

Szakmai zárójelentés

37955 számú

„Szélsőséges időjárási helyzetek hatása a főbb növények mikroklímájára és termésére
eltérő talajokon” című témáról

1. Általános rész

A címben fogalmazott kutatási téma kidolgozása a pályázatban összefoglalt tervzetnek megfelelően történt. A munka kardinális kérdéseinek sora nem változott, csupán az eredmények arányaiban állapítható meg bizonyos mértékű módosulás különböző fizikai kényszerek folytán. A munkák zavartalanságát megszakította a 2005-ben történt sajnálatos esemény, ugyanis egy új számítógépprogram által vezérelt megfigyelési rendszer mindössze másfél napig volt működőképes, majd villámkárt követően a mérőrendszer tönkrement, amelynek nemcsak a kutatás átmeneti felfüggesztését kellett elszenvedni, emellett az intézményt magát is tetemes anyagi kár terhelte. A mérések továbbfolytatása majd csak szeptember második felében indulhatott meg, így a legfontosabb évszak a vizsgálatok lehetőségi köréből kiesett. Nem lehet említés nélkül elhaladni amellett sem, hogy a már tárolt megfigyelési anyag egy része is jelentősen sérült. Ennek ellenére a vizsgálatokat csökkentett terjedelemben ugyan, de elvégeztük, s az eredmények részletes kidolgozására csak viszonylag rövid idő állt rendelkezésre.

A téma kidolgozásánál széles körben vettük figyelembe a hazai és a nemzetközi irodalom szerinti előrehaladásának alakulását. A meteorológia tudománya területén belül a mikroklimatológia, illetve mikrometeorológia is óriási előrelépésben haladt az elmúlt 20 évben. Különösen a mezőgazdasági célú mikroklimatológia az a terület, amelyen az előrehaladás talán a legszerényebb formában bontakozott ki.

Áttekintve a hazai félévszázados mikroklimatológiai kutatások területén és azoknak eredményein, megállapítható, hogy hazánkban e szakterületen a szakmai előrehaladás igen szerény mértékű volt, nem jelentéktelen mértékben csökkentek az expedíciós jellegű műszeres szabadföldi mérések, melynek következtében olyan általános információhiány állt be, amelynek során csupán elméleti kérdések elemzése vált lehetővé, azonban az egyes növényfajokra alkalmazott eredményrendszer nem bontakozhatott ki. Ilyen rendszereket kívánt kidolgozni különböző növényfajokra a múlt század közepén **Berényi** Dénes és **Wágner** Richard, valamint közvetlen tanítványai (**Szász** G., **Justyák** J.) különösen a vízellátottság mikroklíma szabályozó szerepének meghatározása céljából **Erdős** László (ELTE), az Országos Meteorológiai Szolgálat keretében pedig **Antal** Emánuel irányításával folyt

széleskörű vizsgálat a vízellátottság agroökológiai reakciókat kiváltó jelenségek körében. Mivel ezredfordulóra valamennyi mikrometeorológiai, illetve agrometeorológiai obszervatórium működését befejezte, egyedül a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrumának felügyelete alatt folytathatta működését az 1960-ban létesített obszervatórium. Az obszervatórium kutatási profilja a sugárzó energia, valamint a vízellátottság mértékének mikrometeorológiai szabályozó szerepének meghatározása volt. Ennek keretében tüzetes vizsgálatok folytak a különböző időjárási helyzetekben, a különböző talajtípusokon, és a különböző növények állományaiban kialakult állományklíma sajátosságának feltárására.

A projekt keretében elért eredmények nemcsak újabb tartalmi-fizikai megállapításokat foglalnak össze, de talán a legjelentősebb eredménynek lehet tekinteni azt a szemléletváltozást, amely ez idő alatt a szélesebb körű fizikai kapcsolatok révén alakult ki. Ennek lényegét előrebocsátva hangsúlyozni kell, hogy ennek lényege döntő jelentőségű, mivel ennek alapján a vizsgálatok módszertana, interpretációja alapvetően megváltozott. Addig, míg a korábbi évtizedekben a mikroklimatológia leíró tudomány volt a mérési empiriára épültek a tapasztalatok. A műszertechnika nagyiramú fejlődési folytán azonban már sokkal szélesebb körű információval rendelkezhetünk napjainkban, így az ismereteink köre is jelentősen kibővült. Mindennek következtében a szabadföldi kísérleti mérések fontosságát továbbra is hangsúlyozva kell megemlíteni, hogy a mérési eredmények feldolgozottságának mértéke, a mérések, illetve a mérési eredmények fizikai realitásának ellenőrzésével a vizsgálati határok jelentősen bővültek, s így vált a kutatási témakör háromparaméteres determinizmusra jellemző komplexummá. Ez utóbbi azt kívánja kifejezni, hogy a szántóföldi növényállományok mikroklimáját szabályozó tényezők felölelik a fizikai, biológiai és társadalmi hatások eredőjét. Így a mikroklimatológia területe nem kizárólagosan a fizikai meteorológiához sorolható, de a biológiai tényezők hatásaként érvényesülnek fizikai formában megjelenő biológiai effektusok, továbbá a mezőgazdaság társadalmi átalakulása következtében, a társadalmi műszaki és biológiai előrehaladás sodrásában állandóan módosul az említett szűkebb tudományterület hovatartozása. Ez az okfejtés noha látszólag kívánkozik a zárójelentésbe, azonban hangsúlyozni kell, hogy e tudományág és a társtudományokkal való kapcsolat módosulásával szükségszerűen változnak a mikroklimáról alkotott oksági és jelenségtani fogalmak. Ez az átalakulás természetes nemcsak hazánkban zajlott le, jelenleg is tapasztalható nemzetközi vonatkozásban a növényállományok mikroklimája szabadföldi vizsgálatának csökkenése. Ez nem a mikroklima jelentőségét reprezentálja, mivel az fizikai tény, sokkal inkább magyarázható ez soktényezős tulajdonságrendszerével.

A fentiek tömör összefoglalására épül a mikroklímával kapcsolatos nézetek módosulása. Ha figyelembe vesszük valamennyi említett tényezőnek az egyenértékű szerepét, rögtön felmerül az a kérdés, hogy **mi alakítja ki a növényállomány mikroklímáját**. Az erre adott válasz egy része egyértelmű, nevezetesen az, hogy nem a növényfajhoz kötött fogalom, mivel teljesen eltérő növényfajok állományai is egymáshoz hasonló mikroklimatikus sajátosságokkal rendelkeznek. Azt is könnyű belátni, hogy a különböző agrotechnikai tényezők (tápanyagellátás, vízellátottság, állománysűrűség, talajbeli különbség stb.) csupán módosító paramétereknek tekinthetők, melyeknek hatásfüggvényük bizonyos fizikai tartalommal hasonlítanak egymásra. Az időjárási tényezők jelentőségének megítélésében is óvatosan kell eljárni. Nem fogadható el a mikroklíma tudományt megalapító **Geiger** (1921) megállapítása aki szerint az állományklíma és általánosítva a mikroklíma csak a szélcsendes sugárzási időjárási helyzetben alakul ki, vagyis nem folytonos jelenség. Vele ellentétben alakult ki az a nézet, hogy a növényállományok terében mikroklíma mindig van, melynek tulajdonságai eltérnek a csupasztalajok feletti talajmenti légtér állapotától. Mikroklíma megjelenésének formája az azt jellemző fizikai értékek különbözőségében jutnak kifejezésre, amely a mikroklíma állandóságát ökológiailag és fizikailag egyértelműen bizonyítják.

Elfogadva a fenti megjegyzéseket és megállapításokat feltehető az a kérdés, hogy mi alakítja ki a mikroklímát és melyek az elsődleges meghatározó tényezők. Ebben a vonatkozásban értük el tulajdonképpen azt az új korábbiakhoz viszonyított nézetbeli eltérést, mely szerint a projektben végzett vizsgálatok és a korábban folytatott kísérleti mérések eredményére támaszkodva a növényállományok mikroklímájának három legfontosabb meghatározó tényezője:

- **a növényállományok szerkezete** (növényi anyag tere / állománytér),
- **a növényállományok aerodinamikai tulajdonságai** (a szélsébség és az örvényességét meghatározó turbulencia paraméterek térbeli alakulása),
- **a növényállományok energiaellátottsága**.

E három kritikusnak tekinthető tulajdonság, illetve hatás azok, amelyek együttesen alakítják ki a mikroklíma sajátosságát. Nem fogadható el az olyan mikroklimatológiai leírás, amely eltekint a **növényállomány szerkezetének** részletes ismertetésétől. A növényállomány a talaj és a légkör között egy olyan köztes réteg, amely a levegő mozgását szabályozza. E tekintetben az állomány belső légtere sem homogén, ugyanis a különböző növényi szervek térbeli koncentrálttsága a függőleges mentén változó, ennek folytán az egyszerűen értelmezett fékezési koefficiens is növekszik (részletesen ld. később). Mivel az állományszerkezet a növekedés ütemének megfelelően változik, ennek következtében a levegőmozgás és a

szállított levegőtulajdonság terjedési sebessége is módosulhat. Így alakulnak ki a függőleges és horizontális aerodinamikai különbségek, amelyek egyúttal a szenzibilis és latens hőenergiák térbeli heterogenitását váltják ki az állományból.

A *növényi szervek* – szár, levélzet, virágzat stb. – *aerodinamikája*, illetve aerodinamikai tulajdonságai szabályozzák a levegő mozgásának sebességét. Bár ez a kérdés rendkívül összetett, gyakorlatilag a levélfelület nagyságával szokás jellemezni az áramlásra gyakorolt hatást, noha e tekintetben az állományok egyes szervei között igen tekintélyes eltérés állapítható meg (ld. később). A növényi szervek aerodinamikája, valamint az állományszerkezet együttesen fejezik ki a növényállomány szerkezetének megfelelő áramlási feltételeket, illetve a tulajdonság szállítás lehetőségeit és korlátait. A két tényező együttese egy olyan szabályozó rendszer, amely döntő módon szabályozza a mikroklimatikus tér különböző biológiai és fizikai sajátosságait, a különböző anyagok mozgásának szabályozója, a növény és levegő közötti gázcserefolyamatok irányítója.

A növényállományok sajátos mozgásrendszerének tere egyúttal a *sugárzó energiának* a helyszíne is. Az elnyelt sugárzó energia hasznosulása a növényfajonként különböző arányban változik, sőt az állomány fékezési együtthatójától függően az állomány különböző mélységében is változik. (A fékezési együttható az aerodinamikai tulajdonság és az állományszerkezet közös eredőjét kifejező érték.) Mivel az energia különböző élettani folyamatok fenntartását biztosítja elkülönítetten kell kezelni a globális sugárzástól a fotoszintetikusan aktív sugárzást (PAR), amely a globálisugárzásnak változó nagyságú aránya az állomány növényfajától, fejlettségi állapotától, levélfelület nagyságától és korától függően. A sugárzó energia ismert törvényszerűségek keretében szabályozza az elpárologtatható, vagy a lehetséges transzspiráció víz mennyiségét (részletesen ld. később).

A felsorolt és részben bemutatott paraméterek szerepének mérlegelése során belátható, hogy ezek azok az állandó tényezők, amelyek napról-napra hatnak a mikroklimatikus tér kialakulására és napszakos átalakulására. A három tényező együttese egy rendkívül fontos fizikai törvényszerűséget határoz meg, amelyet a mechanikában *erő és tömeg* törvényével fejez ki. A növényállomány tere valójában egy mozgástér, elvileg nyugalmi állapot sohasem következik be, rendkívüli helyzetben igen rövid ideig alakulhat ki, azonban ebben az esetben az anyag mozgási sebessége nulla. Az erő ebben a relációban a szoláris energia nagysága, a tömeg pedig az a mozgó anyag, amely az állomány terében helyezkedik el részben a növényen belül, részben pedig a vegetatív és generatív szervek légterében. A tömeg mozgásának idő szerinti változása rendkívül fontos, ugyanis a növényállomány tere egy olyan transzfer zóna a légkör és a talaj között, amely a felszíni és a talajhatásokat a szabad légkörbe

juttatja, illetve a légköri hatásokat pedig eljuttatja a növényállományon keresztül a talaj felszínéig. Ennek a hatalmas mozgásrendszernek ritmikája, dinamikája a mikroklimatikus tér egyéb tulajdonságainak meghatározója.

Ezek után célszerű újból feltenni azt az általános kérdést, hogy mi a növényállományok mikroklímája? A helyes válasz fizikai és növényökológiai aspektussal definiálható:

- *A növényállományok mikroklímájának rendszere az állományszerkezet és a mindenkori időjárási folyamatok együttes hatásaként kialakuló meteorológiai kategória, melynek lehetséges szélsőséges határai a növényállomány mindenkori állapotára nézve jellegzetes.*
- *A növényállományok mikroklímájának rendszere fizikai folyamatok által keltett kényszerek összessége, amelyeket a hatótényezők lehetséges ingadozásai és egyidejű alakulása határoz meg.*

A fenti értelmezési módokból egyértelműen derül ki, hogy a növényállományok klímáját elsősorban a légköri és talajkörnyezet határozza meg, mint a külső kényszerek forrásai, továbbá alakulásában sajátos arányban érvényesül az állomány szerkezete, mint a rendszer belső kényszerének kiinduló tere. Bármerről közelítjük meg a jelenség forgalmának értelmezését, mindenképpen kitűnik belőle az általánosan ismert jellemvonás: a nagy variabilitás, továbbá felismerhető a fogalmakban az, hogy a mikroklimatikus folyamatokat a külső és belső kényszerforrásokból kiinduló hatások modulálják. Ugyanezt fejezi ki tulajdonképpen a legegyszerűbb megfogalmazási módszer is: a mikroklíma az időjárási, a talaj és a növényi tulajdonság által kialakított kölcsönhatások következménye.

Mind a kutatás szempontjából, mind pedig az eredmények hasznosíthatóságának oldaláról közelítve érdemes megemlíteni a leírás és az interpretálhatóság módszereinek problémáit. Az egykori, régebbi mikroklimatikus kutatások módszertana rendkívül egyszerű volt, ugyanis valamilyen logikai rendben folytatott mérések végzése nyomán elért és rendezett kísérleti adatok alapján levont következtetések képezték az eredményeket. Sajnálatos módon e módszer nem biztosítja a reprodukálhatóság kritériumát, így vált lehetővé, hogy számos fizikailag irreális mérési anyag jutott a nagy nyilvánosság elé és vontak le azokból el nem fogadható megállapításokat. A reprodukálhatóság kritériuma akkor érhető el, ha fizikailag leírhatóvá válik a matematika nyelve segítségével a természetben lejátszódó folyamatok sajátossága. Mindaddig, amíg ez nem teljesül, az interpretáció szubjektív megállapítás marad, mivel az idő szerinti objektív változás oka ismeretlen marad.

A projekt munkálatai során mindvégig érvényesült az a törekvés, hogy a folyamatokat kiváltó okok ismertté váljanak, s megbízható formulák segítségével leírható legyen. Az utóbbi

kritérium magába foglalja a fizikai okkeresés lehetőségét is. Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a mikroklimatikus terekre vonatkozó sajátosságok feltárása akkor tekinthető korrektnek és kritikailag elfogadhatónak, ha a vizsgált tényezők közötti oksági összefüggés feltételei ismeretesek és feltártak, s ennek megfelelően az eredmények interpretációjában jelenjenek meg a legfontosabb hatótényezők szerepeinek súlyarányai. Ez egyidejűleg azt is jelenti, hogy a mikroklíma sajátosságának jellemzésekor nemcsak az általános képet kell ismernünk, hanem a különböző tulajdonságok egyidejű ingadozhatóságának határainak alakulására is következtethetünk. Lényegében az utóbbi jellemző paraméter tekinthető a legkarakterisztikusabb jellemző számnak, mivel általánosságban hasonlítanak a mikroklimatikus terek egymáshoz, de az általánostól eltérő helyzetekhez haladva a határok tekintetében egyre nagyobb különbségek alakulhatnak ki. Emiatt válik szükségessé az expedíciós mérések igen alapos fizikai elemzése, mivel különböző hatásfüggvények segítségével valósítható meg a kitűzött cél elérhetősége.

A mikroklimatikus terek jellemzésére ma már általánosan használt az energiamérlegekre épülő összehasonlító vizsgálat. Kétségtelen tény, hogy a mérleg a szenzibilis és latens hő alakulása szempontjából igen hasznos és fizikailag megbízható paraméter, de csak abban az esetben, ha az energiamérleg alakulását horizontális mikroklimatikus különbségekből származó mikroadvektív folyamatok nem zavarják. Miként a pályázatban is már utalás történt e zavaró folyamat jelentőségére, ez alkalommal is utalni kell ennek fontosságára, mivel vizsgálataink szerint a terület homogenitása, vagy éppen heterogenitása folytán a zavaró mikroadvektív hatások olykor csekély szerepük mellett, máskor óriási téves megállapításhoz lehet eljutni (ld. későbbiekben).

A szántóföldi növénytermesztés szakterületén, különösen a kisparcellás kísérleti területeken olykor igen jelentős méreteket ölthet az advektív hatás különösen olyan esetekben, amikor olyan kísérleti parcellák helyezkednek el egymás mellett, amelyekben az energiamérleg összetevőinek és arányainak időbeli változása valamely okból különbözik (nagy tápanyagellátásbeli különbség, vízellátottságbeli különbség, állománysűrűségkülönbség). Ilyen alkalomból jogosan vetődik fel az a kérdés, hogy a mikroparcellák rendelkeznek-e saját ökológiai rendszerüknek megfelelő energiamérleggel és állományklímával. Vizsgálataink szerint a kisparcellák növényállományok légterében a horizontális levegőkicserélődés olyan nagy mértékű, hogy a növényállomány, vagy a kezelés hatására bekövetkező levegő állapotmódosulás nem ismerhető fel, tehát környezetétől függő mikroklíma alakul ki. Ilyen esetekben szükségszerűen a növény fejlődése is ezeknek a hatásoknak van alávetve, így a kezelés hatása torzított formában, vagy módon jelenik meg,

bontakozik ki. Erre vonatkozó hazai publikáció mindeddig nem készült, így a szántóföldön, főként a szegélyterületeken kibontakozó mikroadvékciós folyamatok hatásáról részletes képet nem alkothatunk.

Az eddigiekben az új aspektusú mikroklíma-kutatásnak azokat az irányelveit foglaltuk össze, amelyeket vezérelvként követve alkalmaztunk a projekt kidolgozása folyamán. A továbbiak áttekintő képet nyújtanak a mikroklímát meghatározó fő tényezők fizikai kifejezésének módszeréről, valamint a módszerek alkalmazásának eredményeiről.

2. rész

A módszerek és eredmények összefoglalása

Míg az 1. rész a projekt célkitűzéseit, valamint a vele kapcsolatos elvi kérdéseit és a vele kapcsolatos nézeteket foglalja össze, a továbbiakban az alkalmazott vizsgálati módszerek, alapösszefüggések, végül pedig az elméleti és gyakorlati eredmények, következtetések olvashatók. Hangsúlyozni kell, hogy a növénytermesztést érintő mikroklimatológiai kérdések közelítése fizikai elvek alapján történt, azonban az eredmények összefoglalása keretében a mindenki számára érthető interpretáció áll.

A könnyű áttekintés céljából e rész három súlypontra bontható: 1. az állományszerkezet szerepe, 2. az állomány aerodinamikai tulajdonságai, 3. az állomány energia- és anyagmérlege. Ezekre vonatkozó összefoglaló megállapítások az alábbiak.

2. 1. Az állomány szerkezetének hatása az állományklímára

A növényállományok fizikai felépítése, szerkezete döntő szerepet játszik a mikroklíma jellegének alakulásában. Sajnálattal állapítható meg, hogy néhány esettől eltekintve a mikroklimatikus feltételeket leíró közlemények csupán a növényállomány fajára vonatkozóan utalnak, legfeljebb a fejlettségi állapot megjelölése kiegészítésével, azonban a szerkezet fizikai tulajdonságáról legtöbb helyen nem esik szó. E tapasztalat következménye, hogy a növényállományokban kialakuló feltételeknek legfeljebb meteorológiai magyarázata olvasható, azonban az állományszerkezet ismeretéről nem nyújtanak tájékoztatást. A beszámoló elején hangsúlyozni kell, hogy az állományszerkezet a legfontosabb mikroklíma-kialakító tényező, tekintettel arra, hogy az állomány fizikai sajátossága szabályozza a mikroklímát kialakító további tényezők hatékonyságát és módját, de befolyásolja a kialakult különböző elemek értékének rendszerét is (pl. hőmérséklet, nedvességtartalom, szélsébség,

CO₂ stb.). Kézenfekvő annak a megállapításnak a kiemelése, hogy a növényállományok klímáját mindenekelőtt az állományszerkezet geometriai, morfológiai, ontogenetikai állapota határozza meg, mivel e tulajdonságok idő szerinti változékonysága igen csekély. A növényállomány biológiai értelemben a genetikai potenciálnak egyik sajátos megjelenési formája, amely genetikai tulajdonsághoz kötött időbeli változásnak van alávetve. A növényállomány fejlődése matematikai formulák segítségével leírható, azonban e leírás igen korlátozott lehetőségeket biztosít az állomány sajátosságának megismeréséről. Így elsősorban a növény magassága, tömege stb. becsülhető különböző valószínűségi függvényekkel. Az állomány fizikai értelemben véve térben véletlen elrendeződésű növényi szilárd anyag, amely biológiai felépítése tekintetében heterogén, tömegének térbeli elhelyezkedése és a tömegarányok időben az ontogenetika törvényei szerint változóak. Szántóföldi növények esetében a levél, a szár, valamint a generatív szervek alkotják tömegének felszín feletti hányadát, melynek nedvességtartalma 30-90% között változhat a tenyészidőszak folyamán. Ez utóbbi tulajdonság mikroklimatológiai szempontból jelentős.

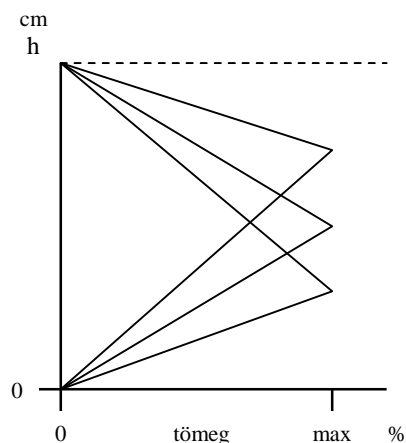
A növényállományok parametrizálhatósága közel megoldottnak tekinthető, mivel számszerűen fejezhető ki azok a sajátosságok, amelyek a növény fajára, fajtájára, fejlettségi állapotára vonatkozóan jellegzetesnek minősül. A vizsgálataink során figyelembe vett paraméterek: növénymagasság (h/z), levélfelület (LA), levélfelületi index (LAI), levélfelület-sűrűség (LAR), a levélzet horizontális és vertikális vetülete (L_h , L_v), a levél állásszöge (φ), a levélzet valószínűségi eloszlása a térkoordináta-rendszerben (planofil, erectofil, plagiofil, uniform, gömbi-szférikus). Valamennyi eloszlás valószínűségi függvénye ismert, ily módon az állomány levélzetének zónánkénti alakulása és annak időbeli változása e függvényekkel jól követhető. A levélzet valószínűségi eloszlásának jellemzésére a β -eloszlás tekinthető a legmegbízhatóbbnak, mivel e valószínűségi függvények segítségével kifejezhető a levélállás eredő meredekségének szöge. E paraméter ökológiai szempontból alapvető jelentőségű, mivel kifejezi a sugárzó energiának potenciális felvételét, illetve a transzspiráció intenzitásának az egyik legfontosabb meghatározója.

Végül, de nem utolsó sorban kell megemlíteni azokat az állományszerkezet-módosító hatásokat, amelyek természeti eredetűek, illetve emberi beavatkozás egyik formájában az agrotechnikai beavatkozások segítségével módosulhatnak. Természeti adottságként figyelembe kell venni mindenekelőtt a talaj fizikai és kémiai tulajdonságát. A jó hő- és vízgazdálkodású, nagy tápanyagkészletű talajokon a növényi tömeg maximuma alakul ki a talajok kötöttségének, illetve csökkenésének fokozódásával, a visszatartható vízmennyiség nagyságának kisebbedésével a növény igényei kielégítése egyre mérsékeltebbé válik, így az

állománytömeg is csökken. Nem lehet eltekinteni a talaj hőtani jellemzőitől sem, mivel az állomány légtere hőmérsékletének egyik szabályozó faktora. A növényállományok sűrűsége szabályozható az alkalmazott agrotechnika és tápanyagellátás, valamint a talaj természetes állapotától függően. Az állománysűrűség szabályozása napjainkban egyik legidősebb kérdésnek minősíthető egyes növényfajoknál, így erre vonatkozóan a későbbiekben még e kérdésre visszautalás történik.

A növényállományok különböző szervei bár szilárd anyagok, rugalmas testnek minősülnek. E sajátosság nemcsak azért lényeges, mert a sérülékenység ezáltal jelentősen kisebbedik, azonban a mechanikai erők következtében kialakuló növényi szervek mozgása az életfolyamatok alakulására is kihat előnyös vagy káros formában. Elsősorban a fotoszintézis folyamatára kell gondolni, ugyanis az állandó mozgásban lévő növényi szervek, levelek fotoszintetikus tevékenységének egyenletességét az állandó mozgás teszi lehetővé. Hasonlóképpen a heterogenitást küszöböli ki a mozgás a transzspirációs vízleadás folyamatában is.

A növényállományok belső rendszere zonális elrendeződésű, amely különböző formában nyilvánul meg. Elsősorban a növényi tömeg zonális eloszlása mutat általános törvényszerűséget követő jelenséget, amelyet vizsgálataink során „háromszög-törvénynek” nevezünk el. Az állomány tömege felső záró síkjából kiindulva lefelé haladva a specifikus tömeg (g cm^{-1}) fokozatosan növekszik, majd elérve a maximumot, onnan ismét egyre kisebbedik és a talajfelszín közelében nullává válik. A maximális specifikus tömegű zóna elhelyezkedése növényfajra jellemző tulajdonság, a tenyészidőszak folyamán változik. Jelentősége rendkívül nagy, mivel az eltérő tömegsűrűség a növényállományokban kialakuló mozgásrendszer és az energiatovábbítási folyamatoknak szabályozójává válik. Az övezetes tömegeloszlás vázlata az alábbi szerint értelmezhető.



2. 2. A növényállományok aerodinamikai tulajdonságai

Az állandóan mozgó levegő számára a növényállomány akadályt képez, a mozgó levegő az állományba behatolva sebessége lelassul. A mikrometeorológiának speciális fejezete az állomány feletti és az állományban kialakult áramlási sebesség tanulmányozása. Mivel e kettő nem választható el egymástól, ezért ez alkalommal külön fogalmat kell bevezetni az állománybeli sebesség jellemzéséhez. Ez a fogalom a **normalizált szélesség**, amely az állomány síkjában mért tényleges sebesség értéke. Míg az állomány feletti sebesség magasság szerinti változása logaritmusos, az állománybeli sebesség ettől jelentősen eltér, melynek oka elsősorban a növények okozta növények felületén kialakuló súrlódás. A növényállomány fékező közeget képez és morfológiai tulajdonságaitól függően a sebességcsökkenés állományfüggő. A fékezés mértékének kifejezésére használatos a fékezési együttható (c_d) értéke, melynek nagyságát a szélmozgás mennyiségének az ütközési test által elnyelt kinetikus energia különbsége határozza meg, amely a szélnyomás értékével (F) azonos:

$$F = 1/2 \rho \alpha u^2 \quad \text{kg m}^{-2}$$

amelyben α : a felszín alaki tényezője ($\alpha < 1$).

A fékezési koefficiens, amely lényegében a függőleges helyzetű elemi felületen áthaladó levegő nyomásának és az azonos felületre vonatkoztatott növényi test felületére eső nyomás hányadosának reciproka. Egy vízszintes felületre az állomány felső záró síkja mentén kialakuló fékezési együttható:

$$c_{d,z} = \left(\frac{u_*}{u(z)} \right)^2 \quad \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$$

E szerint tehát ily módon számszerűsíthető egy adott légrétegben kialakuló ellenállás, amely aerodinamikai mérőszám a súrlódási sebességtől és a magasságtól függő érték. Nyilvánvaló, hogy értéke a növényállomány magasságától és annak architektúrájától függ. Magának a növényállománynak az ellenállása egy igen fontos relatív érték, mivel ez fejezi ki az állomány fékező hatását a belső térben. Ez legegyszerűbben a Newton-féle szélnyomással jellemezhető és arányosan nyírási ellenállással; az állomány relatív aerodinamikai ellenállása:

$$c_{d,r} = (1 - F) \rho u^2 \quad \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$$

A $c_{d,r}$ az egész állományra (z), vagy annak egyes rétegeire is meghatározható. A növényállományon belüli sebességeloszlás kioltási függvényvel írható le. A Beer-Lambert-féle egyenlet szerint az u sebesség különböző z állomány mélységben:

$$u(h) = u(H) \cdot \exp - a \cdot LAI \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Lágyszárú növényeknél $a = 0,4 - 0,6$.

Az állomány különböző mélységében kialakuló sebesség tapasztalati formulával is megállapítható, amennyiben az α tapasztalati alaki együtthatója ismert. Ebben az esetben az állomány z rétegében a sebesség értéke az állomány szintjében mért értékhez (Z) viszonyítva az alábbi módon becsülhető:

$$u(z) = \frac{u(Z)}{\left[1 + \alpha \left(1 - \frac{z}{Z}\right)\right]^2} \quad m \cdot s^{-1}$$

Az α együttható számszerű értéke $0,1 - 5,0$ érték között változik, minél nagyobb az ütközési test átmérője, vagy felülete, az α annál magasabb értéket vesz fel és elérheti a $2,5 - 3,0$ értéket is. Az utóbbi esetben egy igen sűrű kukoricaállományról van szó. Mivel a növényállományok felülete elsősorban a LAI-tól függ, ezért célszerű, ha annak az értékére támaszkodva történik az α -érték becslése. Vizsgálataink szerint az α -érték számítás útján is becsülhető, ha ismerjük a turbulens diffúziós együtthatónak és a c_d -nek értékét, ugyanis a kettő hányadosa közelítően kifejezi a fékezés hatékonyságának fokát. Valójában a fékezést exponenciális függvény fejezi ki, vagyis a szélesebbeség növekedésével az ellenállás értéke fokozódik.

A levegő mozgása a növényállományokban az állomány feletti légtérhez hasonlóan örvényes szerkezetű. A belső és külső súrlódás következtében kialakuló örvényesség, turbulencia az áramlás sebességétől függ, növekedésével a turbulencia fokozódik. A turbulencia mértékét a turbulens diffúziós együttható (K_m) fejezi ki, amely az egységnyi távolságra eső sebességkülönbség nagyságával arányos. A növényállományban a K_m változékonysága a növénylevél momentum-abszorpció karakterisztikájától függ. Megfigyelve a levélfelületnek a nagyságát, valamint a szélesebbeségnek a vertikális eloszlását, úgy megállapíthatóvá válik a levélzetnek a fékezési együtthatója. Egy végtelen csekély dz magasságú rétegnek a fékezési együtthatója a vegetáció elemének vetületére vonatkozva az alábbi módon írható fel:

$$\tau_0 = \rho u_*^2 = \frac{1}{2} \rho \int_0^h c_d(z) \cdot u(z)^2 \cdot a(z) \cdot d(z)$$

A vertikális momentum-fluxus, vagy más néven a mozgásmennyiség vertikális terjedési sebessége:

$$K_m = \tau / \rho (du / dz)$$

Az utóbbi két egyenletre támaszkodva körvonalazható a növényállományokban kialakuló és lezajló mozgásrendszer jellemzése. Hangsúlyozni kell, hogy a növényállományok

aerodinamikai tulajdonságoknak részletes jellemzése fentieknél lényegesen bonyolultabb matematikai és fizikai ismereteket követel meg, ennél fogva ezektől e helyen el kell tekinteni, csupán utalni kell arra, hogy a kialakuló mozgások, melyek az állományok tereit kitöltik különböző tulajdonságokat szállítanak az állományok belső terébe, s egyidejűleg az állomány konzervatív tulajdonságú levegőtömegét a külső légtérbe szállítja, amely az élő növénynek egyben elemi igényét is jelenti. Az említett mozgásrendszer biztosítja az állomány szellőzöttségét, amelynek révén a különböző hőmérsékleti és nedvességi szabályozást biztosítja azt a levegőkörnyezetet a növény számára, amelynél a fel- és leépítő élettani folyamatok zajlanak.

2. 3. A növényállományok energia- és anyagforgalma

A növényállományok energia- és anyagforgalma alatt értjük azt a mechanizmust, amely körforgalom alakjában zajlik le és az állomány légtere, valamint a külső légtér közötti levegőcsere formájában nyilvánul meg. A körforgalom folytonos jelenség, melynek fenntartója, meghajtó energiája a napsugárzás. Az energiamérleg megállapításakor ismerni kell azt nettó energiamennyiséget, amely a besugárzás útján visszamarad a felszínen és annak egy része a talaj hőforgalmának fenntartására fordítódik, más része pedig a levegő felmelegedése és a víz párolgása útján hasznosul. Az energiamérleg a mikroklíma komplex megnyilvánulási formája.

Az energia- és anyagmérleg meghajtó energiája sugárzás útján jut le a talaj felszínére, melynek napi összege hazánkban a vegetációs időszak alatt átlagban 15-22 MJ/m² nap, amelytől természetesen csökkenő irányba jelentős eltérések alakulhatnak ki. Ennek az értéknek mintegy 50%-a az a nettó energiamennyiség, amelyet az energiamérleg folyamatai hasznosítanak. A hasznosítás módját az energiamérleg egyenlete írja le:

$$R_n = H + G + LE$$

ahol R_n : a sugárzási energiamérleg, H : a levegőnek átadott hőmennyiség, G : a talaj által forgalmazott hő összege, LE : párolgásra fordított energia összege, abban az esetben, ha a környezetből származó energia-bevétel nulla.

A növényállományra eső sugárzás, illetőleg sugárzási mérleg jól becsülhető, azért annak számítási módszereitől eltekintünk. A növényállományba bejutó energia függőleges menti eloszlása az állományszerkezet függvénye. A termesztett növényeink sugárzásáteresztő-képessége 0,4-0,6%-ra tehető. Elfogadva ezt a kioltási együtthatót, a növényállomány különböző mélységében mérhető sugárzási energia nagysága:

$$R_{n,z} = R_{n,0} \exp(-k \cdot LAI) \quad MJ$$

ahol k : a kioltási együttható. Ezzel az összefüggéssel jól becsülhető a növényállományon áthaladó energia nagysága is, amelynek értéke kifejtett növényállományokban a beeső sugárzásnak mintegy 15-40%-a lehet. A sugárzás abszorpciója rétegenként változik a tömegarányok módosulása következtében, ezért a fenti összefüggés csak a teljes állományra tekinthető elfogadhatónak. Amennyiben ismert a rétegenkénti zöldtömeg nagysága, úgy megszerkeszthető a rétegenként lejutó energia összege is. A növényállományon belüli sugárzást forgalom összetevői igen bonyolult módon állnak kapcsolatban egymással, ugyanis a levelek önálló sugárzási egyenleg színhelye, vagyis az energia-felvétellel egyidejűleg felmelegszik és kisugároz, illetve más levél általi kisugárzott energiát újból elnyeli. Ennek az elvnek a figyelembevételével meghatározható a levél hőmérséklete is, azonban ezt e helyen nem mutatjuk be a terjedelmes összefüggések ismertetésének szüksége végett.

Az energiamérleg napi menete tipikus módon alakul, effektív energia-felvétel kezdete napkelte utáni időszakban indul meg, a késődelutáni órákban pedig már befejeződik, vagyis az energia-felvétel tartama nyáron 13-14 órára terjed. Az energiaveszteséges időszak napnyugta előtti órákban veszi kezdetét, 18-20 órákor, és annak intenzív időszaka az éjfél előtti órákban alakul ki, de fennmarad napkelteig időpontjáig. A nyári időszakban a legerőteljesebb energia-felvétel a nappali, déli órákban elérheti a 250-300 W/m² óra intenzitást, de az éjszakai energiaveszteség mindössze 50-80 W/m² óra alakul ki, tehát nappali időszakban az energia-felhalmozódás nagymértékű, míg az éjszakai energiaveszteség viszonylag csekély. Ilyen esetekben beszélünk pozitív mérleg kialakulásáról. A napi mérleg nemcsak mikroklimatikus, de makroklimatikus jellemző is, mivel ennek értéke nagyobb hányadában a légköri folyamatok által szabályozott feltételeknek megfelelően alakul. Mivel hazánkban kevés pontjára vonatkozóan ismerjük a mérlegek átlagos napi értékét, ezért a vizsgált területre vonatkozóan az alábbiakban mutatjuk be egyrészt a sugárzási mérleg nagyságát, másrészt pedig a talaj és levegő által forgalmazott energiamennyiséget, illetve a párolgásra fordított hőmennyiség átlagos napi nagyságát.

	márc	ápr	máj.	jún	júl	aug	szept	okt	nov
R_n	3,41	6,75	9,63	10,76	11,20	9,39	6,36	3,30	-0,10
G	0,12	-0,31	-0,50	-0,65	-0,61	-0,36	0,09	0,39	0,48
H	-0,55	-3,24	-4,66	-4,27	-4,39	-3,21	-2,97	-1,66	0,73
LE	-2,97	-3,56	-4,48	-5,82	-6,20	-5,82	-3,48	-2,05	-1,11

A táblázat fontosnak tekintendő, mivel a napi sugárzási mérleg értékei a szűkebb szakmai körökön kívüliek számára csak részben, vagy egyáltalán nem ismertek. A sugárzási mérleg egy olyan komplex energetikai érték, amely meghatározója a levegő felmelegedésének, illetve a párolgás nagyságának mértékére.

A vizsgálatok keretében megállapítást nyertek a különböző növényállományok (búza, kukorica, cukorrépa, lucerna) jellegzetes értékei a fejlődés különböző szakaszára. A növényállományokra vonatkozó, vagyis fajspecifikus paraméter ismerete nélkülözhetetlen az állományklíma pontos leírásánál. Hangsúlyozni kell a talaj minőségének és állapotának igen széleskörű módosító értékét. A talajhatás legerőteljesebben az alacsony nedvességtartalomnál ismerhető fel.

Az állományklíma összehasonlító elemzése megfelelő referenciacélszínhez való hasonlítással végezhető el. Nemzetközileg elfogadott referenciacélszín a rövidre vágott természetes állapotú gyepfelszín. Ennek sugárzásmérlege, valamint a különböző hőenergiát felhasználó folyamatok nagyságának idő szerinti változását a fenti táblázat adatai reprezentálják. E módszernek az alkalmazásával nyert kidolgozást a főbb növények energiamérlegének jellemzése különös tekintettel a párolgásra fordított energia arányának a megállapításával.

Az energiamérlegnek a levegőbe jutó hányada a szenzibilis és latens energiaösszeg. Az energiamérleg összetevőinek nagysága és egymáshoz való aránya határozza meg az állomány felmelegedésének mértékét, illetve a transzspirációs vagy evapotranszspirációs vízmennyiséget. Hangsúlyozni kell, hogy a növényállományokban kialakuló hőmérséklet és annak rétegződése, valamint az állomány különböző rétegeiben kialakuló transzspiráció tetszőleges időtartamra vonatkozó összege az állomány energia-ellátottságától, szerkezetétől függően kialakuló mozgásrendszertől függ, megnyilvánulási formája pedig a különböző meteorológiai elemek tér- és időbeli változásával jellemezhető.

Az energia-ellátottság mértékének jellemzésére kidolgozást nyert egy olyan összefüggés, amelynek segítségével lehetőség nyílik a szenzibilis és latens hő, valamint a sugárzási mérleg energiájának egymáshoz viszonyított aránya. Ennek az arányszámnak az alapján elemezhetővé válik az állományon belüli légtér hőmérsékleti és nedvességi állapota. Ez az összefüggés a korábbiaknál lényegesen korszerűbb elemző módszer, tekintettel arra, hogy az analízisbe automatikusan beépül a verifikáció folyamata, vagyis ellenőrizhető a számítások fizikai realitása. Ennek a modellnek a segítségével lehetővé válik a különböző mérési eredmények reprezentativitásának ellenőrzése, de lehetőséget biztosít alkalmazása a hibás mérési adatok kiszűrésére is. Végül hangsúlyozni kell, hogy a növényállományokban végzett

hőmérséklet vagy egyéb más meteorológiai elemek mérésének fizikai realitása, meghatározása önmagában nem elégíti ki a korszerű állományklimatológiai megismerhetőség keretét. A determinisztikus kapcsolatok fennállása végett nélkülözhetetlen a folyamatok fizikai leírásának szüksége, mivel csak ezúton szélesíthetők az okozati összefüggésekre vonatkozó ismeretek, amelyeknek jelentősége rendkívüli, ugyanis a növényállományokban kialakuló mikroklimatikus tér nem zárt rendszer, szigorú kölcsönhatásban áll fizikai folyamatai tekintetében a talaj és légkör dinamikus anyagi rendszerével. Ez a magyarázata annak, hogy az állományban kialakuló légmozgás törvényszerűségeinek ismerete nélkülözhetetlen, amelyet a növénytakaró sajátos habitusa alapján szabályozhat. Az időjárási elemeknek az állományban történő módosulása csupán a mozgásmennyiség és a vele együtt lezajló energia-áthelyeződési folyamat következménye. Mindaddig, amíg ennek a sajátos rendszernek mechanizmusa ismeretlen marad, addig mikroklimatikus tér szabályozhatóságának problémája nem oldható meg.

Főbb elért eredmények

Széleskörű elméleti és kísérleti, szabadföldi alaputatások folytak a növényállományok mikroklímájának kialakulására vonatkozóan. Megállapítást nyert, hogy a növényállományok klímája lényegében a talaj és az azt fedő növénytakaró által kifejtett fizikai kényszerek nyomán kialakuló határreteg. A korábbi nézetektől eltérően nem fajspecifikus fogalom és jelenség, hanem elsősorban az állomány szerkezetének felépítéséből származó fékezőerő, valamint a sugárzó energiának egyidejű hatásaként kialakult, környezetétől elkülöníthető talajmenti légtér mikrometeorológiai folyamatainak rendszere. E megfogalmazás és a fizikai jellegnek megfelelő leírás alapján viszonylag nagy pontossággal körvonalazható horizontális kiterjedése és magassága. E definíció értelemszerűen bizonyítja, hogy a mikroklimatikus tér kialakulásában a növényi élő szervezet sajátos egyedi morfológiai jegyein keresztül képes szabályozni annak mindenkori állapotát. A növényállomány klímája tehát nem fajspecifikus, hanem morfo-specifikus meteorológiai képződmény, ezért a növény fejlődési ütemének megfelelően módosul állapota és kiterjedése.

Az állományklímát a nappali órákban az anyag és energia divergenciája, míg az éjszakai napszakban pedig a konvergenciája jellemzi.

Mivel a növényállomány belső terében a növényi tömegeloszlás anizotrop, ennek következtében a felszínnel párhuzamos zónákra tagolható a növényi tömeg koncentrációkülönbsége alapján. Nyílt mikroklímáról beszélhetünk akkor, amikor az állományon át a sugárzó energiának legalább 50%-a lejut a talaj felszínére. Zárt mikroklíma alakul ki olyan esetekben, amikor a növényi szervek által alkotott nagy anyagsűrűségű zóna az állomány felszínére jutó sugárzásnak legalább 50%-át nyeli el. Az állományon belüli növényi anyageloszlás három zónára tagolódik („háromszög-törvény”). A növényállományok mikroklímáját elsődlegesen meghatározó tényezők:

- az állomány architektúrája és annak aerodinamikai sajátossága,
- a levegő mozgása az állomány feletti térben,
- az állományra jutó sugárzási mérleg értéke,
- a növényállományok anyagforgalmi rendszerének sajátossága.

Az állományon belül az említett kényszerek következtében környezetétől eltérő hőmérséklet, nedvességtartalom, légmozgás és egyéb tulajdonság bontakozik ki, s minden tulajdonság rá nézve sajátos napi ritmus szerint változik. A projektben végzett vizsgálatok alapján kidolgozást nyert:

- morfo-specifikus vertikális tömegeloszlási függvény,

- aszimmetrikus eloszlási függvények az állomány teljes tömegének tenyészidőszak alatti leírására.

Az állományklíma sajátosságai és azoknak szabályozó rendszere.

Az állományklíma jellemzői időben folyamatosan változnak, a legsajátosabb, egyben törvényszerű változás a napi ciklus. A ciklus jelenléte a környezethez való viszonyítás útján történhet, de nem vethető el a hagyományos empirikus elemző eljárás sem, amikor a mikroklimatikus tér elemeinek értékeit a makroklimatikus tér értékéhez hasonlítjuk. Nyílt mikroklímák esetében a mikroklimatikus tér nappal melegebb, éjszaka hűvösebb környezeténél, amely a divergenciát, illetve konvergenciát bizonyítja. Míg a nyílt mikroklímák a főbb időjárási elemek napi ingását fokozza, a zárt mikroklímákban a makroklímához képest a napi ingás csökken. A zárt mikroklimatikus teret a legsűrűbb növényi zóna és a talajfelszín közötti sík által közrezárt tér képezi. A nappali hőmérsékleti többlet, illetve a zárttéri hőmérsékleti hiány az állomány architektúrájának függvénye. A hőmérsékleti többlet, illetve hiány nagyságának meghatározhatósága valószínűségi függvényekkel oldható meg. Ennek a rendszernek a szabályozó tényezői tehát az állományszerkezet, a sugárzó energia és az állomány külső és belső geometriai sajátossága.

A mikroklíma sajátosságait módosító tényezők, szélsőségek.

A mikroklíma jellegét meghatározó említett szabályozó rendszer igen nagy sajátosságbeli variabilitást enged meg. A szántóföldi növénytermesztésben számos olyan tényező ismert, amely egyidejűleg ***mikroklíma módosító hatásokat*** kelt, ezek közül kell kiemelni ***a talaj típusát***. A talajok típusa és mindenkor állapota közvetlen és közvetett módosító tényezőnek tekinthető. ***Közvetlen módosító következményt*** fejt ki a talaj hőgazdálkodási tulajdonsága. A talaj hézagterfogatanak növekedése csökkenteni a hővezető-képességet, melynek következtében az erőteljes felszíni felmelegedés zavartalanul kibontakozhat. A felszíni rétegek által tárolt hőenergia nagyobb hányada a levegőnek adódik át, kisebb hányada pedig a mélyebb rétegekben tároódik. A hőkapacitás növekedésével e különbség fokozatosan kiegyenlítődik, majd a nagy agyagtartalmú kötött talajoknál ez az arány az előbbi ellentétese lesz, vagyis a levegőbe csökkenő hőmennyiség jut, viszont a talaj által raktározott hőmennyiség pedig jelentősen gyarapodik, más szóval a laza talajok nappali hőtöbbletet fokozzák, de növelik az éjszakai hőhiányt is, míg a kötöttséggel növekedve ez a hatás egyre szerényebbé válik. Ezt az általános törvényszerűséget a növényállomány alatti talaj szenzibilis hőforgalma is megerősíti. A talaj szenzibilis hőforgalmának mesterséges befolyásolhatósága a talaj művelésének módjában rejlik. A lazítás minden esetben a hővezetés romlásával jár, a tömörítés pedig a levezetett hőmennyiség megőrzését biztosítja, illetve csökkenti a felszín

hőmérsékletet. Megállapítást nyert, hogy a talaj típusa, fizikai állapota és nedvesség készletének nagysága még sugárzásban csak mérsékelt módon ellátott időjárási helyzetben is kormányzó szerepet tölt be a növényállomány mikroklimatikus szélsőségeinek mértékében.

Közvetlen módosító következményt fejt ki az állomány szerkezete, ezen belül a növényi szárazanyag tömegének relatív aránya a légtér térfogatának százalékában kifejezve. E kapcsolat minden növényre vonatkoztatva egyaránt érvényes, ezért a mikroklimatikus jellegben és a szélsőségek alakulásában parametrikus szerepet tölt be.

Tekintettel arra, hogy a mikroklimatikus tér sokparaméteres jellemző értékekkel írható le, kidolgozást nyert egy olyan általános mikroklíma-modell, amely steady-state helyzetre vonatkoztatva jól alkalmazható a növényállományok hő- és vízellátottsága mértékének kifejezésére és meghatározható annak alapján a növény állapota, a fotoszintézis intenzitása, valamint a vízforgalomban betöltött szerepe. E modell részletes kimunkálása után ennek ismertetése előkészítés alatt áll.

Megjegyzések

A téma kidolgozása tervnek megfelelően történt időbeli ütemezésben természetesen módosítás történt, tekintettel arra, hogy egyes időjárási szélsőségek bekövetkezése folytán a speciális mikroklíma-kutatás lehetősége korlátozott volt. A legrészletesebb vizsgálatok búza- és kukoricaállományban folytak, nagyobb részt mezőségi vályogtalajon, kisebb arányokban pedig homok és agyagos talajokon. A vályogtalajok kísérleti területe a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrumának kísérleti területein folytak, a homoktalajon folyó méréseket Debrecen-Pallag térségében végeztük, a kötöttebb agyagos területeken növényállományaiban végzett mérések a debreceni löszhát és a Hortobágy peremvidéke közötti nagy agyagtartalmú talajokon tenyésző növényállományokban folytak.

A kutatást akadályozó tényezők közül kell megemlíteni, hogy 2005 nyarán kísérleti mérések nem folyhattak, mivel a június elején bekövetkezett villámkár a mérőrendszert megsemmisítette.