	5.493	.000	.171	.617
	EX	-.040(a)	-4.634	.000	-.145	.889
	EY	.032(a)	3.734	.000	.117	.883
	REL_HUM	-.144(a)	-14.720	.000	-.421	.571
	Radiation	-.062(a)	-5.544	.000	-.172	.514
	Wind_speed	-.014(a)	-1.700	.089	-.054	.958
2	POTGRAD	.067(b)	7.123	.000	.219	.586
	H	-.006(b)	-.611	.541	-.019	.659
	D	-.048(b)	-5.225	.000	-.163	.633
	Z	.021(b)	2.174	.030	.068	.561
	F	.014(b)	1.421	.156	.045	.556
	EX	-.004(b)	-.537	.592	-.017	.804
	EY	.050(b)	6.482	.000	.200	.863
	Radiation	.012(b)	1.003	.316	.032	.401
	Wind_speed	.039(b)	4.751	.000	.148	.791
3	H	-.009(c)	-.995	.320	-.031	.657
	D	-.038(c)	-4.227	.000	-.132	.617
	Z	.029(c)	3.050	.002	.096	.554
	F	.020(c)	2.091	.037	.066	.552
	EX	-.004(c)	-.539	.590	-.017	.804
	EY	.051(c)	6.717	.000	.207	.863
	Radiation	-.019(c)	-1.578	.115	-.050	.351
	Wind_speed	.034(c)	4.252	.000	.133	.785
4	H	-.003(d)	-.336	.737	-.011	.650
	D	-.018(d)	-1.800	.072	-.057	.522
	Z	.027(d)	2.886	.004	.091	.553
	F	.019(d)	2.045	.041	.064	.552
	EX	-.012(d)	-1.478	.140	-.047	.789
	Radiation	-.023(d)	-1.971	.049	-.062	.351
	Wind_speed	.027(d)	3.342	.001	.105	.767
5	H	-.001(e)	-.086	.931	-.003	.647
	D	-.009(e)	-.837	.403	-.026	.475
	Z	.048(e)	4.732	.000	.148	.459
	F	.029(e)	2.985	.003	.094	.518
	EX	-.025(e)	-2.945	.003	-.093	.680
	Radiation	-.056(e)	-4.180	.000	-.131	.266
6	H	.009(f)	.986	.325	.031	.615
	D	-.043(f)	-3.710	.000	-.117	.357
	F	.017(f)	1.648	.100	.052	.470
	EX	-.007(f)	-.729	.466	-.023	.515
	Radiation	-.038(f)	-2.621	.009	-.083	.229
7	H	.009(g)	1.065	.287	.034	.615
	F	.013(g)	1.322	.187	.042	.466
	EX	-.022(g)	-2.128	.034	-.067	.456
	Radiation	-.046(g)	-3.185	.001	-.100	.225
8	H	-.004(h)	-.364	.716	-.012	.496
	F	-.001(h)	-.123	.902	-.004	.371
	EX	-.007(h)	-.600	.548	-.019	.338

a Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP

b Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM

c Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD

d Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY

e Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed

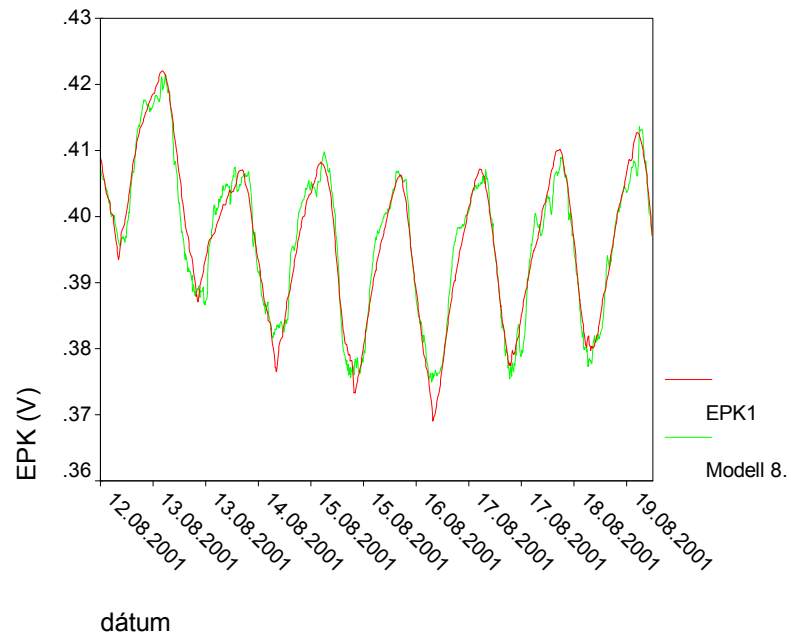
f Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z

g Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D

h Magyarázó változók a modellben: (konstans), TEMP, REL_HUM, POTGRAD, EY, Wind_speed, Z, D, Radiation

i Független változó: EPK1

6.21. táblázat. A modellekből kizárt változók



6.19. ábra. Az EPK1 és a modell 8. összehasonlítása

A 6.19. ábra az elektromos potenciálkülönbség adatsort és a legjobb illeszkedést biztosító 8. modellt mutatja be.

A faktor- és regresszió-analízisek eredményeinek értékelése:

A 6.8. és 6.11. táblázatok alapján látható, hogy mindkét adatrendszer esetében az elektromos potenciálkülönbséggel – és az 1. adatrendszer esetében a nedvaramlás adatsorral – erős kapcsolatot mutató 1. faktorok alapvetően hasonló összetételűek. Ezeket a faktorokat az elektromos potenciálkülönbség és nedvaramlás mellett, a hőmérséklet, a relatív páratartalom, a radiáció és a légköri elektromos potenciálgradiens határozza meg, de kisebb-nagyobb faktoregyütthatóval jelentkezik a geomágneses tér totálvektora és a K-Ny-i tellurikus adatsor is. Gyakorlatilag tehát az ezeket a faktorokat alkotó változók határozzák meg a vizsgálat tárgyát képező komplex jelenséget.

A regressziós modellek annyiban árnyalják tovább ezt a képet, hogy azt is megmutatják, melyik tényező milyen mértékben járul hozzá az elektromos potenciálkülönbségekhez. Itt némi ellentmondást lehetne felfedezni a regresszióanalízis és a faktoranalízis eredményei között, mivel a regressziós modellekbe olyan változók (pl. gravitációs adatsor) is bekerültek, amelyek a faktoranalízis során nem mutattak különösebb összefüggést az 1. faktorokat meghatározó változókkal. Az ellentmondás feloldását a standardizált regressziós együtthatók adják, ugyanis ezek alapján jól látható, hogy a kérdéses változók β -ja kicsi, azaz felmerül a gyanú, hogy ezek a változók valójában nem befolyásolják az elektromos potenciálkülönbségeket. Ezzel kapcsolatban fontos kiemelni, hogy a regressziószámítás eredményét nem lehet automatikusan ok-okozati összefüggésként értelmezni. A vizsgálat eredményei csak a változók közötti statisztikai kapcsolat meglétét, intenzitását és együttmozgását fejezi ki.

Visszatérve a regresszióanalízishez, a 6.15. és 6.20. táblázat azt mutatja, hogy a két adatrendszer regressziós modelljei szintén nagyon hasonlóak. Mivel a legbonyolultabb (legtöbb változót tartalmazó) modelleknél a modellekbe később bekerülő változók standardizált regressziós együtthatói kicsik ($\beta < 0.1$), ezért elegendő csupán 3, maximum 4

változót, azaz a 3. és 4. modellekkel érdemes továbbdolgozni. A két adatrendszer megfelelő modelljei között az eltérés csupán abban van, hogy az 1. adatrendszerben szereplő themometriás nedváraamlás adatsort a 2. adatrendszerrel a hőmérséklet helyettesíti (az 1. adatrendszerrel a magas multikollinearitás miatt nem került modellbe), ami arra utal, hogy valamennyi környezeti változó közül a hőmérséklet hatása a legnagyobb.

Érdeemes pár szót ejteni a radiációról is, amelynek regressziós modellbeli súlya csekély, annak ellenére, hogy a faktoranalízis nagyobb hatást sugallt neki. Hasonló a helyzet a geomágneses tér totálvektorával, ugyanis ennek hatását a többi változó olyannyira elfedi, hogy nem került be a modellekbe.

6.4.2.3. A modellek validálása

Amennyiben a 2. adatrendszer modelljeit az 1. adatrendszerre alkalmazzuk (az előzők értelmében ezt a 3. ill. 4. modellre érdemes elvégezni), akkor tulajdonképpen végrehajtjuk ezeknek a modelleknek a validációját. (Az 1. adatrendszer modelljeinek validációjától a themometriás nedváraamlás adatsor hiányában el kell tekinteni.) A validáció során e modellek alapján számolt – becsült – potenciálkülönbség adatsorral, mint magyarázó változóval hajtunk végre regresszióanalízist. Az analízisek kivonatát a 6.22. és 6.23. táblázatok tartalmazzák. Látható, hogy mindkét modell esetében a regressziós együtthatók közelítik a 0.7-et, ami az elektromos potenciálkülönbség változékonyságát tekintve jónak számít. A modellek illeszkedésének jóságát a 6.20.a-b. ábrákon lehet szemügyre venni. A reziduálisok változása (nulla körül szóródó értékek) és a regressziós együtthatók alapján a 2. adatrendszer modelljei elfogadhatók.

Modell összegzés (c)

Modell	R	R ²	Helyesbített R ²	A becslés std. hibája
3	.807(a)	.652	.652	.00421861
4	.834(b)	.695	.695	.00394741

a Magyarázó: (konstans), MODELL_3

b Magyarázó: (konstans), MODELL_4

c Független változó: W6

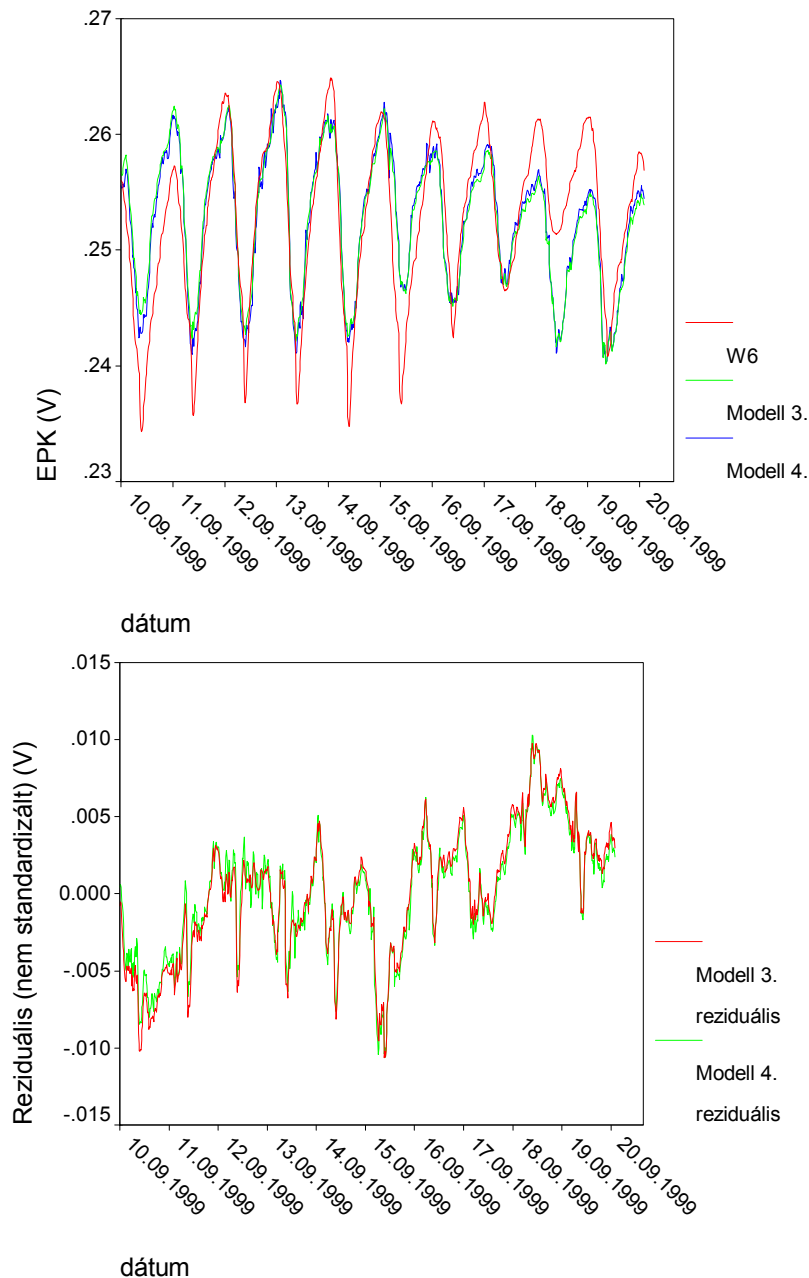
6.22. táblázat. A 2. adatrendszer 3. és 4. modelljeinek az 1. adatrendszerre való alkalmazásakor kapott regressziós együtthatói

Együtthatók(a)

Modell	Nem standardizált regressziós együtthatók		Standardizált regr. együtthatók	t	Szig.
	B	Std. hiba	β		
3 (konstans)	.062	.004		13.982	.000
MODELL_3	.518	.012	.807	42.560	.000
4 (konstans)	.050	.004		11.645	.000
MODELL_4	.557	.012	.834	46.971	.000

a Független változó: W6

6.23. táblázat. A lineáris modellek együtthatói



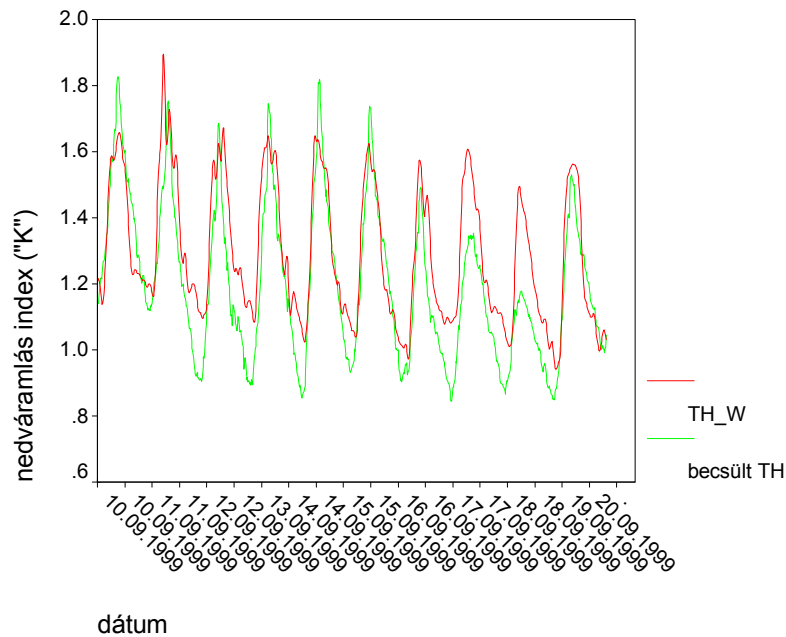
6.20. ábra. A 2. adatrendszer 3-4. modelljeinek validálása; (a) az elektromos potenciálkülönbség és a modellek összehasonlítása; (b) az elektromos potenciálkülönbség és a modellek közötti eltérés

6.4.3. Tapasztalati modell a nedvzárlás becslésére

Az előző, validált modellek alapján gyakorlatilag lehetővé válik a nedvzárlás intenzitás (K) becslése az elektromos potenciálkülönbségek alapján. A becslést az 1. adatrendszerrel kapott 4. modell alapján végeztem el:

$$K_{\text{becsült}} = \frac{(W6 - 0.3504 + 0.0007 \cdot \text{REL_HUM} + 4.9011 \cdot 10^{-5} \cdot \text{POTGRAD} + 3.3209 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Ey})}{-0.0273}$$

A 6.21. ábra alapján a modell illeszkedése jónak mondható. A két adatsor között a korrelációs koefficiens a két adatsor között 0.88, ami a becslés szempontjából szintén elfogadható.



6.21. ábra. A becsült és mért nedváramlási index (K) összehasonlítása

Amennyiben a nedváramlás adatsor nem áll rendelkezésre, a modell-kalibrációkhoz függő változóként felhasználható az evapotranszpiráció számított adatsora is.

Az aktív felszín evapotranszpirációjának mértékét a levegőnek a levegő párafelvevő képessége és a felszín páraleadó képessége határozza meg. Ideális esetben a felszín a légkör páraéhségének megfelelő mennyiségű vizet ad le. Ennek mértéke a potenciális evapotranszpiráció. Az aktív felszín vízkészletének csökkenésével azonban a páraleadás mértéke is csökken, így a tényleges párolgás általában gyengébb intenzitású, mint a potenciális.

A tényleges evapotranszpiráció kiszámítására a FAO a Penman-féle félempirikus módszer (Penman, 1948) módosított változatát, a Penman-Monteith eljárást javasolja. Ez a módszer az energiamérlegre épül, de figyelembe veszi a turbulens diffúzió hatását:

$$TET = \frac{R_0 - S + \rho * c_p * (E - e) * 1 / r_a}{\Delta + (1 + r_c / r_a)} \quad (\text{mm} * \text{idő}^{-1}), \quad (6.4.5.1.)$$

ahol: R_0 – a sugárzási egyenleg ($\text{J}/\text{cm}^2/\text{idő}$),
 S – a talaj hőforgalma ($\text{J}/\text{cm}^2/\text{idő}$),
 ρ – a levegő sűrűsége (g/cm^3),
 c_p – a levegő fajhője ($\text{J}/\text{g}/\text{K}$),
 $(E - e)$ – telítési hiány (E : telítettségi párányomás, e : parciális párányomás) (hPa),

$$E = 6.107 * 10^{\frac{7.5 * T}{235 + T}} \dots (\text{hPa}), \quad (6.4.5.2.)$$

$$e = \frac{E * f}{100} \quad (\text{hPa}), \quad (6.4.5.3.)$$

ahol: T – hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$),
 f – a relatív páratartalom.

A Δ a telítési görbe hajlásának 1°C -ra eső értéke:

$$\Delta = 1.33 \frac{4098 * E(T)}{(T + 273.3)^2} \quad (\text{hPa}/^{\circ}\text{C}), \quad (6.4.5.4.)$$

ahol: E – a telítettségi párányomás (hPa),
 T – hőmérséklet.

A szél hatása az evapotranszspiráció kiszámításában a szélességtől függő légköri diffúziós ellenállás (r_a) formájában jelenik meg:

$$r_a = \frac{[\ln(h-d)/h_0]^2}{0.144 * v}, \quad (\text{s/m}) \quad (6.4.5.7.)$$

ahol: h – a szélesség mérésének magassága,
 v – a szélesség (m/s).

A d és h_0 rétegek (ld. 6.3.1.4. alfejezet) magasságának meghatározása bonyolult, ezért ezeket leginkább becsülni szokás. Erdő esetében a

$$h_0 = 0.075H, \quad \text{míg} \quad (6.4.5.5.)$$

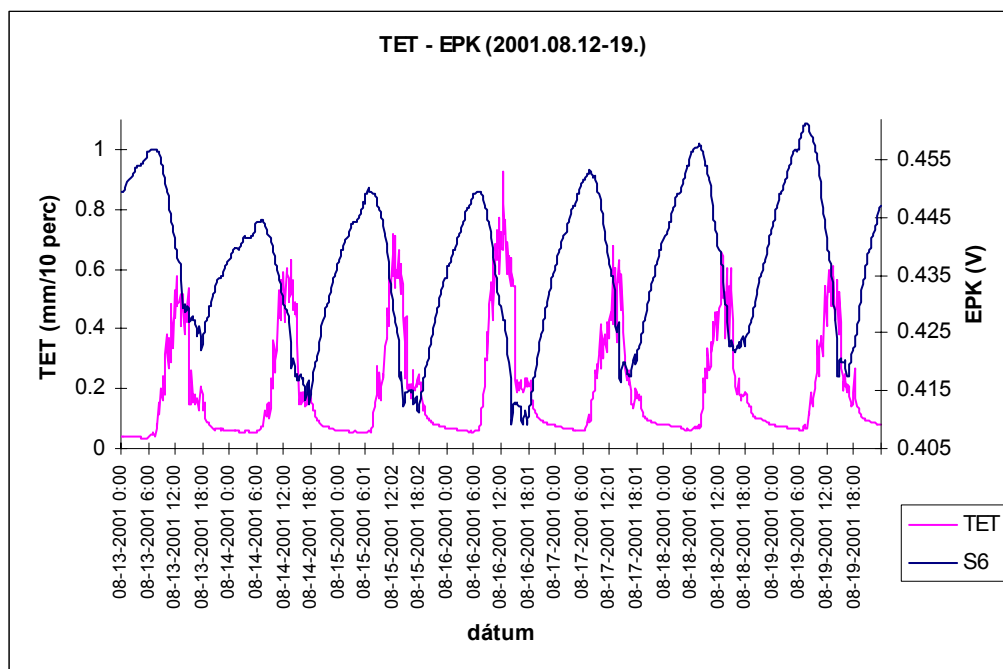
$$d = 0.78H, \quad (6.4.5.6.)$$

ahol a H az állománymagasság.

$$r_c = \frac{200}{\text{LAI}}, \quad (6.4.5.8.)$$

ahol: LAI – levélfelületi index (Leaf Area Index).

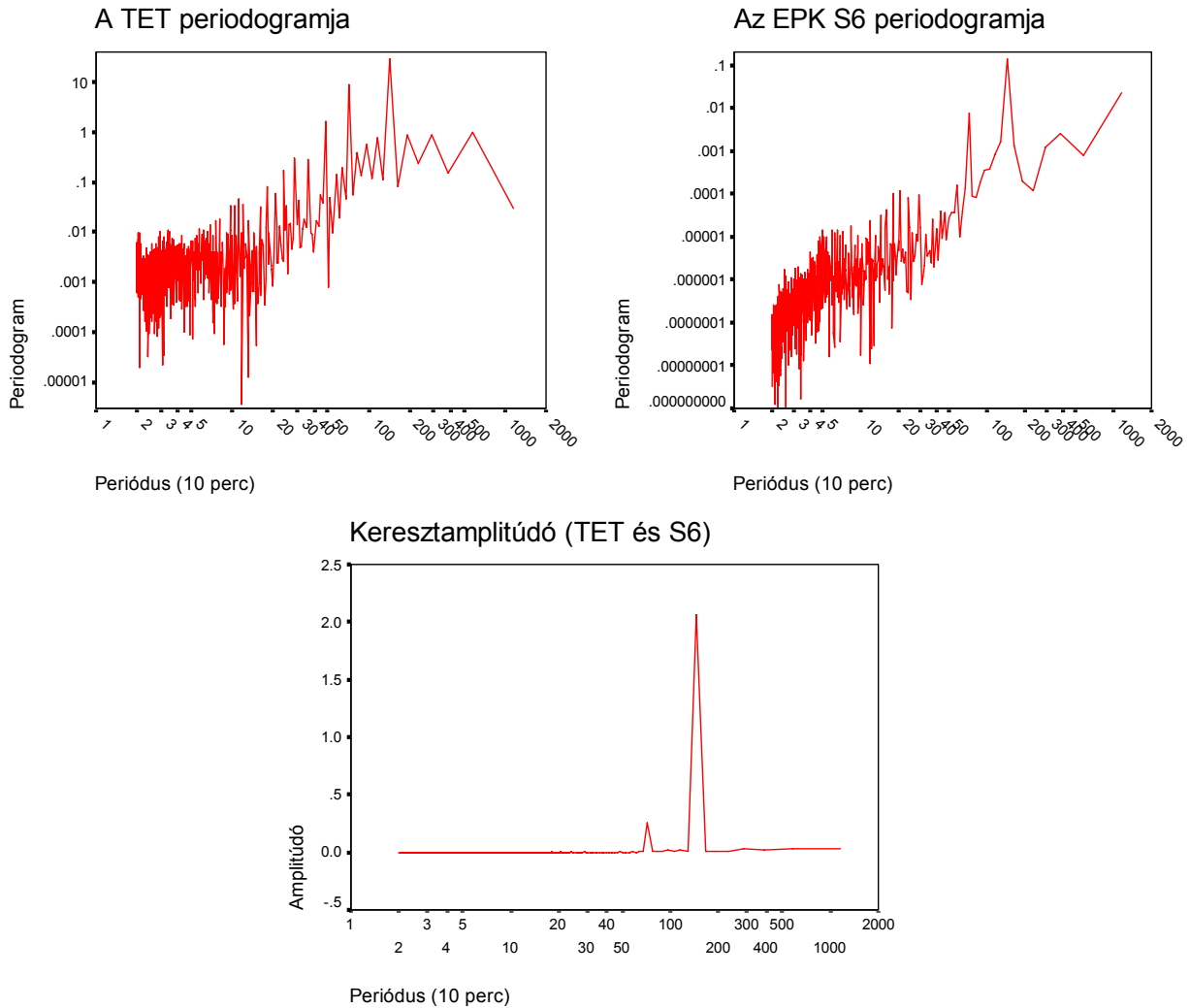
A kísérletem során a talaj hőforgalmát nem határoztam meg, hanem az R_0 -S értéket a nettó radiációval helyettesítettem, valamint a levélfelület indexet (LAI) is becsültem, így a számított értékek valamelyest eltérnek a tényleges evapotranszspirációtól, azonban a vizsgálat szempontjából a kapott TET megfelelő pontosságúnak mondható.



6.22. ábra. A 2001.08.12-19. közötti időszakhoz tartozó Penman-Monteith-féle (tényleges) evapotranszspiráció és az elektromos potenciálkülönbség (S6)

Ha összehasonlítjuk a számított evapotranszspirációs és az elektromos potenciálkülönbség görbéket (6.22. ábra), a két idősor közötti összefüggés nyilvánvalóvá válik. Megfigyelhető, hogy az elektromos potenciálkülönbség némi fáziskéséssel követi az evapotranszspiráció változásait, ugyanúgy, mint ahogy azt a fánedvaramlás-sebességgel kapcsolatban lehetett tapasztalni. A fáziskésést keresztkorrelációs elemzéssel állapítottam meg: a késés mértéke az egyes csatornákon a magasságtól és a kitéttiségtől függően 3 és 4 óra között változik.

A kétféle görbe spektrális tulajdonságait tekintve is hasonló képet mutat, amint az a kereszt-spektrális elemzés ábráin látható (6.23.a-c. ábra). Az 1 és fél napos változások a várakozásnak megfelelően mindkét görbén a leghangsúlyosabbak. Az evapotranszpiráció idősorában megjelenik még a 8 órás változás is, ami azonban az elektromos potenciálkülönbség adatsorból hiányzik ebben az időszakban, de ennek alapján mégis feltételezhetjük, hogy a más időszakokban tapasztalt harmadnapos változások környezeti eredetűek.



6.23.a-c. ábra. (a) A 2001.08.12-19. közötti időszakhoz tartozó evapotranszpiráció (TET) és (b) elektromos potenciálkülönbség (EPK S6) spektruma, valamint (c) a két adatsor kereszt-spektruma

7. Összefoglalás

A növényi életjelenségeket kísérő elektromos jelenségek egy része jól ismert és alaposan kutatott (pl. a növényi sejtek negatív bioelektromos – membrán – potenciálja), mások, mint például a makrotranszport folyamatok hatására keletkező elektromos potenciálok, különösen a fák esetében, kevésbé ismertek. Dolgozatomban ez utóbbiakról, a fatörzsön kialakuló természetes eredetű elektromos potenciálkülönbségek kialakulásáról, változásáról, valamint méréséről szerzett ismereteimet igyekeztem összefoglalni.

A fák életműködésére és a kialakuló elektromos potenciálkülönbségekre számos külső környezeti tényező hat. Ezeket a hatásokat sok esetben nem lehet egyértelműen különválasztani és mértéküket meghatározni, ami megnehezíti e komplex jelenség vizsgálatát.

A fa – elektromos potenciálkülönbség – környezet kapcsolatrendszer tisztázása, a változások jellegzetességeinek, szabályszerűségeinek meghatározása által a későbbiekben lehetőséget látunk például a fák diagnosztikai célú vizsgálatára a potenciálkülönbségek mérési módszerének segítségével.

A fák életjelenségei által keletkező elektromos tér vizsgálata más tudományterületek szempontjából sem elhanyagolható. Például bizonyos geofizikai méréseket (pl. tellurikus mérések) egy fa közelsége jelentősen befolyásolhatja, a mérési eredményeket meghamisíthatja.

7.1. Az eredmények összefoglalása

1997.05.17. és 2002.02.28. között elektromos potenciálkülönbségeket mértem egy cserfa törzsén a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban. Az alkalmazott mérőrendszerben feltétlen újítás (irodalmi előzménye nem létezik), hogy több szinten és különböző kitétségekben helyeztük el az elektródokat, valamint immár nem a fatörzsbe ültetett kötött elektródok között mértük az elektromos potenciálkülönbségeket (mint a Morat és munkatársai által használt és a saját korábbi kísérletnél alkalmazott kétcsatornás rendszer esetében), hanem egy közös földelektródhoz képest. Ez az elrendezés lehetővé teszi, hogy bármely két elektród közötti potenciálkülönbséget meg lehessen határozni.

A kutatási célkitűzéseknek megfelelően elsőként azt vizsgáltam meg matematikai-statisztikai eszközökkel, hogyan változnak a fatörzsön mért elektromos potenciálkülönbségek időben és térben. A mért elektromos potenciálkülönbségek idősor-analízise során a következő időbeli változásokat tapasztaltam.

Rövid és középperiódusú változások:

A legmarkánsabb középperiódusú változások a szabályos napi változások, melyek amplitúdója néhány 10 mV. Ezek nagy valószínűséggel a transzspiráció napi ritmusával függnek össze. A 24 órás változásokat 12 órás és esetenként 8 órás periódusok egészítik ki. A 12 órás változások amplitúdója a napi változásnak körülbelül harmada, míg a 8 órás változásé mintegy ötöde-tizede. Ezekre a rövidperiódusú változásokra az irodalomban nincs adat. A napi járás reggeli (6-7 óra) maximummal és délutáni (15-17 óra) minimummal jellemezhető. Bizonyos időszakokban a maximum és minimumhelyek pozíciója felcserélődik. Amennyiben ez a fázisátfordulás a zivatartevékenység hatására következik be, akkor az időtartama maximum 1-2 nap, és általában valamennyi csatornán kimutatható. Előfordul azonban több hetes fázisátfordulás is, amely csak egy-egy csatornán jelentkezik, egyelőre tisztázatlan okból.

Az I. és II. kísérleti szakasz 2 éves (1997. november – 1999. október) mérési adatsorából vett 32 minta átlagamplitúdóinak meghatározásával, az eddigi irodalmi adatokhoz képest sokkal részletesebb képet kaptam az 1 napos változás amplitúdójának évszakos járásáról. A

6m-es szint négy csatornáját külön-külön vizsgálva azt tapasztaltam, hogy a vegetációs időszakon kívül, a nyugalmi periódusban a csatornák nagyjából hasonló képet mutatnak: az átlagamplitúdók ebben az időszakban 5 mV alatt maradtak. A lombfakadás idején a napi változások amplitúdója megnő, az egyes csatornák akár 25-30 mV-os maximumot is elérhetnek (a maximumok értéke az adott év időjárási viszonyaitól is függ: 1999-ben a maximumok az 1998-as értékeknek mintegy felét érték csak el). A maximális transzspiráció idején, júniusban, július elején egy második maximum is megfigyelhető, mely az egyes csatornákon némi fáziskéséssel jelentkezik. A második csúcs amplitúdói általában nagyobbak a tavaszi csúcsnál. Esetenként egy augusztus végi, szeptemberi harmadik lokális maximum is megfigyelhető, mely kisebb, mint a tavaszi, nyári maximumok.

Hosszúperiódusú változások

Egy 8 hónapnyi összefüggő adatsor elemzése nem mutatott ki olyan, 24 óránál nagyobb periódusidejű változást, amely valamennyi csatornán egyformán jelentkezne, tehát a Burr (1944) által kimutatott, a Hold gravitációs hatásával összefüggő 27 napos periódus sem észlelhető az adatsorban.

A 4.10. ábrán bemutattam a 6m-es szint É-i csatornán mért elektromos potenciálkülönbség többéves változását. Az alapjel téli, kora tavaszi maximumokat és nyári, őszi eleji minimumokat mutatott. A szezonális ingadozás oka feltételezésem szerint a fa fajlagos ellenállás-változása. Az ismert, hogy a fajlagos ellenállást a hőmérséklet és a nedvességtartalom erősen befolyásolja. A téli alacsony hőmérséklet, valamint a fa kisebb víztartalma nagyobb fajlagos ellenállással párosul, s emiatt a téli időszakban nagyobb potenciálkülönbségek alakulnak ki. A vegetációs időszakokon belül ennek pont ellenkezője történik, azaz a magasabb hőmérséklet és nagyobb nedvesség miatt a földhöz képest csökkennek a potenciálkülönbségek. Felmerült, hogy a közös földelektród körüli talaj kiszáradás, vagy elfagyás, átmeneti ellenállás növekedést okozhat, ami a potenciálkülönbség növelése irányában hat, bár ennek hatását igyekeztünk minimalizálni azzal, hogy az elektródot a fagyhatár alá helyeztük el.

Megvizsgáltam a mérés során jelentkező tranziens változásokat is, és megállapítottam, hogy az adatsorban lévő gyors, nagy intenzitású (a napi járás amplitúdójának többszörösét is elérhetik) változások a környezeti zavarokhoz, legfőképp a zivatartevékenységhez köthetők.

A csatornák összehasonlítása, az elektródpozícióhoz kötött különbségek

A kísérlet megkezdése előtt abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a törzs egy-egy választott keresztmetszetén megközelítőleg azonos mennyiségű folyadék áramlik keresztül. A folyadék áramlási útvonala és áramlássűrűsége a szíjácsban azonban már változhat a törzs különböző pontjaiban. Ezért alakítottuk ki úgy a mérőrendszert, hogy több szinten és különböző kitétségekben ültessük be az elektródokat. Így lehetővé vált az, hogy az elektromos potenciálkülönbségek változásait az egyes szinteken belül és a szintek között is figyelemmel kísérjem.

Már az első adatok szemrevételezésénél kiderült, hogy az egyes csatornák adatai némileg eltérnek egymástól. Ez alapján nem is az volt a kérdés, hogy különböznek-e, hanem ezek az eltérések miben nyilvánulnak meg, van-e valamiféle szabályszerűség bennük? Korreláció és cluster-analízist végeztem el négy többhónapos mintán abból a célból, hogy összehasonlítsam a 16 csatornát. Szabályszerűségeket ezen elemzések alapján is nehéz meghatározni, ugyanis a csatornák bizonyos időszakokban nagyon hasonlóan viselkednek, más időszakokban jelentősen eltérhetnek. Általánosságban azért elmondható, hogy az egyes szinteken belül általában jó a korreláció.

A csatornák közötti eltérések legvalószínűbb oka a szerkezeti inhomogenitás. Nagyon vékony – gyakorlatilag pár sejtsor vastag - az aktív vízszállító xylem rész, mely érzékeny az embolizációra, kavitációra. Ismeretes, hogy a szállítás nagyon bonyolult 3 dimenziós hálózatban történik a legkisebb hidraulikus ellenállás irányában. Ebben a rendszerben a hidraulikus ellenállást számos tényező befolyásolhatja, mint pl. a hőmérséklet, a szállított nedv iontartalma, mechanikai sérülés, stb.

Abból a célból, hogy a szintek és a kitétség szerinti eltéréseket jobban megragadjam, a szélsőértékek pozíciójának összehasonlító elemzését is elvégeztem. A vizsgálat megmutatta, hogy szignifikánsan a keleti oldalak csatornái veszik fel a leghamarabb mind a maximum, mind a minimum értékeket, valamint, hogy a nyugati oldal csatornáin jelentkeznek legkésőbb a minimum értékek. A déli és az északi oldal csatornái között nem lehetett jelentős különbséget kimutatni.

A 6.2. fejezetben említettem, hogy a Dambrine és munkatársai (1992) vizsgálata szerint a xylemnedv iontartalma a magasság szerint is változik. Ennek megfelelően azt vártam, hogy az elektromos potenciálkülönbségek meghatározott szabályszerűséget mutatnak a szintekhez köthetően. Bár a különböző időpontokban valóban jelentős eltérések is lehetnek (főleg a maximumértékek esetében), több időszak mintáit összevetve azonban úgy tűnik, a szintek alapvetően hasonlóan viselkednek (az egyetlen kimutatható szignifikáns eltérés az, hogy a 6m-es szint csatornái veszik fel a többi szinthez képest legkésőbb a minimumértéket).

Az elektromos potenciálkülönbségek változásának, és ezek jellegzetességeinek meghatározása utáni következő feladatomban azoknak a belső folyamatoknak, jelenségeknek meghatározása volt, amelyek okai lehetnek a potenciálkülönbségek kialakulásának és változásainak. A témával foglalkozó korábbi publikációkban megfogalmazott feltételezések szerint a legfontosabb ilyen élettani folyamat a fák transzspirációhoz kötött folyadékszállítása, amelyről egy rövid áttekintést nyújtottam, kiegészítve a jelenleg használatos termometriás mérési eljárásokkal.

1999 júliusa és decembere között az elektromos potenciálkülönbség méréssel párhuzamosan Granier-féle nedváramlás-sebességmérést végeztem. A kapott termometriás adatokat hasonló statisztikai módszerrel dolgoztam fel, mint az elektromos potenciálkülönbségeket. A nedváramlási adatok elemzésével kapcsolatban új eredmények tartom, hogy kísérleti alapon sikerült bizonyítani az elektromos potenciálkülönbségek és a nedváramlás kapcsolatát. Ilyen jellegű összehasonlító vizsgálatokra, vagyis a két paraméter egyidejű mérésére és összehasonlítására az irodalomban nincs példa. A nedváramlás adatok esetén az elektromos potenciálkülönbségek feldolgozásához hasonlóan részletes idősor-elemzést szintén elsőként alkalmaztam.

A nedváramlás adatsor elemzése

Az idősor-elemzés alapján elmondható, hogy a nedváramlás adatsort hasonló periodicitás jellemzi, mint az elektromos potenciálkülönbségeket, azaz kimutatható 24 órás, 12 órás és 8 órás periódusok (ezeket az eredményeket az elektromos potenciálkülönbségekkel együtt elvégzett keresztspektrális elemzés is megerősíti). A 24 órás változásnak hajnali 6-7 óra körül van a minimuma, maximuma pedig a déli órákra tehető. A napi változás amplitúdójának az időjárástól függő kimutatható szezonális járása van, amely az adott időszakban hasonlóképp alakult, mint elektromos potenciálkülönbség napi járásának évszakos változása. A hosszúperiódusú változások vizsgálata nem mutatott ki az 1 napos járásnál nagyobb periódusidejű szabályos változást.

A továbbiakban korrelációanalízisnek vettem alá a nedváramlás és elektromos potenciálkülönbség adatsorokat, hogy a közöttük kimutatható kapcsolat szorosságát elemezzem. Az elemzéssel egyfelől szoros kapcsolatot sikerült kimutatnom a nedváramlás és

az elektromos potenciálkülönbségek között, másfelől viszont határozott fáziseltolódást is tapasztaltam a kétféle adatsor között. Az elektromos potenciálkülönbségek akár több óras késéssel is követhetik a nedváramlás adatsor változásait. A fáziseltolódás legvalószínűbb oka a xylemnedv iontartalmának (ezen keresztül a vezetőképességének) változásában keresendő. Ez a jelenség ugyanis nem befolyásolja a termometriás nedváram-mérést, de az elektromos potenciálkülönbségre feltétlen hatással van. Ezt a feltételezést a 6.1. fejezetben ismertetett közvetett bizonyítékkal alá is lehet támasztani. Két szint közötti potenciálkülönbség abszolút értékének és a nedváramlás sebességének hányadosa állandó lenne, amennyiben a vezetőképesség változatlan és csak áramlási potenciálról van szó (Gindl és Löppert [1998] vizsgálatai szerint). Ezzel szemben a 4m-es és 2m-es szintek közötti potenciálkülönbségek és az áramlási sebességek hányadosgörbéje határozott napi periodicitást mutat, ami arra utal, hogy a nedv vezetőképességének is napi változása van (hajnalban a leghígabb az erős elektrolitnak tekinthető xylemnedv, s a transzspirációval nő a vezetőképesség).

Mivel jelenleg nem ismert olyan egyszerű, megbízható módszer, amellyel a fák esetében a xylem-nedv elemtartalmát monitorozni lehetne, az elektromos potenciálkülönbségek elektrokémiai alapon (áramlási potenciál, valamint az ionkoncentrációtól függő elektród- és koncentrációs potenciálok) történő megközelítése egyelőre korlátokba ütközik. Megmaradt viszont annak a lehetősége, hogy az elektromos potenciálkülönbségeket közvetlenül, illetve a nedváramláson keresztül közvetve befolyásoló környezeti tényezők hatását többváltozós adatelemzés segítségével meghatározzam.

Az elektromos potenciálkülönbség adatok és a környezeti paraméterek közötti kapcsolatrendszer feltárása

A kutatás megkezdésekor felállított előzetes modell alapján kiválasztott környezeti tényezők és az elektromos potenciálkülönbség közötti kapcsolatrendszert faktor- és regresszió-analízissel vizsgáltam.

A faktoranalízis során kapott azon faktorok, melyek az elektromos potenciálkülönbségekkel összefüggtek, alapvetően hasonló összetételűek. Ezeket a faktorokat az elektromos potenciálkülönbség és nedváramlás mellett, a hőmérséklet, a relatív páratartalom, a radiáció és a légköri elektromos potenciálgradiens határozza meg, de kisebb-nagyobb faktoregyütthatóval jelentkezik a geomágneses tér totálvektora és a K-Ny-i tellurikus adatsor is.

A regressziós modellek annyiban árnyalták tovább ezt a képet, hogy azt is megmutatták, melyik tényező milyen mértékben járul hozzá az elektromos potenciálkülönbségekhez. Ezzel kapcsolatban fontos kiemelni, hogy a regressziószámítás eredményét nem lehet automatikusan ok-okozati összefüggésként értelmezni. A vizsgálat eredményei csak a változók közötti statisztikai kapcsolat meglétét, intenzitását és együttmozgását fejezi ki.

A faktor- és regresszió-analízis alapján elmondható, hogy az elektromos potenciálkülönbségnek a környezeti paraméterek közül a hőmérséklettel, a relatív páratartalommal, a légköri elektromos potenciálgradienssel és a telluráramokkal van szorosabb kapcsolata. A transzspirációt befolyásoló első kettő nagyobb regressziós együtthatóval szerepel a modellekben, mint az utóbbiak, melyek valószínűleg leginkább zajként befolyásolják az elektromos potenciálkülönbséget.

Az eredmények értékelését jelentősen megnehezíti az a tény, hogy sok tényező (külső és belső) hatása szimultán és ekvivalens módon jelentkezik (lásd radiáció és geomágneses tér totálvektora, amelyeknek a magas multikollinearitás miatt alacsony a regressziós együtthatójuk, illetve be sem kerültek a modellbe).

Ezek az elemzések további információt nyújtottak a geokörnyezetnek a növényekre gyakorolt hatásairól, bár számos kérdés maradt megválaszolatlanul, ami további vizsgálati

irányokat jelölhet ki. Ilyen kérdés például a gravitáció és fa kapcsolata. Az elemzések alapján az elektromos potenciálkülönbségekben a gravitációs tér hatását nem lehetett kimutatni, tehát úgy tűnik a gravitációs tér nem vezérli a fát, ami ellentmond Zürher és Cantiani, valamint Burr megállapításának. Ám ez nem jelenti azt, hogy a fának nincs mikrogravitációs hatása, ugyanis Rebscher és munkatársai (1995) dőlésmérőkkel vizsgálták egyes fák környezetét, és szabályos 24 órás periódust mutattak ki a fák vízfelvételével összefüggésben.

7.2. A kutatási eredmények hasznosítása

Az elemzések során kapott eredmények új részletekkel gazdagítják a cser transzspirációjával, nedvzárlásával kapcsolatos eddigi ismereteket. Közvetett információt nyertem olyan – jelenleg kevésbé ismert – jelenségekről, mint a xylem-nedv vezetőképességének változása. Ezeken az elméleti jelentőségű eredményeken túlmenően, az elektromos potenciálkülönbségek mérési módszerét a meghatározott empirikus összefüggések segítségével immár a nedvzárlás meghatározására is fel lehet a jövőben használni. Ezzel kapcsolatban azonban figyelembe kell venni, hogy a termometriás mérési módszerekhez képest az elektromos potenciálkülönbségek mérése (jelenlegi formájában) sokkal érzékenyebb a környezeti hatásokra, zajokra. Így leginkább elektromosan zajmentesnek tekinthető környezetben, valamint csapadékmentes időjárási körülmények között alkalmazható.

7.3. További kutatási irányok

Az elektromos potenciálkülönbségek kialakulásával kapcsolatos legfontosabb probléma az, hogy megoldást kell találni a xylem-nedv elemtartalmának monitorozására. Ezzel gyakorlatilag lehetővé válna a 6.1. fejezetben leírt elektrokémiai jelenségek meghatározása, ami egy pontosabb modell felállítását tenné lehetővé. A xylem elemekben áramló nedv fizikájának további vizsgálata és jobb megértése (pl. elektro-ozmózis hatása) is igen lényeges abból a célból, hogy az elektrokinetikus potenciálok mérését eszközként fel lehessen használni a növényi nedvzárlás tapasztalati úton való becsléséhez.

A szerkezet hatásának megragadása érdekében az elektromos potenciálkülönbség méréseket valamilyen tomográfias módszerrel lehetne kiegészíteni. A legcélszerűbb eljárás a Ridder és munkatársai által alkalmazott mobil computer tomográfia lenne (Raschi et al., 1995.), amellyel a mérési szintek mindegyikét vizsgálni lehetne, időről-időre visszatérően. A computer tomográfia helyett alternatív, de annál pontatlanabb megoldást jelentene egy impedancia tomográf kifejlesztése, amelynek segítségével információkat lehetne nyerni a törzs elektromos ellenállásviszonyairól, ezáltal a nedvességeloszlásról. Ebben a tématerületben már végeztünk előzetes kísérleteket is, s a kezdeti eredmények biztatók voltak (Koppán et al., 2000).

Az elektromos potenciálkülönbség méréseket más fafajokra is ki kellene terjeszteni, párhuzamos mérések formájában. Ily módon a nedvzárlást becsülő tapasztalati összefüggések paramétereit ezekre a fafajokra is meg lehetne határozni.

A jövőre nézve fontos szempont a mérőrendszer továbbfejlesztése. Az elektródok védelmét valamilyen szigetelőanyaggal (pl. teflon, vagy műanyag) meg kell oldani, hogy a környezet zajhatását mérsékelni lehessen. Érdemes lenne kipróbálni azt is, hogy milyen hatással járna, ha az elektródok fölé árnyékolást és csapadéktól, a kergén leszivargó víztől védő lemezt szerelnénk fel.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt témavezetőmnek, Szarka Lászlónak és konzulensemnek, Wesztergom Viktornak szeretném kifejezni köszönetemet az általuk nyújtott szakmai vezetésért, mindenkori segítségükért, az inspiratív konzultációk során nyújtott tanácsaikért és türelmükért.

Köszönöm Fenyvesi Andrásnak, a MTA Atommagkutató Intézet munkatársának, hogy rendelkezésemre bocsátotta a nedváramlásmérő készülékét, valamint külön megköszönöm dolgozatom gondos áttekintését, hasznos tanácsait, észrevételeit és ötleteit.

Köszönetet mondok Pierre Morat-nak és Jean-Louis Le Mouélnek, az Institute de Physique du Globe de Paris munkatársainak, valamint André Granier-nek, az Institut National de la Recherche Agronomique munkatársának, hogy a kutatásaim során – kétoldalú együttműködés keretében – értékes tanácsokkal láttak el.

Köszönöm Pongrácz Jánosnak, Pálla Gyulának és Túri Jánosnak a mérőrendszer elkészítésében és telepítésében nyújtott segítségüket.

Megköszönöm a MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet munkatársainak (Ádám Antalnak, Verő Józsefnek, Bencze Pálnak – a Soproni Egyetem Földtudományi Tanszék első tanszékvezetőjének –, és a többieknek) a bátorító és barátságos légkört, valamint a megtisztelő figyelmet, amellyel munkámat kísérték.

Köszönöm Vig Péternek, a Nyugat-Magyarországi Egyetem Termőhelyismerettani Intézeti Tanszék adjunktusának, hogy rendelkezésemre bocsátotta a kézi talajnedvesség-mérő készülékét.

Köszönöm Winkler Dániel barátom önzetlen segítségét.

Megköszönöm Kis Mártának, hogy a dolgozat áttekintése során hasznos tanácsokkal látott el és biztatott.

Köszönetemet fejezem ki az OTKA Tudományos Iskolának (TS040848), a TÉT Alapítványnak (TÉT 2000/4) a kutatásom során nyújtott anyagi támogatásért.

Végül, de nem utolsósorban, köszönetet mondok Édesanyámnak, Édesapámnak és nővéremnek a szerető támogatásukért.

Felhasznált irodalom

- Andersen, P.C. – Brodbeck, B.V. – Mizell, R.F. (1993): Diurnal variations of amino acids and organic acids in xylem fluids from *Lagerstroemia indica*: an endogenous circadian rhythm. *Physiol. Plant.* 89: 783-790.
- Arens, K. (1949): The "Active Membrane", an hypothesis to explain the transfer of water and solutes in plants, as depending upon respiration. *Rev. Can. Biol.* 8: 157-172.
- Balling, A. – Zimmermann, U. (1990): Comparative measurements of the xylem-pressure of *Nicotiana* plants by means of the pressure bomb and pressure probe. *Planta*, 182: 325-338.
- Beebe, D.J. – Moore, J.S. – Bauer, J.M. – Yu, Q. – Liu, R.H. – Devadoss, C. – Jo, B.H. (2000): Functional hydrogel structures for autonomous flow control inside microfluidic channels. *Nature* 404 (6778): 588-590.
- Bencze P. – Koppán A. – Kovács K. – Márcz F. – Prodán T. – Satori G. – Wallner Á. – Wesztergom V. (2003): Geophysical Observatory Reports of GGRI of HAS. Year 1999-2001. Nagycenk Geophysical Observatory. 2003, Sopron.
- Bencze P. – Márcz F. (1963): A csúcskiszülési áramok vizsgálatáról. *MTA Műszaki tudományok Osztálya Közleményei*, 32: 137-144.
- Bencze P. – Márcz F. (1981): The Geophysical Observatory near Nagycenk. II. Atmospheric electric and ionospheric measurements. *Acta Geod., Geoph. Mont. Hung.* 16(-4): 353-357.
- Béres Cs. – Fenyvesi A. – Raschi, A. – Ridder, H.-W.(1998): Field experiment on water transport of oak trees measured by computer tomograph and magnetic resonance imaging. *Chemosphere*, 36(4-5): 925-930.
- Bloom, A.J. – Caldwell, M.M. (1988): Root excision decreases nutrient absorption and gas fluxes. *Plant Physiol.* 87: 794-796.
- Bose, J. C. (1907): *Comparative Elektro-Physiology*. Longmans, Green and Co. New York, Bombay and Calcutta.
- Budó Á. (1971): *Kísérleti fizika II.* Tankönyvkiadó, Budapest.
- Burr, H. S. (1956): Effect of a Severe Storm on Electric Properties of a Tree and the Earth. *Science*, 124: 1204-1205.
- Burr, H.S. (1944): Moon-madness. *Yale J. Biol. and Med.* 16: 249-256.
- Burr, H.S. (1944b): The meaning of bio-electric potentials. *Yale J. Biol. and Med.* 16: 353-360.
- Burr, H.S. (1945): Diurnal potentials in the maple tree. *Yale J. Biol. and Med.* 17: 727-734.
- Burr, H.S. (1947): Tree potentials. *Yale J. Biol. and Med.* 19(3): 311-318.
- Burr, H.S. (1947b): Field theory in biology. *Sci. Monthly*, 64(3): 217-225.
- Cermák, J. – Úhela, J. – Kucera, J. – Penka, M. (1982): Sap Flow Rate and Transpiration Dynamics in the Full-grown Oak (*Quercus robur* L.) in Floodplain Forest Exposed to Seasonal Floods as Related to Potential Evapotranspiration and Tree Dimensions. *Biologia Plantarum (Praha)* 24(6): 446-460.
- Csanády E. (1969): Fák elektromos potenciáljai. *EFE kiadványai* 2.
- Cseh E. – Zsoldos F. (1990): A növények vízforgalma és ásványi táplálkozása. *JATE Kiadó*, Szeged.
- Dambrine, E. – Carisey, N. – Pollier, B. – Girard, S. – Granier, A. – Lu, P. – Biron, P. (1992): Dynamique des éléments minéraux dans la sève xylémique d'épicéas de 30 ans. *Ann. Sci. For.* 49: 489-510.
- Else, M.A. – Hall, K.C. – Arnold, G.M. – Davies, W.J. - Jackson M.B. (1995): Export of abscisic-acid, 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, phosphate, and nitrate from roots to shoots of flooded tomato plants - accounting for effects of xylem sap flow-rate on concentration and delivery. *Plant Physiol.* 107: 377-384.
- Eschrich, W. – Fromm, J. (1993): Electric signals released from roots of willow (*Salix viminalis* L.) change transpiration and photosynthesis. *J. of Plant Physiology* 14: 673-680.
- Fensom, D.S. (1957): The bioelectric potentials of plant and their functional significance. I. An electrokinetic theory of transport. *Canad. J. Botany* 35: 573-582.
- Fensom, D.S. (1958): The bioelectric potentials of plant and their functional significance. II. The patterns of bioelectric potential and exudation rate in excised sunflower roots and stems. *Canad. J. Bot.* 36(3): 367-383.

- Fensom, D.S. (1959): The bioelectric potentials of plants and their functional significance. III. The production of continuous potentials across membranes in plant tissue by circulation of the hydrogen ion. *Canad. J. Bot.* 37(5): 1003-1026.
- Fensom, D.S. (1961): The Bioelectric Potentials of Plants and their Functional Significance. IV. Changes in the rate of water absorption in excised stems of *Acer saccharum* induced by applied electromotive forces: the „flushing” effect. *Canad. J. Bot.*, 40: 405-413.
- Fensom, D.S. (1963): The Bioelectric Potentials of Plants and their Functional Significance. V. Some Daily and Seasonal Changes in the Electrical Potential and Resistance of Living Trees. *Canadian Journal of Botany*, 41: 831-851.
- Fenyvesi A. – Béres Cs. – Raschi, A. – Tognetti, R. – Ridder, H.-W. – Molnár T. – Röfler J. – Lakatos T. – Csiha I. (1998): Sap-flow velocities and distribution of wet-wood in trunks of healthy and unhealthy *Quercus robur*, *Quercus petraea* and *Quercus cerris* oak trees in Hungary. *Chemosphere*, 36(4-5): 931-936.
- Feynman, R.P. – Leighton, R.B. – Sands, M. (1969): *Mai Fizika 5. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.*
- Frachisse-Stoilkovic, J.M. – Julien, J.L. (1993): The coupling between extra- and intracellular electric potentials in *Bidens pilosa* L. *Plant Cell Environ.* 16: 633-641.
- Fromm, J. – Spanswick, R. (1993): Characteristics of actions potentials in willow (*Salix viminalis* L.). *J. Exp. Bot.* 44: 1119-1125.
- Giardina, G. – Salleo, A. – Salleo, S. – Wanderlingh, F. (1976): Generazione di potenziali elettrici durante scorrimento di fluidi nello xilema. *Giorn. Bot. Ital.* 110: 137-144.
- Gindl, W. – Löppert, H.G. (1998): High precision measurement of growth and electro-chemical signals in the cambium and xylem of spruce. Poster. Eurosilva workshop on Treegrowth at high altitude and high latitude, Oberegurgl, Austria, September 10-14 1998.
- Giordano, R. – Salleo, A. – Salleo, S. – Wanderlingh, F. (1978): Flow in xylem vessels and Poiseuille's law. *Can. J. Bot.*, 56: 333-338.
- Goldstein, A.H. – Gensler, W. (1981): A physiological basis for electrophytograms. I. Theoretical considerations. *J. Electroanalytical Chemistry*, 128(6): 645-659.
- Granier, A. (1985): Une nouvelle methode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42: 193-200.
- Granier, A. – Anfodillo, T. – Sabatti, M. – Cochard, H. – Dreyer, E. – Tomasi, M. – Valentini, R. – Bréda, N. (1994): Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 14: 1383-1396.
- Green, S.R. – Clothier, B.E. (1988): Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 39: 115-123.
- Gribovszki Z. (2003): Evapotranszpiráció hatása a lefolyás napi ritmusára erdészeti kisvízgyűjtőkön. Erdő és Klíma konferencia, 2003. június 4-6.
- Haake, O. (1892): Über die Ursachen electrischer Ströme in Pflanzen. *Flora*, 75: 455-487.
- Hatton, T.J. – Catchpole, E.A. – Vertessy, R.A. (1990): Integration of sapflow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology*, 6: 201-209.
- Heyl (1933): Der Einfluss von Aussenfaktoren auf das Bluten der Pflanzen. *Planta*, 20: 294-353.
- Horvai Gy. szerk. (2001): Sokváltozós adatelemzés (kemometria). Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Hunyadi L. – Mundruczó Gy. – Vita L. (1996): Statisztika. Aula Kiadó, Budapest.
- Hursán L. (1984): Geofizikai adatfeldolgozás I. Az adatfeldolgozás matematikai alapjai. Kézirat. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Kerékgyártó Gy.né – Mundruczó Gy. (1990): Statisztikai módszerek a gazdasági elemzésben. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Kiss L. (1983): Az elektrokémia alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Koppán A. (1996): Elektromos potenciálkülönbség időbeli változásának vizsgálata bükkfában. Diplomamunka. Soproni Egyetem. Sopron.
- Koppán A. – Fenyvesi A. – Szarka L. – Wetztergom V. (2002): Measurement of electric potential difference on trees. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4): 37-38.
- Koppán A. – Kis M. – Szalai S. – Szarka L. – Wetztergom V. (2000): Analogue modelling experiments for determination of humidity distribution within the trunk of standing trees by using a geophysical technique. XXXth Annual Meeting of ESNA. Proceedings, November 2000. Austrian Research Center Seibersdorf, 180-186.

- Koppán A. – Szarka L. – Wesztergom V. (1999): Temporal variation of electric signal recorded in a standing tree. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 34(1-2): 169-180.
- Koppán A. – Szarka L. – Wesztergom V. (2000b): Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electric signals measured in the trunk of a standing tree. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie/ Life Sciences*, 323: 559-563.
- Koppán A. – Szarka L. – Wesztergom V. (2000c): Élő fa életfolyamatainak tükröződése a törzsön mért elektromos potenciálkülönbségekben. *Soproni Egyetem Tudományos Közleményei*, 46: 17-23.
- Kunkel A. (1878): Über elektromotorische Wirkungen an unverletzten lebenden. *Pfalztheilen. Arb. bot. Ins. Würzburg*, B, II, 1.
- Kunkel A. (1879): Über einige Eigenthümlichkeiten des elektrischen Leitung-vermögens lebender Pflanzentheiles, *Arb. bot. Inst. Würzburg*, p. 333.
- Láng F. (szerk.) (1998): *Növényélettan. A növényi anyagcsere.* ELTE Eötvös Kiadó, Budapest.
- Leach, C.M. (1987): Diurnal electrical potentials of plant leaves under natural conditions. *Environmental and Experimental Botany* 27(4): 419-430.
- Lewakowski, N. (1886): *Notizen der Petersburger Akademia.*
- Lewis, G. N. – G.A. Linhart (1919): The degree of ionization of very dilute electrolytes, *J. Am. Chem. Soc.*, 41: 1951-1960.
- Lund, E.J. (1928): Relation between continuous bio-electric currents and cell respiration II. 1. A theory of continuous bio-electric currents and electric polarity of cells. 2. Theory of cell correlation. *J. Exptl. Zool.* 51(3): 265-290.
- Lund, E.J. (1929): Electric polarity in the Douglas fir. *Publs. Puget Sound Biol. Sta. Univ. Wash.* 7(1): 1-26.
- Lund, E.J. (1930): Internal distribution of the correlation potentials in the Douglas fir. *Publs. Puget Sound Biol. Sta. Univ. Wash.* 7: 259-286.
- Lund, E.J. (1931a): The unequal effect of O₂ concentration on the velocity of oxidation in loci of different electric potential, and glutathione content. *Protoplasma*, 13: 236-258.
- Lund, E.J. (1931b): External polarity potentials in the apex of the Douglas fir before and after mechanical stimulation. *Plant Physiol.* 6: 507-517.
- Lund, E.J. (1931c): Electric correlation between living cells in cortex and wood in the Douglas fir. *Plant Physiol.* 6: 631-652.
- Lund, E.J. (1932): Comparison of the effects of temperature on the radial and longitudinal electric polarities in wood and cortex of the Douglas fir. *Plant Physiol.* 7: 505-516).
- Lundegardh, H. (1944): Bleeding sap movement. *Arkiv. Bot.* 31A(2): 1-56.
- Marinesco, N. (1931): Sur la force électromotrice de filtration provoquée par l'ascension de sere dans le plantes. *Comptes Rendus Acad. Sci.* 193(1): 89-91.
- Marsh, G. (1935): Kinetics of an intracellular system for respiration and bioelectric potential at flux equilibrium. *Plant Physiol.* 10: 681-697.
- Marsh, G. (1937): Proof of the flux equilibrium relation. *Plant Physiol.* 12: 861-867.
- Marshall, D.C. (1958): Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.* 33: 385-396.
- Matteucig, G.-Toriyama, H. (1992): Anomalous bioelectric potentials of silk trees in Naples zoo (Italy) prior to an earthquake in May 1991. *ESA Environment Observation and Climate Modelling Through International Space Projects*, 2: 937-938.
- Meskó A. (1972): *A digitális szeizmikus feldolgozás alapjai.* Kézirat. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Meskó A. (1984): *Digital Filtering: Applications in Geophysical Exploration for Oil.* Akadémiai kiadó, Budapest.
- Mócsi M. (1837): Villamosság az életműves lényekben. *Tudománytár*, 1: 312-332.
- Morat, P. – Le Mouël, J-L. – Granier, A. (1994): Electrical potential on tree. A measurement of the sap flow? *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie/ Life sciences* 317: 98-101.
- Neihof, R.-Sollner, K. (1956): The physical chemistry of the differential rates of permeation of ions across porous membranes. *Discussions Faraday Soc. Membrane phenomena No.21.*
- Passioura, J.B. – Tanner, C.B. (1985): Oscillations in apparent hydraulic conductance of cotton plants. *Aust. J. Plant. Physiol.* 12: 455-461.

- Penman, H.L. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proc.Roy.Soc.London, A193: 120-146.
- Raschi, A. – Tognetti, R. – Ridder, H.-W. – Béres Cs. (1995): Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission. Plant, Cell Environ., 18: 545-554.
- Rebscher, D. – Kümpel, H.-J. – Neugebauer, H. J. (1995): Ground Movement Due to Biological Cause. TERRA abstracts, Strasbourg, 7: 192.
- Sakamoto M. – Sumiya, K. – Yamada, T. (1984): The bioelectrical potentials of young woody plants. Wood Research No. 70., p. 42-46.
- Schurr, U. – Schulze, E.D. (1995): The concentration of xylem sap constituents in rott exudate, and in sap from intact, transpiring castor bean plants (*Ricinus communis* L.). Plant Cell Environ., 18:409-420.
- Schurr, U. (1998): Xylem sap sampling – new approaches to an old topic. Trend sin Plant Science, 3(8): 293-298.
- Scott, B. I. H. (1955): Correlation between the electric current generated by a bean root grown in water and the rate of elongation of the root. Australian J. Biol. Sci. 8: 34-46.
- Shabala, S.N. – Shevchenko, V.A. – Maslobrod, S.N. – Tretyakov, N.N. (1991): Endogenous oscillation and resonance effects under condition of rhythmical changes in root medium parameters. Izv. Timiryazevskoi Selskokhozyaistvennoi Akad. 6: 87-97.
- Smith, D.M. – Allen, S.J. (1996): Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, 47: 1833-1844.
- Spanner, D. C. (1952): The suction potentials of plant cells and some related topics. Ann. Botany N.S. XVI. 63: 379-407.
- Stamm, A.J. (1926): Electroendosmose through wood membranes. Coll. Sysmp. Monograph, 4: 246-257.
- Stern, K. (1924): Elektrophysiologie der Pflanzen. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Sváb J. (1979): Többváltozós módszerek a biometriában. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Swanson, R.H. – Whitfield, D.W.A. (1981): A numerical-analysis of heat pulse velocity theory and practice. Journal of Experimental Botany, 32: 221-239.
- Szalai I. (1994): A növények élete. Az életjelenségek analízise a molekuláris szinttől az ökológiai szintig. I-II. JATEPress, Szeged.
- Szász G. – Tőkei L. (szerk.) (1997): Meteorológia mezőgazdáknek, kertészeknek, erdészeknek. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Szász G. (1977): Agrometeorológia. Jegyzet. Debreceni Agrártudományi Egyetem, Debrecen.
- Székelyi M. – Barna I. (2003): Túlélőkészlet az SPSS-hez. Többváltozós elemzési technikákról társadalomkutatók számára. Typotex Kiadó, Budapest.
- Tognetti, R. – Raschi, A. – Béres, Cs. – Fenyvesi, A. – Ridder, H.-W. (1996): Comparison of sap flow, cavitation and water status of *Quercus petraea* and *Quercus cerris* trees with special reference to computer tomography. Plant, Cell and Environment, 19: 928-938.
- Tyree, M.T. – Sperry, J.S. (1989): Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. Annu. Rev. Plant Phys. 40: 19-38.
- Uchida, T. – Nakanishi, Y. – Sakano, T. (1991): Measurement of bioelectric potential on the surface of spinach lamina. Publ. in the IFAC Workshop Series (Intern. Feder. of Automatic Control) No. 1. ed.:Hashimoto, Y.-Day, W., Pergamon Press, Oxford.
- Van Ieperen, W. – van Meeteren, U. – van Gelder, H. (2000): Fluid ionic composition influences hydraulic conductance of xylem conduits. J. Exp. Bot. 51 (345): 769-776.
- Verő J. (1972): On the determination of the magnetotelluric impedance tensor. Acta Geod., Geoph. Mont. Hung. 7(3-4): 333-351.
- Verő J. – Szendrői J. – Sători G. – Zieger B. (2000): On spektral methods in Schumann resonance data processing. Acta Geod. Geoph. Hung. 35(2): 105-132.
- Verő J. (2001): Earth current measurements in Bencze P. – Márcz F. – Sători G. – Verő J. – Wesztergom V. (2001): Geophysical Observatory Reports of GGRI of HAS. Year 1994-1998. Nagycenk Geophysical Observatory. 2001, Sopron.
- Vervelde, G. J. (1948): Electrochemical behaviour of ion exchanging substances. Potential measurements on plant roots. Proc. Koninkl. Ned. Akad. Vetenschap. 11: 3.

- Vig P. (2002): A klimatikus változások hatásai egy középkorú bükkös vízháztartására. Doktori értekezés, Debreceni Egyetem, Debrecen.
- Wesztergom V. (2001): Magnetic measurements and data processing. Geophysical Observatory Reports of GGRI of HAS 1994-1998. Sopron, 71-76.
- Wilhelmi, Th. (1996): Elektrische Potenzialdifferenzen in Waldbäumen, ihre Adhängigkeit von meteorologischen Faktoren und ihre Beziehung zum Dickenwachstum. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 120: 284-299.
- Zawadzki, T. – Dziubinska H. – Davies, E. (1995): Characteristics of action potentials generated spontaneously in *Helianthus annuus*. *Physiol. Plant* 93: 291-297.
- Zürher, E. – Cantani, M-G. – Sorbetti-Guerri, F. – Michel, D. (1998): Tree stem diameters fluctuate with tide. *Nature*, 392: 665-666.
- Zwieniecki, M.A. – Holbrook, N.M. (1998): Diurnal variation in xylem hydraulic conductivity in white ash (*Fraxinus americana* L.), red maple (*Acer rubrum* L.) and red spruce (*Picea rubens* Sarg.). *Plant Cell Environ.* 21 (11): 1173-1180.
- Zwieniecki, M.A. – Hutyra, L. – Thompson, M.V. – Holbrook, N.M. (2000): Dynamic changes in petiole specific conductivity in red maple (*Acer rubrum* L.), tulip tree (*Liriodendron tulipifera* L.) and northern fox grape (*Vitis labrusca* L.). *Plant Cell Environ.* 23 (4): 407-414.
- Zwieniecki, M.A. – Melcher P.J. – Holbrook, N.M. (2001): Hydrogel Control of Xylem Hydraulic Resistance in Plants. *Science* 291: 1059-1062.