

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Talajművelő gépek és eljárások hatása a talaj CO₂ kibocsátására

Doktori (PhD) értekezés

Rádics János Péter

Gödöllő
2015

**A doktori iskola
megnevezése:** Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Prof. Dr. Fenyvesi László
egyetemi tanár,
SZIE, Gépészmérnöki Kar
Mechanikai és Géptani Intézet

társ témavezető: Prof. Dr. Jóri J. István
egyetemi tanár,
BME, Gépészmérnöki Kar
Gép- és Terméktervezés Tanszék

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölésjegyzék	5
1. Bevezetés, célkitűzések	9
1.1. A téma felvetésének indoklása	9
1.2. Célkitűzések	10
2. Szakirodalmi áttekintés	11
2.1. A globális klímaváltozás	11
2.2. A klímaváltozás okai	11
2.3. Üvegházhatású gázok jelentősége	13
2.4. A CO ₂ körfolyamat az ökoszisztémában	14
2.5. A légkör CO ₂ koncentrációjának változása	15
2.6. Globális és európai intézkedések	16
2.7. CO ₂ kibocsátás talajhasználati vonatkozásai	17
2.8. A talajművelési rendszerekkel összefüggő CO ₂ kibocsátás	19
2.9. A talajok természetes CO ₂ kibocsátása	21
2.10. A talajlégzés vizsgálata	23
2.10.1. Szántóföldi (in situ) vizsgálatok	24
2.10.2. Laboratóriumi vizsgálatok	31
2.10.3. Elméleti megközelítések a bolygatatlan talaj gázcseréjének meghatározására	31
2.10.4. Matematikai modellek a művelésből adódó kibocsátás számszerűsítésére	34
2.11. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	39
3. Anyag és módszer	41
3.1. A szántóföldi vizsgálatok módszerének kiválasztása, a vizsgálatok módszertana	41
3.2. A kísérleti területek bemutatása	43
3.3. A vizsgált munkagépek bemutatása	43
3.4. A vizsgálatok körülményeinek ismertetése	45
3.5. A mérési eljárás kidolgozása	47
3.5.1. Mérőműszer kiválasztása	47
3.5.1.1. A különböző mérőrendszerek szántóföldi vizsgálata	49
3.5.1.2. A nagyszámú kamrával végzett mérés műszerezése	50
3.5.2. A mérőkamrák kialakítása	50
3.5.2.1. A rövid időtartamú méréssorozatok kamrakialakítása	50
3.5.2.2. A közepes időtartamú méréssorozatok kamrakialakítása	50
3.6. A mérési eredmények értékelése	53
3.6.1. A kibocsátott CO ₂ mennyiségének meghatározása	53
3.6.2. A mért értékek interpolálása	54
3.6.3. A kibocsátás modellezésének alapjai	55
3.6.3.1. Reakciókinetikai közelítés	56

3.6.3.2. A hőmérsékletváltozás hatásának figyelembe vétele	57
4. Eredmények.....	59
4.1. A mérési eljárások összehasonlító méréseinek eredményei	59
4.1.1. A különböző mérőrendszerek összehasonlítása.....	59
4.1.2. A kumulált és az ürítéses mérési eljárás összehasonlítása.....	60
4.1.3. A minimális inkubációs idő meghatározása.....	64
4.1.4. A csonkakúp és a hasáb alakú kamrás mérési eljárás összehasonlítása.....	64
4.2. A rövidtávú mérések eredményei	66
4.3. A közepes időtartamú mérések eredményei	69
4.3.1. A talajművelés utáni CO ₂ kibocsátási modell kidolgozásának eredményei	70
4.3.2. Az enyingeri közepes időtartamú mérés eredményei.....	80
4.3.3. A mesztegnyői közepes időtartamú mérés eredményei	82
4.4. A kibocsátási modell továbbfejlesztése	84
4.5. Új tudományos eredmények	89
5. Következtetések és javaslatok.....	91
6. Összefoglalás.....	92
7. Summary	93
8. Mellékletek.....	94
M1: Irodalomjegyzék.....	94
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk.....	108
M3: Mérési adatok	110
M4: Az alkalmazott Matlab fájlok.....	123
M5: A kibocsátási modell illesztésének részeredményei.....	131
Köszönetnyilvánítás	133

JELÖLÉSJEGYZÉK

A szakirodalom feldolgozás (2. fejezet) jelölései

δ	[h]	a függvény töréspontja
θ	[térf. %]	talaj nedvességtartalom
A	[m ²]	kamra által lefedett terület nagysága (2.3. egyenlet)
A	[-]	konstans (2.5. egyenlet)
a	[-]	modell paraméter
a ₀	[g/m ² /h]	a CER alsó határértéke
a ₁	[-]	modell paraméter (2.14., 2.15, 2.16., 2.17. egyenletek)
a ₁	[g/m ² /h/°C]	hőmérséklethez tartozó modellparaméter (2.18. egyenlet)
a ₂	[-]	modell paraméter (2.14., 2.15, 2.16., 2.17. egyenletek)
a ₂	[g/m ² /h/térf.%]	nedvességtartalomhoz tartozó modellparaméter (2.18. egyenlet)
a ₃	[g/m ²]	labilizálható C mennyiségének csökkenését jellemző modell paraméter
a ₄	[1/nap]	modell csillapítási paraméter
a _{CO2}	[W/m ²]	CO ₂ pillanatnyi melegítési potenciálja
a _i	[W/m ²]	<i>i</i> gáz pillanatnyi melegítési potenciálja
b	[-]	modell paraméter
b ₀	[g/m ² /h]	CER maximális értéke
ΔC	[g/m ³]	CO ₂ mennyiségének változása a mérés időtartalma alatt
c	[-]	modell paraméter
C _{0T}	[g/m ²]	labilizálható C mennyisége művelt területen
C _{0NT}	[g/m ²]	labilizálható C mennyisége művelés nélküli területen
c _{CO2}	[ppm]	CO ₂ gáz <i>t</i> idő elteltével megmaradó része
CER	[g/m ² /h]	CO ₂ csere arány
c _i	[ppm]	<i>i</i> gáz <i>t</i> idő elteltével megmaradó része
E ₀	[-]	aktivációs energiát jellemző modell paraméter
E _a	[J]	aktivációs energia
F _{CO2}	[g/m ² /h]	CO ₂ kibocsátás
F _{NT}	[mmol/m ²]	talajlégzés műveletlen talajon
F _T	[mmol/m ²]	talajlégzés művelt talajon
GWP _i	[-]	<i>i</i> gáz sugárzásos fűtési indexe
k	[-]	modell paraméter (2.12. egyenlet)
k	[g/m ² /h]	csillapítási paraméter (2.18. egyenlet)
k ₀	[g/m ² /h]	hanyatlási hányados
k ₁	[g/m ² /h]	hanyatlási hányados növekménye

k_{NT}	[-]	csillapítási paraméter művelés nélküli területen
k_T	[-]	csillapítási paraméter művelt területen
M_0	[mmol/m ²]	egy műveléssel felszabadítható szén-dioxid
m_v	[m ³ /mol]	CO ₂ moláris térfogata
m_w	[g/mol]	CO ₂ moláris tömege
Q_{10}	[-]	hőmérsékleti együttható
R	[μmol/m ² /s]	CO ₂ kibocsátás (2.6. egyenlet)
R	[g/m ² /h]	talajlégzés (2.9., 2.10., 2.11. egyenletek)
R	[J/mol/K]	egyetemes gázállandó (2.5. egyenlet)
R_0	[-]	modell paraméter
R_T	[g/m ² /h]	talajlégzési értékek T hőmérsékleten
R_{T+10}	[g/m ² /h]	talajlégzési értékek T+10 hőmérsékleten
Δt	[s]	inkubációs idő (2.3) egyenlet
t	[s]	művelés óta eltelt idő (2.12. egyenlet)
t	[h]	művelés óta eltelt idő (2.13., 2.14., 2.15., 2.16., 2.17., 2.18. egyenletek)
T	[K]	hőmérséklet (2.5., 2.7., 2.9., 2.10., 2.11. egyenletek)
T	[°C]	talajhőmérséklet (2.6., 2.18. egyenletek)
T_0	[°C]	hőmérsékletet jellemző modell paraméter
V	[m ³]	kamrában lévő levegő térfogata
V_0	[m ³]	mérőrendszer össztérfogata
x	[cm/s]	légsebesség
y	[g/m ² /h]	CO ₂ kibocsátás (2.2. egyenlet)
y	[mmol/m ²]	talajlégzés (2.12. egyenlet)

Az értekezésben további részében alkalmazott jelölések

β	[h]	hőmérséklet változás fáziseltolódása
a	[-]	modell paraméter
A	[-]	emisszió kezdeti értékét megadó együttható
A_h	[°C]	hőmérsékletváltozás amplitúdója
A_k	[m ²]	mérőkamra által lefedett terület
b	[-]	modell paraméter
B	[-]	emisszió minimumértékének kezdeti értékét megadó együttható
b_1	[g/m ² /h]	emisszió középértékét megadó együttható
b_2	[g/m ² /h]	emisszió amplitúdóját megadó együttható
b_3	[h]	emisszió periódusidejét megadó együttható
b_4	[h]	emisszió fáziseltolódását megadó együttható

c	[-]	modell paraméter
c ₀	[-]	emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható
C ₀	[g/m ²]	talaj kezdeti mobilizálható szén tartalma
C _{0CO₂}	[g/m ² /h]	talaj kezdeti CO ₂ kibocsátás
c ₁	[h]	műveletlen terület CO ₂ kibocsátásának periódusidejét megadó együttható
c ₂	[h]	kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható
c ₃	[-]	műveletlen terület CO ₂ kibocsátásának éves periódusidejét megadó együttható
C _{CO₂}	[g/m ² /h]	talaj CO ₂ kibocsátás
C _n	[mol/mol]	CO ₂ koncentráció
C _{ppm}	[μmol/mol]	CO ₂ koncentráció
C _{talaj}	[g/m ²]	talaj mobilizálható szén tartalma
d ₁	[-]	modell paraméter
d ₂	[-]	modell paraméter
dt	[h]	a mérés időtartama
dC	[mol/mol]	a mérőkamra koncentráció változása az inkubációs idő alatt
E	[-]	enzim
ES	[-]	enzimsubstrát komplex
F _{CO₂}	[g/m ² /h]	CO ₂ kibocsátás intenzitása
f _k	[-]	kumulált mérési eredményekre illesztett elsőfokú polinom függvénye
f _ü	[-]	ürítéses mérési eredményekre illesztett elsőfokú polinom függvénye
f _k '	[-]	kumulált mérési eredményekre illesztett elsőfokú polinom függvényének meredeksége
f _ü '	[-]	ürítéses mérési eredményekre illesztett elsőfokú polinom függvényének meredeksége
h	[g/m ² /h]	műveletlen terület maximális kibocsátása
j	[g/m ² /h]	műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke
k	[-]	középhemérséklet együttható
k ₁	[-]	modell paraméter
k ₂	[-]	modell paraméter
l	[-]	hőmérséklet amplitúdó együttható
M	[g/mol]	CO ₂ moláris tömege
p	[Pa]	légnyomás
P	[-]	végtermék
p ₁	[-]	modell paraméter
p ₂	[-]	modell paraméter
R	[J/mol/K]	egyetemes gázállandó

S	[-]	szubsztrát
t	[h]	idő
T	[°C]	talajhőmérséklet adott mélységben
t ₀	[h]	hőmérsékletváltozás periódusának hossza
T ₀	[°C]	talaj középhőmérséklet
T _{0k}	[°C]	napi vagy éves középhőmérséklet
T _k	[°C]	környezeti hőmérséklet
t _{max}	[-]	időintervallum maximum értéke
t _{min}	[-]	időintervallum minimum értéke
V	[m ³]	a mérőkamra térfogata
w	[g/m ² /h]	mért emisszió értékek
W	[g/m ² /h]	CO ₂ kibocsátás
W _{exp}	[g/m ² /h]	exponenciális CO ₂ kibocsátási függvény
W _{mért}	[g/m ² /h]	művelt terület méréssel meghatározott CO ₂ kibocsátása
W _{mértelt}	[g/m ² /h]	abszcisszához eltolt CO ₂ kibocsátás
W _{ref}	[g/m ² /h]	műveletlen terület kibocsátási intenzitása
W _{refmért}	[g/m ² /h]	referenciaterület méréssel meghatározott CO ₂ kibocsátása
Y	[g/m ² /h]	CO ₂ kibocsátás

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a téma aktualitását, a dolgozatban bemutatott kutatás felvetésének okait és azokat az alapvető célkitűzéseket kívánom bemutatni, amelyek elérésével a kiindulási problémára válasz adható.

1.1. A téma felvetésének indoklása

A globális klímaváltozás az emberiség eddigi legnagyobb kihívása (JOLÁNKAI és BIRKÁS, 2005). A fejlett országok kormányai, a kutatók iránymutatásának köszönhetően felismerték ezt, és a Kyoto egyezmény megszületésével és elfogadásával közös alapelvek adtak iránymutatást az emberi beavatkozás hatásainak mérséklésére.

A hőmérséklet folyamatos emelkedése, az egyre gyakrabban tapasztalható időjárási szélsőségek miatt egyre nyilvánvalóbb az intenzívebb globális összefogás szükségessége. Intézkedések kellenek a hatások mérséklésére, a változás sebességének csökkentésére, megállítására, vagy visszafordítására.

A klímaváltozás hosszú távú hatásai nem kiszámíthatók. A létező klímamodellek egyelőre nem képesek leírni a Föld bonyolult ökoszisztémájának pontos működését, mivel nem tudják maradéktalanul figyelembe venni a lehetséges visszacsatolási mechanizmusokat (COX *et al.*, 2000). Ezért a klímaváltozás hatásainak elemzésére szolgáló modellek, amelyek a jelenlegi tudásunk szerint belátható tényezőket veszik csak figyelembe, rövidtávúak, és nagy szórással tudják megbecsülni a lehetséges következményeket (KUMP, 2002).

Bolygónk klímájának megváltozását a vélelmek szerint elsősorban a földi légkör természetes üvegházhatását szabályzó, üvegházhatású gázok (GHG) koncentrációjának emelkedése okozza. Ez a folyamat egyidős az emberiség növekvő igényeit kielégíteni kívánó iparosodási folyamatok által okozott kibocsátás növekedésével.

Az antropogén eredetű GHG kibocsátásért elsősorban az energia előállítás, az ipar és az intenzív mezőgazdaság és erdőgazdálkodás felelős. Az előbbiek esetében a kibocsátás a jelenlegi technológiai szinten megszüntethető, vagy nagymértékben mérsékelhető, ellenben az általuk a légkörben felhalmozott GHG-k csökkentésére, néhány műszaki megoldástól eltekintve, amelyek ilyen volumenű alkalmazása kérdéses, csak a Föld szárazföldi és vízi élővilága képes. Ezért kiemelten fontos, hogy a mezőgazdasági és erdőgazdálkodási gyakorlat szem előtt tartsa azokat a technológiákat, amelyek segítségével az emberi aktivitás miatt megnövekedett GHG koncentráció visszafordítható (COX *et al.*, 2000; PACALA, 2004).

Az élővilág természetes GHG körfolyamataival számos kutatóintézet foglalkozik. Az 1980-as évektől kezdődően egyre hangsúlyosabban került előtérbe a földhasználat miatt, a talaj szénkészletének csökkenéséből adódó légkörbe jutott CO₂ kérdése, mivel az ipari folyamatokhoz képest az egységnyi területre jutó kibocsátás intenzitása elenyésző ugyan, de a kibocsátást adó felület mérete miatt, a növénytermesztés és a talajművelés területén, jelentős potenciált jelent.

A művelt talajok szén körforgásának pontos megértéséhez az egyes ok-okozati összefüggéseket külön kell vizsgálni, hogy megvalósítható legyen a folyamat pontos modellezése. Nagy mennyiségű kutatási anyag gyűlt össze az egyes talajművelési rendszerek és művelési eljárásaik kibocsátásáról, amelyek segítik a talaj szén körforgásának elemzését és megértését. Részletes matematikai modellekkel leírható a környezeti változók ismeretében, az erdő- és szántóföldi talajok CO₂ körforgásának abszolút értéke, de hiányosak azok az ismeretek, amelyek segítségével a művelési eljárások CO₂ kibocsátásának modellezése lehetővé válik és a pontosan meghatározható, hogy a különböző művelési eljárások és talajművelési rendszerek használata milyen irányban és mértékben befolyásolja a talaj CO₂ kibocsátását, ezzel együtt szénkészletének változását.

1.2. Célkitűzések

A fenntartható fejlődés (ÁNGYÁN, 2003) definíciója szerint olyan folyamat, amely a jelen generációk igényeit és törekvéseit úgy elégíti ki, hogy az a jövő generációk igényeinek kielégítését nem veszélyezteti. A jelenkorban alkalmazott talajművelési eljárásoknak és művelési rendszereknek is ezt a célt kell szem előtt tartaniuk. A klímaváltozás mérséklésében és visszafordításában a talajművelésnek kiemelt szerepe van. A mezőgazdasági talajok CO₂ kibocsátásának abszolút értéke jól megbecsülhető, de nem tisztázták a különböző művelési eljárások kibocsátására vonatkozó pontos összefüggések.

Dolgozatom célkitűzései:

- A talajművelési eljárások CO₂ kibocsátásának számszerűsítését lehetővé tevő mérési eljárás kidolgozása, amely összhangban a szakirodalomban található megállapításokkal, lehetőséget ad az egyes művelési eljárások kibocsátásának viszonylag gyors és egyszerű meghatározására és összehasonlítására.
- A rendelkezésre álló kísérleti területeken, a különböző művelési eljárások következtében a talaj megváltozott CO₂ kibocsátásának méréssel történő meghatározása.
- Matematikai modell kidolgozása, az egyes művelési eljárások kibocsátásának meghatározására.
- A modell általánosítása és a talajművelés technológiák teljes kibocsátásának meghatározása.

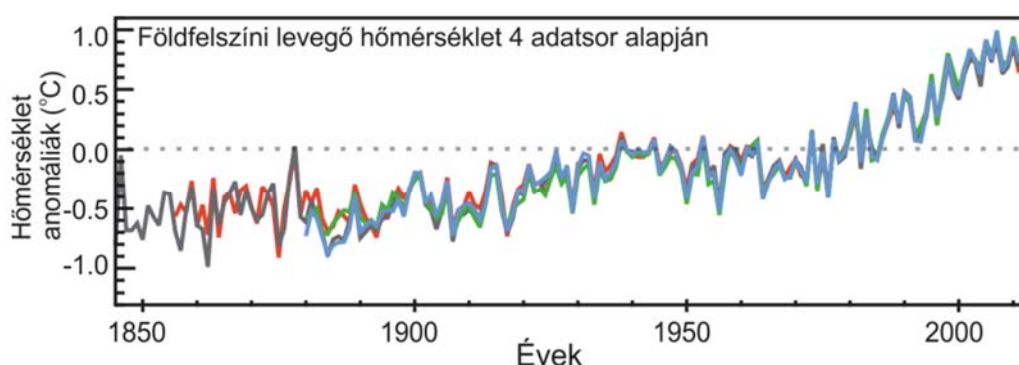
A kutatómunkám fő célja azon összefüggések megalapozása, amelyekkel a későbbiekben a talajművelési rendszerek pontos CO₂ kibocsátása leírható, és meghatározható a hagyományos művelési eljárásokat kiváltó talajvédő technológiák alkalmazásával megtakarítható CO₂ mennyisége, és ezen technológiák hozzájárulása a légkör CO₂ tartalmának csökkentéséhez.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A dolgozat célkitűzéseinek alátámasztása az elérhető könyvtári és elektronikus szakirodalom áttekintésével végezhető el. A kutatási irányok megalapozásán túl, a szakirodalom kutatás további feladata volt a téma pontosítása és a témakörben történő széleskörű tájékozódás.

2.1. A globális klímaváltozás

Amióta létezik a Föld, éghajlata folyamatosan változik. Időnként gyorsabban, máskor lassabban, de a mostani helyzet eltér a korábbi trendektől (LÁNG *et al.*, 2007). A Föld éves középhőmérséklete az elmúlt egy évszázados időszakban egyre gyorsuló mértékben növekszik (2.1. ábra.). A XX. század elején elindult folyamatban eleinte kisebb mértékű anomáliák voltak tapasztalhatók, de az elmúlt 30 évben évtizedenként nagyságrendileg 0,2 °C volt globálisan a hőmérséklet emelkedés. A földfelszín hőmérsékletének emelkedése nem egyenletes. A Föld keleti és nyugati féltéke közötti eltérő mértékű középhőmérséklet emelkedést, valamint a földrészekben belüli regionális eltéréseket teszik a kutatók felelőssé az elmúlt időszak extrém időjárási jelenségeiért (HANSEN *et al.*, 2006).



2.1. ábra. A földfelszíni hőmérséklet változása az 1850-es évektől napjainkig
Forrás: (T. F. STOCKER *et al.*, 2013a)

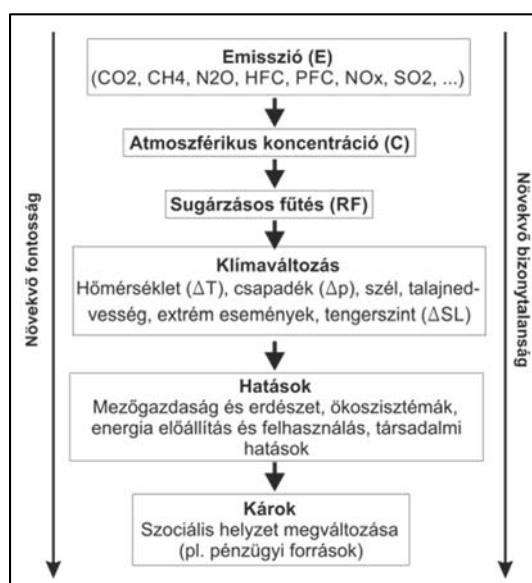
Az extrém időjárási események bekövetkezése (HOYOS, 2006; WEBSTER, 2005), a sarki jégtakarók kiterjedésének csökkenése, a tengerszint növekedése (T. F. STOCKER *et al.*, 2013a), és a hőmérséklet növekedés összefüggései könnyen beláthatók. Hasonló szignifikáns kapcsolat fedezhető fel a trópusi korallok kifakulása (BAKER *et al.*, 2008), a termésmennyiségek csökkenése az aszályos időszakokat kiváltó csapadékmennyiség csökkenés, és az ezt esetlegesen kísérő időszakos hőmérséklet növekedési jelenségek számának és hosszának megnövekedésével is (DAI, 2011; NICHOLLS, 2004). Kevésbé nyilvánvaló, de annál fontosabb következmény a hóhullámok hatására bekövetkező egészségi problémák és elhalálozások megnövekedése (HUANG *et al.*, 2011; REY *et al.*, 2007).

2.2. A klímaváltozás okai

A szárazföldi és a vízi ökoszisztémák, és az atmoszféra globális, üvegházhatású gázcseréje napjainkban a klímaváltozás kutatásának egyik kulcskérdése. Léggörünk természetes, termikus struktúrájának része az üvegházhatás, amely lehetővé teszi, hogy a Föld lakható bolygó legyen. A naptól érkező, majd az atmoszféra és a talaj által elnyelt napsugárzás gondoskodik a földi életfolyamatok energiaellátásáról. A mesterséges üvegházak belső hőmérséklete azért magasabb a környezetinél, mivel az üvegburkolat megakadályozza hosszú hullámhosszú sugárzás távozását. A Föld légkörében található természetes vízgőz, szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid, ózon és egyéb üvegházhatású gázok hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezek határozzák meg a Földre beérkező (rövid hullámhosszú, 0,2-4,0 μm) napsugárzás, és az ennek hatására felmelegedett talajból, óceánokból és légkörből távozó (hosszú hullámhosszú, 4,0-100 μm) hősugárzás egyensúlyát, mivel a földfelszín által, a Planck energiaeloszlási törvény miatt visszasugárzott hő egy részét csapdába ejtik a légkörben (BOLIN *et al.*, 1985; DICKINSON és CICERONE, 1986; LAL, 1998;

RAMANATHAN és FENG, 2009; WANG *et al.*, 1976). A természetes üvegházhatású gázok nélkül az átlagos felszíni hőmérséklet nagyjából -19°C lenne, amely körülbelül 33°C -kal alacsonyabb a jelenleginél (DUNNE és HARTE, 2001). A földi üvegházhatás alapmechanizmusát elsőként 1896-ban Svante August Arrhenius, svéd fizikus írta le, aki rámutatott, hogy a fosszilis energiahordozók égetése növelheti a légkör CO_2 koncentrációját és megváltoztathatja a Föld sugárzási egyensúlyát (ARRHENIUS, 1896; BOLIN *et al.*, 1985).

A fentiek miatt, az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának megváltozása jelentős hatással van elsősorban a földfelszín hőmérsékletére, és ezen keresztül a globális klímára. Az 2.2. ábra az okozati összefüggéseket és a klímaváltozás hatásmechanizmusát mutatja be az antropogén eredetű emissziótól a károkig bezárólag.



2.2. ábra. A klímaváltozás hatásmechanizmusának folyamatábrája az emissziótól az okozott károkkal bezárólag. Forrás: (FUGLESTVEDT *et al.*, 2003)

Az ipari forradalom óta drasztikusan megnöttek a légkörben az antropogén eredetű kibocsátáshoz köthető üvegházhatású gázok, amelyek jelentős hatással lehetnek a légköri egyensúlyra. A kibocsátott szén-dioxid főként a háztartásokban és ipari létesítményekben használt fosszilis energiahordozók égetéséből származik (LÁNG *et al.*, 2007). Jelentős kibocsátott mennyiség köthető a megváltozott földhasználathoz, az erdőterületek csökkenéséhez és a mezőgazdaság intenzitásának megváltozásához (BHATTACHARYYA *et al.*, 2013). A metán (CH_4) kibocsátás főbb forrásai a mezőgazdasági tevékenységek (állatállomány, különösen a szarvasmarha állomány, trágyatelepek, komposztok), a bányászat, a földgázkitermelés és szállítás, valamint a hulladéklerakók. A dinitrogén-oxid (N_2O) rendkívül hosszú légköri tartózkodása (>100 év) miatt különösen veszélyes. A dinitrogén-oxid kibocsátását erősen befolyásolja a nitrogéntartalmú műtrágyák használata, de jelentős forrás a műtrágya- és salétrom gyártás, a mezőgazdasági hulladékok égetése és a kérődző állatok tartása (LÁNG *et al.*, 2007).

A klímakutatók az 1980-as évekig főként a természetes üvegházhatású gázokra koncentráltak. Ezek mellett azonban az emberi tevékenység következtében olyan tisztán szintetikus előállított gázok kerültek a légkörbe, amelyek molekuláris alapon, a CO_2 -höz képest akár tízezerszeres hatással lehetnek az üvegházhatásra. Nagyon hosszú légköri tartózkodási idejük és ózonromboló hatásuk miatt esetenként „szuper üvegházhatású gázként” is aposztrofálják ezeket. A legfontosabb ilyen gázok a klór-fluor-karbonok (CFC-k)¹, amelyek teljesen halogénezett szénvegyületek. Kifejlesztésükre a hűtőiparban korábban használt tűzveszélyes és súlyosan egészségkárosító gázok kiváltása miatt volt szükség. Ezen kívül alkalmazzák aeroszol hajtóanyagként, elektromos tüzek oltóanyagaként is

¹ Főként CFC11 / FREON11 (CFCl_3) és CFC12 / FREON12 (CF_2Cl_2).

(RAMANATHAN és FENG, 2009). A szintetikus üvegházhatású gázok csoportjában megemlítendőek még az üvegházhatáshoz való hozzájárulásuk mértékének sorrendjében a tetraklór-metán (CCl₄) és metil-kloroform (CH₃CCl₃) tartalmú vegyületek, a hidro-klór-fluor-karbonok (HCFC-k), hidro-fluor-karbonok (HFC-k), a teljesen fluorozott, kén hexafluorid (SF₆) és nitrogéntrifluorid (NF₃) tartalmú üvegházhatású gázok (FFGHG-k) valamint a szulfuril-difluorid (SO₂F₂) (RIGBY *et al.*, 2014).

2.3. Üvegházhatású gázok jelentősége

Minden üvegházhatású gáz eltérő mértékben módosítja a globális éghajlati rendszer paramétereit. Ezek a gázok a globális energia egyensúlyban okozott felmelegedést fokozó hatásuk (sugárzásos fűtés index² W/m² -ben kifejezve), valamint sugárzási jellegük és a légköri élettartamuk vonatkozásában térnek el egymástól. Az kibocsátott GHG-k emissziójának egységes alapú összehasonlíthatóságára jelenleg a globális melegítési potenciál index³ használatos, amely egy dimenzió nélküli relatív érték segítségével adja meg a referenciaként használt CO₂-hoz viszonyított egyenértékben az egyes gázok, adott időegység alatti felmelegést fokozó hatását (FUGLESTVEDT *et al.*, 2003; KIRSCHBAUM, 2013; MANNING és REISINGER, 2011). LASHOF és AHUJA (1990) által közölt, egyszerűsített (2.1) összefüggés alapján ennek alapja az egyes gázok kumulált sugárzásos fűtése adott (általában 100 éves) időegység alatt:

$$GWP_i = \frac{\int_0^{\infty} a_i(t)c_i(t)dt}{\int_0^{\infty} a_{CO_2}(t)c_{CO_2}(t)dt}, \quad (2.1)$$

ahol:

$a_i(t)$ - i gáz pillanatnyi melegítési potenciálja $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
 $c_i(t)$ - i gáz t idő elteltével megmaradó része [ppm],
 $a_{CO_2}(t)$; $c_{CO_2}(t)$ - a fentieknek megfelelő értékek CO₂-re.

Fontos megjegyezni, hogy a_i az adott i gázhoz tartozó koncentráció és az egyéb üvegházhatású gázok koncentrációja függvényében változó érték a telítettség és az elnyelési sávok átfedése miatt. Ezért az egyes üvegházhatású gázok globális melegítési potenciál értékét a légkör jövőbeni összetétele jelentősen módosíthatja (HANSEN *et al.*, 1988).

A GWP index alapja, az RF értékek integrálása némi pontatlanságot hordoz magában a bemeneti adatok bizonytalansága és a különböző klíma scenáriók feltételezéses megközelítése miatt. Ezért ennek továbbfejlesztését több tanulmány is megkísérelte (SHINE *et al.*, 2005), de a hiányosságok ellenére továbbra is az egyik legmegbízhatóbb mérőszám a különböző üvegházhatású gázok klímaváltoztató potenciáljának rangsorolására (FUGLESTVEDT *et al.*, 2003).

2.1. táblázat. Néhány üvegházhatású gáz, az üvegházhatásra gyakorolt hatását jellemző paramétereit

Gáz	Légköri tartózkodási idő ¹ [év]	Ipari forradalom előtti koncentráció ² [ppm; ppb]	Légköri koncentráció 2011-ben [ppm; ppb]	Sugárzásos fűtés index tömeg bázison ³ (RF) [W/m ²]	Sugárzásos fűtés index molekuláris bázison ³ (RF) [W/m ²]	globális melegítési potenciál index különböző időhorizonton ³ [-]		
						20 év	100 év	500 év
CO ₂ [ppm]	50-200 ²	280	390,44±0,28	1	1	1	1	1
CH ₄ [ppb]	9,1	700	1803,1±4,8	66	24	62	23	7
N ₂ O [ppb]	131	275	324,0±0,1	200	200	275	296	156
CFC11 [ppt]	45	0	236,09±0,1	n.a.	n.a.	6034 ⁴	4749 ⁴	1707 ⁴
SF ₆ [ppt]	3200	0	7,26±0,02	10,122	33,592	15100	22200	32400

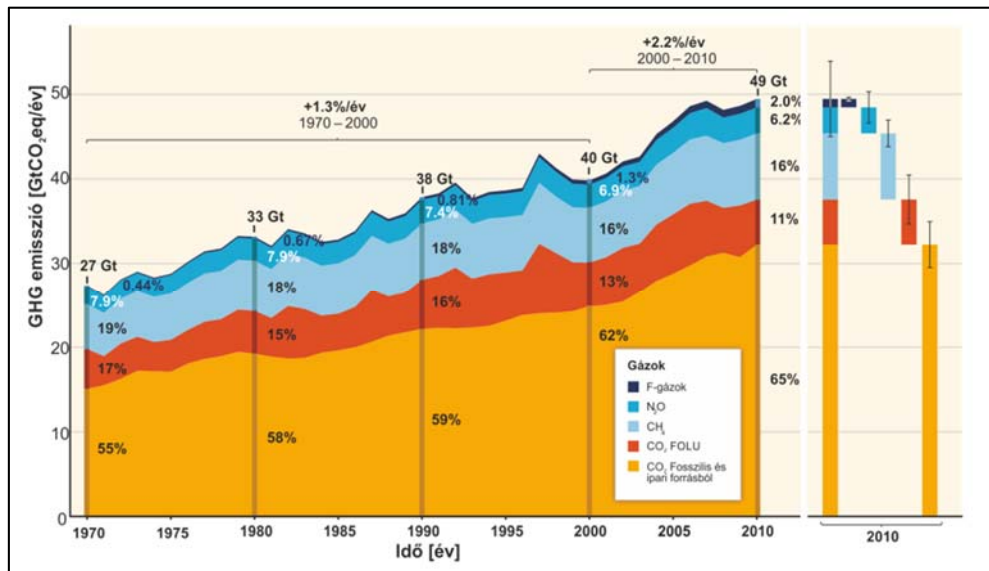
Források: ¹(T.F. STOCKER *et al.*, 2013); ²(DUNNE és HARTE, 2001); ³(FUGLESTVEDT *et al.*, 2003); ⁴(NAIK *et al.*, 2000)

² radiative forcing (RF)

³ greenhouse warming potential, (GWP)

Az ipari forradalom óta eltelt időben, közel 40%-kal nőtt a légköri CO₂ mennyisége (2.1. táblázat.). Tényként kezelhető, hogy az 1880-2012 közötti időszakban, a légkörben megnövekedett üvegházhatású gázkoncentráció növekedésével párhuzamosan a Föld felszínének átlaghőmérséklete 0,65-1,06 °C-kal emelkedett, amely minden kontinensen, valamint az óceánokban is hatással van a természeti és a humán rendszerekre (FIELD *et al.*, 2014; T. F. STOCKER *et al.*, 2013b).

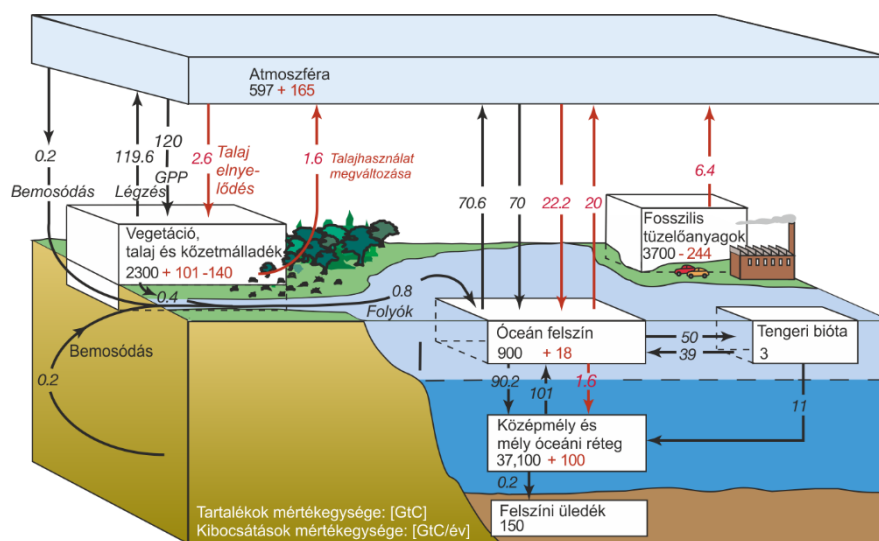
A 2010-es adatok alapján (2.3. ábra.), az antropogén kibocsátású üvegházhatású gázok közül a CO₂ 65%-ban járul hozzá a sugárzásos fűtés értékének megnövekedéséhez. (DUNNE és HARTE, 2001). Ezzel a legfontosabb antropogén üvegházhatású gáznak tekinthető.



2.3. ábra. Az antropogén üvegházhatású gázok éves kibocsátása 1970-2010 közötti időszakban [GtCO₂/év] ekvivalensben. Forrás: (EDENHOFER *et al.*, 2013b)

2.4. A CO₂ körfolyamat az ökoszisztémában

A természetes szárazföldi ökoszisztémákban a növények a fotoszintézis során a légkörből felvett CO₂ mennyiséget hasznosítják, majd a természetes talaj- és növény légzés során ezzel megközelítőleg megegyező mennyiséget juttatnak vissza a légköbe. Ennek a természetes CO₂ felvétel és kibocsátás folyamatának aránya határozza meg, hogy az adott ökoszisztéma szén megkötő vagy kibocsátó (REICH, 2010).



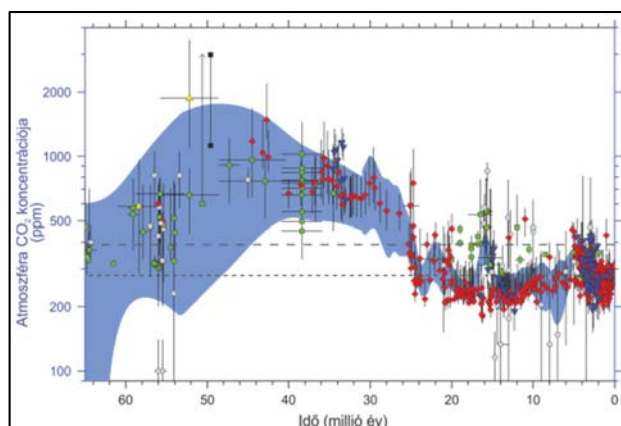
2.4. ábra. A globális szénkörfolyamat az 1990-es évek (feketével jelölve) és az iparosodás előtti időkben (piros színnel). Forrás: (SOLOMON *et al.*, 2007)

A Földi ökoszisztémában, a légkör, az óceánok és a szárazföldi rendszerekben (erdők, növényzet, talaj) raktározott szén mennyiségek között állandó, természetes körforgás (2.4. ábra). Az óceánok raktározzák a legnagyobb, a légkör pedig a legkisebb szén mennyiséget, azonban a légkör e tekintetben legfontosabb szerepe a másik két szén-raktár közötti anyagáramlás fenntartása. A szénraktárak közötti körforgás jellemző környezeti paraméterei: a tárolt szén mennyisége és az anyagáramlás mértéke (POST *et al.*, 1990).

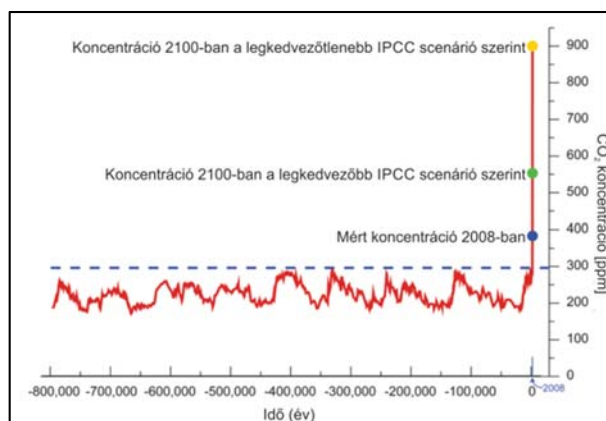
A szárazföldi rendszerek szén-anyagárama (GPP) BEER *et al.* (2010) kutatása szerint $120 \text{ Pg} \pm 8 \text{ Pg}$ éves viszonylatban. Ez a mennyiség szükséges ahhoz, hogy az ökoszisztémánk természetes légzési, és növekedési folyamatai egyensúlyban legyenek. A talajok globális CO_2 emissziója adja a globális szárazföldi szén-ciklus legnagyobb kibocsátását. Emiatt még a kisebb, az ezen kibocsátás nagyságrendjébe tartozó változtatások is jelentős hatással lehetnek a légkör CO_2 koncentrációjára. A talajok szén-körforgásának, és ezzel együtt CO_2 kibocsátásának pontos mennyisége a földi szén-ciklus egyik legnehezebben meghatározható eleme. A kibocsátás meghatározására számos módszer alapján történhet, amelyek alapvetően két csoportba sorolhatók. Az első megközelítés szerint a földhasználati változások mérlege alapján becsülik meg a talaj és a növényzet együttes kibocsátását és elnyelését. A másik megközelítés szerint a szárazföldi szén-körfolyamatban részt vevő egyes elemek kibocsátását vizsgálják és ezekből következtetnek a szénmérlegre (POST *et al.*, 1990). SCHLESINGER (1977) 75 PgC/év mértékűre becsülte a talajok CO_2 kibocsátását. Később RAICH és SCHLESINGER (1992) áttanulmányozva a fellelhető szakirodalmi adatokat és kutatási eredményeket ezt a korábbi becslést 68 PgC/év értékre módosította, majd RAICH és POTTER (1995) 77 PgC/év-re . A szakirodalomban megtalálható adatok alapján ma sincs teljes egyetértés a változók sokasága és bizonytalansága miatt. Ez főként annak is köszönhető, hogy a légkör CO_2 koncentrációjának változása jelentősen befolyásolja a talajok és a növényzet szén-körforgását (VAN VEEN *et al.*, 1991).

2.5. A légkör CO_2 koncentrációjának változása

Földtani mértékben visszatekintve, a Föld légkörének CO_2 koncentrációjára folyamatos fluktuáció volt jellemző, azonban a sarkkörti jégtakaró elemzése megmutatta (2.6. ábra.), hogy az utóbbi egymillió évben egyszer sem volt olyan magas a CO_2 koncentráció, mint napjainkban (PETIT *et al.*, 1999). MASSON-DELMOTTE és SCHULZ (2013) további, kőzetminták geológiai elemzése alapján meghatározott 63 millió éves visszatekintést is bemutat, mely alapján megállapítja, hogy bizonyítottan csak 23 millió évvel ezelőtt, a középső Miocén korban volt magasabb a légkör CO_2 koncentrációja, mint az iparosodás előtti időszakban (2.5. ábra.).



2.5. ábra. Az atmoszféra CO_2 koncentrációjának változása az elmúlt 65 millió évben
forrás: (MASSON-DELMOTTE és SCHULZ, 2013)

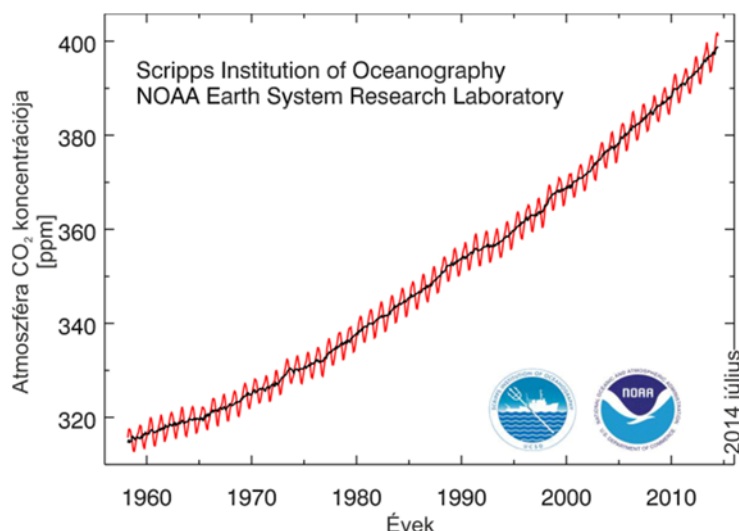


2.6. ábra. Az atmoszféra CO_2 koncentrációjának változása az elmúlt 800 000 évben
Forrás: <http://www.ncdc.noaa.gov/indicators/>

Az ipari forradalmat közvetlenül megelőző időszak légköri szén-dioxid koncentrációját 270 ppm-re becsülték. A mért adatok gyűjtése 1958-ban kezdődött a Csendes-óceáni Hawaii szigetén, a Mauna

Loa hegyen felállított obszervatóriumban, ahol a minimális vegetáció és a lakott területektől való nagy távolság biztosítja a megbízható, az atmoszféra átlagára jellemző mért értékeket (POST *et al.*, 1990).

Éves szinten a légkör CO₂ koncentrációja periodikus változásokat mutat. Ezek a változások összefüggésben vannak a napszakok és az évszakok változásával, valamint hőmérséklettel és a csapadékmennyiséggel. A periodikus változás középértékeinek tendenciája azonban folyamatosan növekszik. A mérések kezdete óta eltelt időszakban, a koncentráció mintegy 80 ppm értékkel emelkedett, 2013. májusában pedig elérte 401 ppm értéket (2.7. ábra).



2.7. ábra. Az atmoszféra CO₂ koncentrációja a Mauna Loa Obszervatórium mérései alapján

Forrás: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>

2.6. Globális és európai intézkedések

A globális probléma nemzetközi szinten történő felismerése és a hatásvizsgálatok elvégzésének szükségessége először a stockholmi ENSZ Konferencián került említésre. Az ezt követő éghajlati világkonferenciák eredményeként, a Rio de Janeiro-ban 1992-ben megrendezett ENSZ konferencián sikerült lefektetni azokat az alapelveket, amelyben az ENSZ tagállamok kinyilvánították, hogy cselekedni kell az éghajlatváltozás növekvő kockázata miatt. Az 1997-ben létrejött Kiotói Jegyzőkönyv már a kibocsátás szabályozását érintő kötelezettségeket is rögzített. A fejlődő országok ezt nem fogadták el, de több fejlett ország esetében ütközött nehézségekbe az egyezmény ratifikálása (JORDAN és O'RIORDAN, 2003; LÁNG *et al.*, 2007).

A Kyoto jegyzőkönyv B melléklete listázza országok szerint, hogy a bázisévhez képest, a 2008-2012 közötti időszakban hány százalékra kell visszaszorítaniuk az antropogén eredetű üvegházhatású gázok kibocsátását. Az első periódusban az Európai Unió 92%-os, majd a 2012 decemberében elfogadott Doha kiegészítésben, a 2013-2020 közötti második periódusra 80%-os csökkentésre kötelezte el magát, amely már minden EU tagországra egységesen érvényes, ideértve az akkor még nem csatlakozott Horvátországot is (UNITED NATIONS, 2012, 1998). Magyarország vállalása a Kyoto jegyzőkönyv szerint 94% volt, amely a '90-es években bekövetkezett gazdasági szerkezetváltás és recesszió révén, különösebb erőfeszítés nélkül teljesíthetőnek bizonyult. A Jegyzőkönyv többek között Magyarországot jelölte is a piacgazdasági átalakulás alatt lévő országok között (FODOR és PEINE, 2014).

A Kyoto jegyzőkönyv első mellékletben megjelölt, jelentősebb emisszióért felelős szektorok között az energia felhasználás, az ipari tevékenységek és a vegyipari termékek felhasználása mellett, a *negyedik legfontosabb kibocsátóként a mezőgazdasági tevékenységek felsorolása szerepel, ahol a talajok művelése külön kiemelésre került* (UNITED NATIONS, 1998).

A nemzetközi klímavédelmi erőfeszítések fokozását tekintve a világ államainak vezetői egyetértettek abban, hogy ha el akarjuk kerülni a visszafordíthatatlan globális környezeti változást kiváltó, 2 °C-ot

meghaladó átlagos felszíni hőmérséklet-emelkedést, az emberi tevékenységekből származó kibocsátásokat a felére kell csökkenteni századunk közepére. Ebben a tárgyalási folyamatban az EU - és így Magyarország is - azt képviseli, hogy a közös erőfeszítésekhez a fejlett államoknak 2020-ig megvalósítandó 30%-os kibocsátás csökkentéssel kellene hozzájárulniuk (BOZÓ *et al.*, 2010).

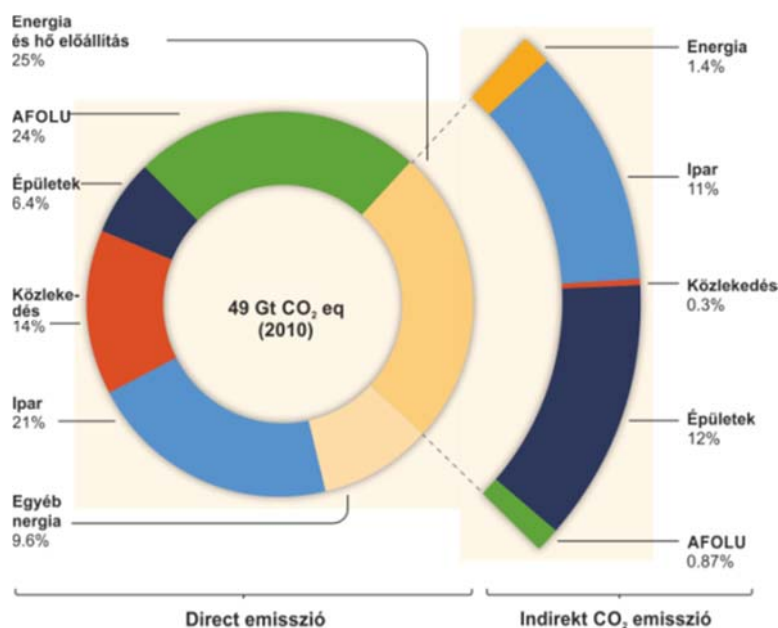
Az antropogén eredetű CO₂ kibocsátásának vizsgálata és a különböző kibocsátók pontos mennyiségének méréssel történő meghatározása a Kyoto jegyzőkönyv elfogadása után nőtt meg jelentősen. Napjainkban az antropogén kibocsátásért felelős iparágak minden területén folynak kutatások az antropogén eredetű CO₂ kibocsátásának felmérésére és csökkentési lehetőségeinek feltárására. Az elsődleges intézkedés a legnagyobb kibocsátást adó források megszüntetése, vagy a kibocsátás mérséklése. A jelenlegi technológiai szinten számos lehetőség adott az ipari CO₂ kibocsátók számára a CO₂ emisszió csökkentésére, és a koncentrált, léghőkörtől izolált raktározására. Ezek alkalmazása jelentős költségekkel jár, de így lehetőség nyílik a koncentrált kibocsátás mérséklésére, amely elsődleges fontosságú az antropogén eredetű CO₂ emisszió csökkentésében (METZ *et al.*, 2005). Emellett számos kutatás folyik a légkör CO₂ tartalmának közvetlen csökkentésére a szén-dioxid közvetlen kitermelésére és átalakítására (FIGUEROA *et al.*, 2008; HOLMES és KEITH, 2012; RANJAN és HERZOG, 2011). Ennek a technológiának a létjogosultsága is megkérdőjelezhetetlen, mivel általa a szén-klíma technológiai eszköztárának egyik fontos hiányossága pótolható (KEITH *et al.*, 2010).

Az alacsony karbon-kibocsátású gazdaság (low-carbon economy) koncepciója jelentős pénzügyi erőforrásokat igényel, amelyhez kereskedelmi változások is szükségesek. Megjelent a karbonkereskedelem fogalma, amelynek koncepciója az, hogy megteremtik a környezeti javak piacát, ahol a kereskedés tárgya a 'kibocsátáshoz való jog' (FODOR és PEINE, 2014). Az EU Emissziós Kereskedelmi rendszerének (EU ETS) elindulásakor terv szerint 12000 európai ipartelephez egy-egy karbon kvótát/korlátozást rendelnek. A döntéshozók ettől a szabályozástól egy új, klímavédelemhez kapcsolódó banki pénzügyi szolgáltatások elindulását várják, amely költséghatékonyan tudja optimalizálni az emissziós kvóták használatát. A nemzetközi karbonpiacon folyó emissziókereskedelem, amelynek termékei kiterjednek mind az EU kötelező ETS piacára, mind az önkéntes piacokra, rendkívüli lehetőségeket kínálnak a klímapolitikai stratégiák költséghatékonyra tételére, a befektetett pénzügyi eszközök megtérülésének felgyorsítására. Az elsődleges források mellett jelentős potenciál mutatkozik a növénytermesztés területén is. *A különböző innovatív talajművelési módszerek (no-tillage, gyepesítés stb.) segítségével csökkenthető a talaj GHG kibocsátása, vagy másképpen növelhető az GHG megkötő képessége* (FOGARASSY és LUKÁCS, 2009).

2.7. CO₂ kibocsátás talajhasználati vonatkozásai

Az üvegházhatás éves növekedését előidéző gázok mintegy 20 %-a származik a mezőgazdaságból, összességében az antropogén eredetű metán 50-75 %-a és a szén-dioxid 5 %-a. Az erdőirtások, a biomassza elégetése és a földhasználatban előidézett egyéb változások további 14 %-ot tesznek ki (COLE, 1996; Pete SMITH *et al.*, 1997).

Az IPCC 2013-as jelentése nem emeli ki külön az intenzív talajművelésből adódó kibocsátást az összes antropogén eredetű CO₂ kibocsátásból (2.8. ábra.). Együtt kezeli a mezőgazdasági és erdészeti tevékenységek (AFOLU) egészét, amely alapján a globális antropogén üvegházhatású gáz kibocsátás az AFOLU tevékenységekből 10–12 GtCO₂eq/év, amely a teljes kibocsátás 24%-a (T.F. STOCKER *et al.*, 2013). Ennek a mennyiségnek a nagy részét a CO₂ kibocsátás adja, amely 4,8-6,2 GtCO₂eq/év. Ezért is fontos, hogy ez a szektor is kiemelt szerepet kell, hogy kapjon az elkövetkező időszakban (EDENHOFER *et al.*, 2013a). A mezőgazdasági szektor részletes kibocsátási értékei a FAOSTAT adatbázisban elérhetőek, de ez becslést sem ad a talajművelésből adódó kibocsátás mértékére. Ennek oka, hogy irodalmi adatok ritkán fellelhetők és pontosságuk is kérdéses (TUBIELLO *et al.*, 2013).



2.8. ábra. Az antropogén GHG kibocsátás szektoronként 2010-es adatok alapján.

Forrás: (EDENHOFER *et al.*, 2013a)

A földhasználatból adódó üvegházhatású gázokra vonatkozó kibocsátási adatok meghatározása nagyon nehézkes. A talaj részvétele a természetes szén-körfolyamatokban, és az antropogén hatások nehezen elkülöníthetők. Ezért a globális kibocsátás pontos modellezéséhez olyan mennyiségű változó meghatározására, és kezelésére lenne szükség, amely jelenlegi ismereteink szerint kivitelezhetetlen. A publikált kutatások összevetése nem csak a számított és becsült értékek nagymértékű szórását állapította meg, hanem megmutatta, hogy ezek sok esetben a földhasználat pontos elemzésére nem fordítottak figyelmet, vagy csak a domináns eljárásokat vették figyelembe. Ezért *földhasználat tekintetében inkább a művelési eljárások megváltoztatásából adódó potenciálra, a légkörbe jutó üvegházhatású gázok talajhasználatból adódó megtakarítására érdemes figyelmet fordítani*, amely mérhető módon ad értékelhető információt (HOUGHTON *et al.*, 2012; POST *et al.*, 1990). Az alkalmazott *talajművelési eljárás függvényében a talajok forrásai és elnyelői is lehetnek a légköri üvegházhatású gázoknak* (LAL és KIMBLE, 1997; PAUSTIAN *et al.*, 1997; WEST és POST, 2002).

A gyakori bolygatás a szervesanyag veszteségeket, egyúttal pedig a talaj szén-dioxid kibocsátását növelve járul hozzá az emberiség létét veszélyeztető globális felmelegedéshez (BIRKÁS, 2001). A világ művelésre alkalmas talajainak mennyisége 4961 MHa-ra tehető, ebből 1216 MHa azon leromlott minőségű talajok mennyisége, amelyek intenzív művelés hatására elvesztették szerves-szén készletük jelentős részét, de a megfelelő talajvédő művelési eljárások használatával alkalmasak ennek a folyamatnak a visszafordítására. Ezek a talajok, potenciálisan alkalmasak jelentős mennyiségű szerves-szén és nitrogén megkötésére. (COLE *et al.*, 1997; LAL, 2004; OENEMA *et al.*, 2001; PAUSTIAN *et al.*, 1997). Az USA-ban a talajvédő művelési eljárások bevezetése, becslések szerint 1,4 Gt szénrel növelte az elmúlt 30 évben a talajok szervesanyag tartalmát (COLE, 1996). A szénkészlet talajban történő felhalmozásának előnyeit valamelyest csökkenti, hogy a termésmennyiségek csökkenésének elkerülésére, ezen művelési eljárások, fosszilis energiahordozók felhasználásával készült növényvédőszeres és műtrágyák nagy mennyiségű felhasználását igényelték, amelynek negatív hatásait is mérlegelni kell a karbon-egyenleg kiszámításakor (SCHLESINGER, 2000, 1999; SOLOMON *et al.*, 2007). Ennek megfelelően a talajhasználati módszerek értékelésre olyan modellek is készültek, amelyek a talaj szénmérlegének változására alapozva, a művelés hatásait, a talajszerkezetet, valamint a műtrágya-, üzemanyag- és vegyszerhasználat direkt és indirekt hatásait is figyelembe vették (LUO *et al.*, 2011; POPP *et al.*, 2011).

Az európai klímapolitikában is szükséges azon lehetőség a vizsgálata, hogy mennyi terület vonható

ki az intenzív művelés alól, és állítható át csökkentett kibocsátású művelési rendszerekre (SMITH *et al.*, 2000). Európai kutatások alapján készített becslés szerint, amennyiben a teljes európai mezőgazdaság művelés nélküli talajművelési technológiára állna át, azzal körülbelül 23 Tg C takarítható meg évente az Európai Unióban és Európa teljes területén (ideértve a Oroszország európai területeit is) pedig 43 Tg, amely Európára nézve 4,1%-os, globális mértékben pedig 0,8 %-os antropogén eredetű CO₂ kibocsátás csökkentést jelentene. Ez mennyiség felveti a közös európai irányelvek elfogadását a talaj műveléséből adódó CO₂ kibocsátás csökkentésének érdekében, hogy a talajművelés nagyobb szerepet kapjon a Kyoto jegyzőkönyvben vállalt kötelezettségek teljesítésében az európai klímapolitikában (SMITH *et al.*, 1998).

2.8. A talajművelési rendszerekkel összefüggő CO₂ kibocsátás

A talajművelési rendszer egy meghatározott területen egy vagy több növény sikeres gazdaságos termesztéséhez szükséges talajművelési eljárások összessége (BIRKÁS, 1993). A művelési rendszerek csoportosítása általában a növények vetésideje, a talajtípusok és a különleges feladatok valamint a szerzők által kidolgozott módszerek szerint történik. A szántóföldi növények talajművelési rendszerei az idők során folyamatosan változtak és fejlődtek. A talajművelő gépek üzemeltetését végző traktorok teljesítményének növekedése lehetővé tette a nagy energia igényű szántás széleskörű elterjedését vagyis a szántásos (forgatásos) talajművelő rendszer (Conventional Tillage) kialakulását (LAL *et al.*, 2007). A szántás kedvezőtlen agrotechnikai hatásai (GYURICZA *et al.*, 2007) és energetikai hiányosságai (HUDOBA *et al.*, 2010) a XX. század közepén új, energiatakarékos rendszerek kifejlesztését igényelték. A művelet összevonásos-, elhagyásos törekvések vezettek a szántást időszakosan vagy teljesen elhagyó minimális művelési rendszerek (Minimum Tillage) létrejöttéhez (JÓRI, 2013). A mezőgazdaság iparosodása, az iparszerű termelési rendszerek alkalmazása egyúttal a terméseredmények maximalizálását is magával hozta, amelynek káros következményeként a növekvő közvetlen (üzemanyag) és közvetett (műtrágya, növényvédőszer) energia bevitel környezetterhelő hatásai is megjelentek (ÁNGYÁN és MENYHÉRT, 1997).

A termőtalaj pusztulásának megakadályozása a környezeti terhelések csökkentése céljából a múlt század második felében egy új fogalommal a fenntartható fejlődés fogalmával találkozhattunk. Azokat nevezzük fenntartható mezőgazdasági-élelmiszeripari rendszereknek, amelyek gazdaságosak, kielégítik a társadalom korszerű táplálkozásával kapcsolatos igényeit és megőrzik a környezet minőségét, a világ természeti erőforrásait a jövő generációk számára (ÁNGYÁN, 2003). A talaj védelme a fizikai és kémiai degradáció megakadályozása, a természetes termékenység, szerkezet és biológiai állapot javítása és kímélése a környezet minőségének és a gazdálkodás színvonalának fenntartása érdekében (BIRKÁS, 2006). A fenntartható fejlődés követelményeit kielégítő talajművelési rendszereket nevezzük talajvédő-és környezetkímélőnek (Conservation Tillage).

A talajvédő művelési rendszerek kialakulását elsősorban az intenzív művelés okozta szél- és vízeróziós károk csökkentése, és a hagyományos ekével végzett, forgatásos művelés terméshozama közötti optimum keresése alapozta meg (LAL *et al.*, 2007). Az 1990-es évekig ezeket a művelési eljárásokat elsősorban az eróziós hatásoknak kitett területeken használták. A globális klímaváltozás felismerése után kerültek ezek a művelési rendszerek újra előtérbe, mivel a talaj ekével történő rendszeres forgatása a szántóföldek szén-dioxid emisszióját nagymértékben megnöveli (LAL, 1997; REICOSKY, 1998a). Az intenzív művelés, a talaj levegőztetése, a növényi maradványok bekeverése és az aggregátumok aprítása által, a mikrobiológiai aktivitásnak kedvező feltételeket teremtve, fokozza a szerves anyagok lebomlását (PHILLIPS és PHILLIPS, 1984). Így a szerves anyag fokozott mineralizációja révén felszabaduló szén-dioxid könnyen a légkörbe távozik (COLE, 1996). MANN (2004) 625 talajminta vizsgálata alapján kimutatta, hogy a talajok művelésének hatására 30 cm mélységben, akár 20% C tartalom elvesztésével járhat. CAMPBELL és SOUSTER (1982) ennél jóval nagyobb értékekről is beszámolt. Vizsgálatuk megállapította, hogy a C tartalom csökkenés mellett a N csökkenés is ilyen nagyságrendű, de ez a művelés intenzitása mellett nagymértékben függ a talaj típusától is. A talajművelési eljárások eszköztárában számos lehetőség adódik a művelésből adódó szén-dioxid és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére (SMITH *et al.*, 1998). A

talajvédő technológiák (forgatás nélküli eljárások, direktvetés, stb.) alkalmazása révén a talaj humusztartalma évente 1 tonnával is növekedhet hektáronként (ARRUE, 1997; PAUSTIAN *et al.*, 1998), ezzel együtt csökkenteni lehet a talajból a légkörbe kerülő széndioxid mennyiségét is (LAL, 1997; REICOSKY, 1998a).

A talajművelési rendszerek közvetlen hatását a talaj üvegházhatású gáz kibocsátására és a szénmegkötő képességére számtalan kutatás vizsgálja (BIRKÁS, 2009; JÓRI *et al.*, 2004; LAL *et al.*, 1998a; SERRANO, 2008; P. SMITH *et al.*, 1997; SMITH *et al.*, 1998). Az 1980-as évektől kezdődően, főként az Egyesült Államokban tekintélyes mennyiségű kutatási információ gyűlt össze a művelt talajok CO₂ kibocsátásának csökkentésére (LAL *et al.*, 1998a, 1998b, 1995a, 1995b). Európában a 2000-es évekig viszonylag kevés konkrét kutatási eredmény jelent meg, annak ellenére, hogy az Európai Unió az European Conservation Agriculture Federation (ECAAF) ajánlására a talajvédő földhasználat öt fő előnye között említi a szén-dioxid emisszió csökkenését és a globális felmelegedéshez való pozitív hozzájárulását (TORRES, 1999). Magyarországon a 2000-es évek elején indult be több egyetem és kutatóintézet együttműködése keretében az a vizsgálat, amely a különböző talajművelési eljárások, rendszerek szén-dioxid kibocsátásra gyakorolt hatását kívánta feltárni. A kutatási program a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, az FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézete, valamint a Szent István Egyetem kutatóinak közreműködésével kezdődött meg (JÓRI *et al.*, 2004). Később több hazai kutatóintézetben is indultak kutatások a témában. A hazai vizsgálatok legújabb eredményeit TÓTH *et al.* (2011) foglalta össze.

A talajbolygatás mértéke és a CO₂ kibocsátás közötti összefüggéseket még nem sikerült teljesen feltárni (ELLERT és JANZEN, 1999). Ugyanis a CO₂ kibocsátásának mértékét gyakran a legintenzívebb művelésnek tekintett hagyományos, ekével végzett és a művelés nélküli rendszerek összehasonlításával végzik, amelyek a szélsőértékek meghatározását vetítik előre. Az eredményekben erős ellentmondások tapasztalhatók. Egyes kutatások a két művelési eljárás esetén hasonló mértékű CO₂ kibocsátást mértek (ASLAM *et al.*, 2000; FORTIN *et al.*, 1996), de éves viszonylatban beszámoltak már a művelés nélküli terület magasabb CO₂ kibocsátásáról is (HENDRIX *et al.*, 1988). Mások a művelés nélküli területeken a CO₂ kibocsátás periodikus változását mutatták ki, amely periódusonként magasabb, vagy alacsonyabb volt a szántott területeken mérthez képest (BALL *et al.*, 1999; VINTEN *et al.*, 2002), vagy az év 41%-ában a nem találtak szignifikáns különbséget a hagyományos és a művelés nélküli rendszerek kibocsátása között (OORTS *et al.*, 2007). Egységesek azonban az álláspontok a művelést követő időszakban, a talajbolygatás hatására a szántott területek kibocsátása jelentősen meghaladja a műveletlen területekét (ALVAREZ *et al.*, 2001; DAO, 1998; HENDRIX *et al.*, 1988; JÓRI, 2004; KESSAVALOU *et al.*, 1998; RÁDICS és JÓRI, 2012; REICOSKY és LINDSTROM, 1993).

A művelés utáni intenzív kibocsátás, különböző talajművelő gépekkel végzett, összehasonlító vizsgálatát számos kutatás mutatja be. REICOSKY (1998b) különböző sávos művelő eszközök után vizsgálta a talaj CO₂ kibocsátását és megállapította, hogy a szántott terület kibocsátása a legmagasabb, míg a műveletlen területé a legalacsonyabb, a különböző sávos művelési eljárások a művelés intenzitásának sorrendjében a két szélsőérték között helyezkednek el. Kutatása alapján, közel lineáris összefüggést állapított meg a kumulált CO₂ mennyiségek és az átművelt talajkeresztmetszet között. JÓRI *et al.* (2006) szántott, tárcsázott területek művelés utáni kibocsátását vetették össze a műveletlen terület kibocsátásával. A művelés utáni 30 órában a szántott terület kibocsátása 42%-kal volt magasabb, míg a tárcsázott területnek 27%-kal volt alacsonyabb a CO₂ kibocsátása, mint a műveletlen területé.

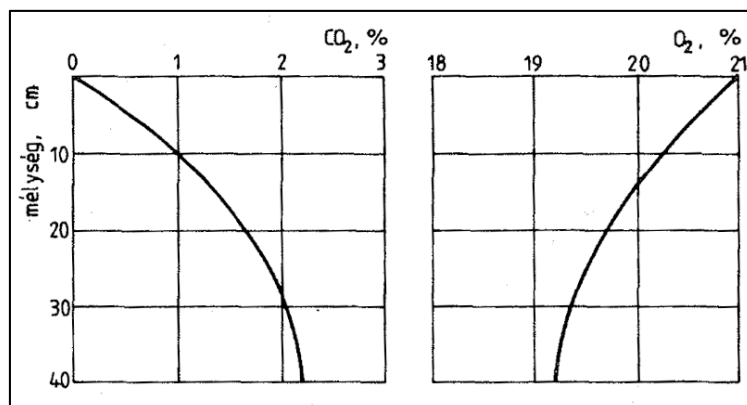
A talaj műveléséből adódó bolygatása rövid távon jelentősen megnöveli ugyan a talaj CO₂ kibocsátását, azonban szárazabb éghajlaton vagy kevésbé intenzív művelés esetén, a kibocsátási értékek már néhány nap elteltével visszatérhetnek a művelés előtt mérthez közeli értékre (ELLERT és JANZEN, 1999; ROCHETTE *et al.*, 1997). Homokos anyagtalajon, nedves körülmények között, a művelés után 19 nappal (REICOSKY és LINDSTROM, 1993) és egy hónappal (HENDRIX *et al.*, 1988) is megfigyelték, hogy a műveletlen területhez képest, a művelt területek kibocsátása

intenzívebb. Hasonló megfigyeléseket tettek szubtrópusi klímában is (LASCALA *et al.*, 2006). Az eddigi kutatások alapján, a kezdeti kibocsátás a művelés intenzitásával és a művelt terület felületének egyenetlenségével van összefüggésben. A kezdeti kibocsátás intenzitása elsősorban a művelés mélységétől függ (REICOSKY és LINDSTROM, 1993), de a kibocsátott CO₂ mennyiségében jelentős területi eltérések tapasztalhatók (LASCALA *et al.*, 2000; REICOSKY, 1995).

A talajművelési eljárások közötti különbségekre nem lehet kizárólag a művelés utáni rövidtávú kibocsátás alapján következtetni. Együtt kell figyelembe venni a művelések utáni és a művelés nélküli időszak kibocsátását. A művelés utáni kibocsátás a talajbolygatás eredménye, a művelések közötti kibocsátást pedig a talaj fizikai, kémiai és biológiai változásai eredményezik (OORTS *et al.*, 2007). A szakirodalomban csak kevés olyan tanulmány található, ahol a művelés utáni közvetlen kibocsátás mellett, vizsgálták a talajművelési rendszerek hosszú távú kibocsátását is (HENDRIX *et al.*, 1988; KESSAVALOU *et al.*, 1998; OORTS *et al.*, 2007), vagy hosszú távon a művelési rendszerek teljes kibocsátását vizsgálták a művelések közötti időszakokban (FRANZLUEBBERS *et al.*, 1995a, 1995b). *A művelési rendszerek hosszú távú CO₂ kibocsátásának összehasonlításában a mai napig nincs egyetértés, de határozottan szükség van a különböző művelési eljárások CO₂ kibocsátásra gyakorolt hatásainak további vizsgálatára* (REICOSKY, 2002).

2.9. A talajok természetes CO₂ kibocsátása

A talaj pórussterének a nedvesség által el nem foglalt részét levegő tölti ki. A talaj levegőtartalma állandóan változik. Átnedvesedéskor a pórusok egy részéből a víz kiszorítja a levegőt, a száradó talajban pedig fokozatosan nő a gázfázis térfogata (STEFANOVITS *et al.*, 1999). A talajok felső rétegében nagy jelentősége van a levegőztetésnek. A növények gyökérzetének oxigénre van szüksége és a légzés terméke a szén-dioxid. SITKEI (1997) szerint a szabad pórus hányad csökkenésekor a széndioxid koncentráció növekszik, míg az oxigénkoncentráció csökken a talajban (2.9. ábra.).



2.9. ábra. A szén-dioxid és az oxigén eloszlása a talaj felső rétegében.

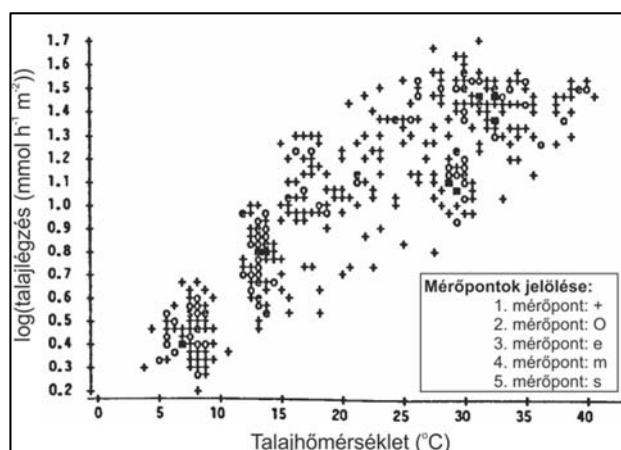
A szabad pórushányad 0,2 és $S = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$

Forrás: (SITKEI, 1997)

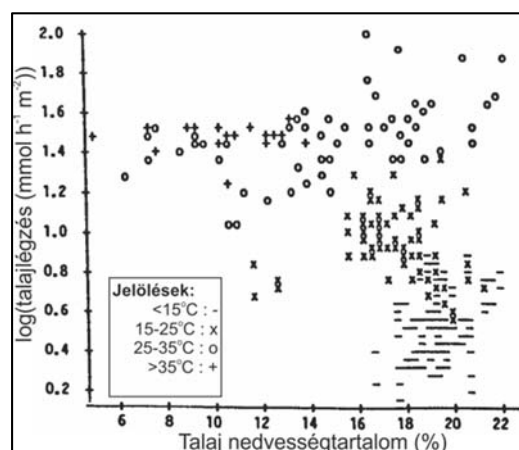
A talaj CO₂ és O₂ tartalom közti különbségek a talaj légjárhatóságától, biológiai tevékenységétől, a növények gyökereinek aktivitásától függően alakulnak ki. Molekuláris oxigén a talajlevegőbe kizárólag a légkörből jut be. A két rendszer közötti gázcseré azonban nagyon lassú, ezért egy idő múlva az oxigén tartalom kisebb, a CO₂ tartalom pedig nagyobb lesz a talajban, mint a külső légtérben (STEFANOVITS *et al.*, 1999). Ha a talajlevegő CO₂-tartalma 5%-nál nagyobb, illetve O₂ tartalma 10%-nál alacsonyabb, zavarok keletkeznek a természetett növények anyagcsere folyamataiban (BIRKÁS, 2006).

A talajlégzés jellemzi a talajban végbemenő összes anyagcsere-folyamatot, amelynek végterméke a CO₂. A talajlégzés során keletkező CO₂-t, a növények gyökérzetének légzése, a szerves anyagok lebontása során, a talajban található mikroorganizmusok tevékenysége, a fauna légzése, valamint néhány nem-biológiai folyamat, mint például a kémiai oxidáció eredményezi. A talajlégzés mértéke főként hőmérséklet és a nedvességtartalom függvényében változik a szervesanyag mennyisége és a

tápanyagtartalom függvényében (HORWATH, 2007; SINGH és GUPTA, 1977). A talajok természetes velejárói, mint például a talajtextúra, a hőmérséklet, pH nem, vagy csak kisebb mértékben megváltoztathatók, de például az öntözés, a tápanyag visszapótlás és főként az alkalmazott művelési eljárás a talajban található aerob mikrobák tevékenységének befolyásolásával jelentős hatással vannak a talajok CO₂ kibocsátására (HORWATH, 2007; RASTOGI *et al.*, 2002). Számos kutatás irányul a talajlégzés során keletkező CO₂ mennyiségét meghatározó tényezők pontosítására (BUNNELL *et al.*, 1977a, 1977b; KIRSCHBAUM, 1995; LIU *et al.*, 2010; O'CONNELL, 1990; WILDUNG *et al.*, 1975), valamint a korábbi elméletek szélesebb körű igazolására. (NAGANAWA *et al.*, 1989) szántóföldi vizsgálatok során talált összefüggést a talajhőmérséklet és a CO₂ kibocsátás között. A talaj nedvességtartalom változásának vizsgálata viszont nem mutatott korrelációt.



2.10. ábra. A CO₂ kibocsátás a talajhőmérséklet függvényében öt mérőponton végzett mérések alapján. Forrás: (NAGANAWA *et al.*, 1989)



2.11. ábra. A CO₂ kibocsátás a talaj nedvességtartalma és a talajhőmérséklet függvényében. Forrás: (NAGANAWA *et al.*, 1989)

RAICH és SCHLESINGER (1992) irodalmi adatokra támaszkodva vizsgálták a talajlégzés globális változását. A modell az éves hőmérséklet és csapadékmennyiség változása alapján követi le az éves CO₂ kibocsátás globális trendjeit. Megállapításuk megerősíti a korábbi elméleteket, miszerint a talajlégzést főként a hőmérséklet változása befolyásolja. AGREN *et al.* (1991) erdő- és legelő talajok modelljeit tekintették át és megállapították, hogy a mikrobiális aktivitás 0-10°C között minimális, 10-30°C között növekszik, míg 30°C felett, elérve maximumát, csökkenni kezd. KICKLIGHTER *et al.* (1994) erdőtalajok CO₂ kibocsátásának tényezőit vizsgálták a hőmérsékletváltozás függvényében. Kimutatták, hogy a levegőhőmérséklet használata a talajlégzést leíró modellek jelentősen alulbecsülik a talaj CO₂ kibocsátását, ezért kalibrált modelljükben a talajhőmérséklettel határozták meg a kibocsátás pontos mennyiségét. Így a kibocsátás meghatározása független a talajon lévő (esetükben erdő) növénykultúrától. GEHRIG-FASEL *et al.* (2008) a talajhőmérséklet számítására egy levegő-talaj átviteli modellt fejlesztettek ki, amellyel elhagyhatók az időigényes talajhőmérséklet mérések.

A talajban keletkező CO₂ kibocsátását sok tényező befolyásolja. A gázok és gőzök konvekció és diffúzió útján mozognak a talajban. Konvekciót a víztartalom változása és a talajfelület mentén keletkező nyomásváltozások hoznak létre. A talaj felső rétegének hőmérséklet-változása szintén konvektív légmozgást okoz. Az esetek többségében azonban a fő mozgásforma a molekuláris diffúzió (FANG és MONCRIEFF, 1999; SITKEI, 1997). A gáznemű összetevők diffúzióját és tömegáramát alapvetően a talaj szemcseösszetétele, szerkezete (pórusméret eloszlás, pórusrendszer geometriai jellemzői) és nedvességtartalma szabja meg (STEFANOVITS *et al.*, 1999). A molekuláris diffúziót a légkör és a talaj közötti koncentráció-gradiens működteti. A tömegáramot alapvetően az atmoszféra nyomásfluktuációi határozzák meg (KIMBALL és LEMON, 1971; MASSMAN *et al.*, 1997; TAKLE *et al.*, 2004). A talajok pórustérfogata ideiglenes CO₂ tárolóként működik, amely miatt a környezeti hatások (eső, szél) függvényében viszonylag gyorsan változhat meg a talaj CO₂ kibocsátása

(FLECHARD *et al.*, 2007; MAIER *et al.*, 2010).

A talajmenti nyomásváltozásokat főként a szél okozza, amelynek turbulenciájáért a domborzat és a talajközeli akadályok is hozzájárulnak (BALDOCCHI és MEYERS, 1991; TAKLE *et al.*, 2004). Nagyobb szélesség esetén bizonyítottan magasabb a talaj CO₂ kibocsátása. SCHWARTZKOPF (1978) méréseket végzett a szélesség és a CO₂ kibocsátás összefüggésének feltárására. Számos függvényt illesztett a mért adatokra és megállapította, hogy a CO₂ kibocsátás és a légsebesség kapcsolatának leírására a (2.2) összefüggés alkalmas:

$$y = a(x + 1)^b, \quad (2.2)$$

ahol:

y - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2 \cdot h} \right]$,

x - légsebesség $\left[\frac{cm}{s} \right]$,

a - 0,077 [-],

b - 0.878 [-].

A légsebesség mellett a csapadéknak is jelentős hatása van a kibocsátásra. A szárazabb nyári időszakokban a csapadék talajnedvesség növelő hatása stimulálhatja a biológiai aktivitást és így az intenzívebb CO₂ termelés miatt a kibocsátás is megnő (BORKEN *et al.*, 2003; MAIER *et al.*, 2011), míg intenzívebb csapadék ideiglenesen elzárhatja a felső talajréteg pórusait és csökkentheti a CO₂ kibocsátás mértékét (FLECHARD *et al.*, 2007; JASSAL *et al.*, 2004; MAIER *et al.*, 2011, 2010).

2.10. A talajlégzés vizsgálata

A talajlégzés vizsgálatának fontosságát irodalmi adatokra hivatkozva LELLEI-KOVÁCS (2008) a következő négy pontban foglalta össze:

- A talajlégzés intenzitásának értékei szükségesek a globális klímaváltozás-modellek kialakításához, és ezzel kapcsolatos predikciók megtételéhez.
- A talajok CO₂ kibocsátási intenzitása alapját képezi (főleg mezőgazdasági) talajok minősítésének, és hozzájárul talajszennyezések következményeinek becsléséhez.
- A talajlégzésen keresztül a talajban zajló folyamatok meghatározó tényezőknek a vizsgálata, pl. a talajhőmérséklet, a talajnedvesség a talaj tápanyagtartalma, valamint a külső CO₂ koncentráció hatása.
- A talajlégzés vizsgálati, mérési módszertanának a kidolgozása, módszerek összehasonlítása, megbízhatóságuk elemzése.

A talajlégzésből adódó CO₂ kibocsátás vizsgálatára elméleti megközelítések (FANG és MONCRIEFF, 1999; JASSAL *et al.*, 2004) valamint laboratóriumi és „*in situ*” vizsgálatok is rendelkezésre állnak (ANDERSON, 1982; DORAN és JONES, 1996; PARKIN, 1996). A különböző vizsgálati metódusokat, a korszerű technikákat sem nélkülözve, FARKAS *et al.* (2011) foglalta össze. A talajlégzés modellezésének és mérésének nehézségét talaj komplex természete adja, mivel a talajt különböző típusú organo-minerális részecskék és aggregátumok alkotják, miközben számtalan különböző fiziológiai jellemzővel rendelkező organizmust tartalmaz. A talajtulajdonságok változását térbeli, időbeli, horizontális és vertikális eltérések jellemzik (DAVIDSON és TRUMBORE, 1995). A szántóföldi vizsgálatok alapvető célja a kibocsátás természetes körülmények között történő vizsgálata. Így az altalajban lévő biomassza aktivitása, a klíma fizikai és kémiai tulajdonságainak hatása és a művelés hatása együttesen vizsgálható. A laboratóriumi vizsgálatok pontosan kontrollálható körülményeket biztosítanak, így a modellalkotáshoz szükséges pontos hatáselemzések elvégzésére és a szántóföldi módszerek validálására is alkalmasak (ANDERSON, 1982).

2.10.1. Szántóföldi (in situ) vizsgálatok

Mérőkamrás módszerek

A talaj CO₂ kibocsátásának szántóföldi körülmények között történő vizsgálatára számos lehetőség adódik. A leggyakrabban használt eljárások a kamrás módszerek. Ezek alapelve szinte minden esetben megegyezik: a vizsgált talajfelszín meghatározott területét egy kamrával fedik le, amely izolálja a mintavételi területet a környezeti levegőtől, így a talajból távozó CO₂ mennyisége a kamra CO₂ koncentráció változása alapján meghatározható (SINGH és GUPTA, 1977). A kamrás módszerek a koncentráció mérési alapelvek, kamratérfogat izolációja és a mintavétel folytonossága alapján csoportosíthatók, amelyek számtalan kombinációja használatos.

A kamratérfogat CO₂ koncentrációjának mérése a következő alapelvek szerint végezhető:

- Dúsításos eljárás: az izolációs kamrát meghatározott időre a talajfelszínre helyezik, majd időközönként, vagy adott inkubációs idő leteltével gáz-analizátoros mérőegységgel vizsgálják a kamra CO₂ koncentrációjának növekedését.
- Légáramoltatásos eljárás: a talajfelszínre helyezett mérőkamrán környezeti levegőt áramoltatnak át, majd a belépő és a kilépő levegő CO₂ koncentrációjának különbségét vizsgálják gáz-analizátorral, vagy (főként laboratóriumi körülmények között) alkáli abszorbensben történő elnyeletéssel is. Ebben az esetben általában CO₂ mentes, vagy pontosan ismert koncentrációjú levegőt áramoltatnak a kamrán keresztül.
- Abszorpciós eljárás: az izolált kamrában alkáli abszorbens oldatot helyeznek el, amely elnyeli a kamralevegő CO₂ tartalmát. Az abszorbens tömegnövekedése alapján a CO₂ kibocsátás számítható (DORAN és JONES, 1996; LIVINGSTON és HUTCHINSON, 1995; SINGH és GUPTA, 1977).

A dúsításos eljárás esetében, külső mérőegységgel, a kamrából injekciós fecskendő segítségével vett levegőminták elemzésével is vizsgálható a kamra CO₂ koncentrációja, amennyiben a mintavétel nem, vagy csak elenyésző mértékben változtatja meg a kamra nyomását (CRILL, 1991; PARKIN és VENTEREA, 2010), vagy a mintavétel során az eltávolított levegő mennyiség visszatöltésre kerül (PARKINSON, 1981).

A szakirodalom megkülönbözteti a statikus mérési eljárást, amikor a koncentrációmérés a kamra belsejében, valamint a dinamikus mérési eljárást, amely a kamrán kívül elhelyezett mérőegységgel történik. Utóbbi esetben egy csőrendszeren keresztül átáramoltatják a kamra levegőjét a mérőegységem keresztül. Dúsításos mérési eljárás esetén, a mérőegységen áthaladt levegőt visszavezetik a kamrába, légáramoltatásos eljárás esetében a környezetbe kerül kivezetésre. A dinamikus jelző a levegő mozgása miatt keletkező nyomásváltozások dinamikájára utal, amely hatással lehet a természetes CO₂ kibocsátásra.

A szántóföldi mérésre alkalmazható mérési módszerek a kamra és a környezeti levegő izolációja alapján a szakirodalom a következők szerint csoportosíthatók:

- Zárt kamrás mérési eljárások: a kamrafal izolálja a kamra levegőjét a környezeti levegőtől. A mérés az inkubációs idő alatt folyamatosan (kumulatív mérés), vagy pedig annak végén történik (kamraszellőztetési mérés). Zárt kamrák esetében a mérés dúsításos vagy abszorpciós eljárással történhet.
- Nyitott kamrás mérési eljárások: a kamrafal nem izolálja a környezettől a kamratérfogatot, hanem a levegő megvezetését, az azon folyamatosan bejutatott környezeti- és a kiáramló CO₂-vel kevert levegő izolációjára szolgál. A mérés légáramoltatásos alapelvekkel történik (JANSSENS *et al.*, 2000; PUMPANEN *et al.*, 2004; TAKLE *et al.*, 2004).

A zárt kamrás mérési eljárások esetében a koncentrációváltozás, az inkubációs idő, a kamratérfogat és a mintavétel felülete alapján a (2.3) egyenlettel határozható meg a CO₂ kibocsátás mértéke.

$$F_{CO_2} = \frac{V}{A} \frac{\Delta C}{\Delta t}, \quad (2.3)$$

ahol:

- F_{CO_2} - CO₂ kibocsátás az idő függvényében $\left[\frac{g}{m^2s}\right]$,
 V - A kamrában lévő levegő térfogata $[m^3]$,
 A - a kamra által lefedett terület nagysága $[m^2]$,
 ΔC - a CO₂ mennyiségének változása a mérés időtartama alatt $\left[\frac{g}{m^3}\right]$,
 Δt - az inkubációs idő [s] (TÓTH, 2011).

A nyílt kamrás mérési eljárások esetében, a bemenő és kimenő oldal koncentráció különbségéből, a mérőegységen áthaladó levegő tömegáramából és a mintavétel felületéből a (2.4) egyenlet alapján határozható meg a talaj CO₂ kibocsátása.

$$F_{CO_2} = \frac{\partial [CO_2]_c}{\partial t} \left(\frac{m_w}{m_v}\right) \frac{V_0}{A}, \quad (2.4)$$

ahol:

- F_{CO_2} - CO₂ kibocsátás az idő függvényében $\left[\frac{g CO_2}{m^2s}\right]$,
 V_0 - a rendszer össztérfogata (kamra-, csővezetékek, gáz-analizátor térfogata $[m^3]$,
 m_w - CO₂ moláris tömeg $\left[\frac{g}{mol}\right]$,
 m_v - CO₂ moláris térfogat $\left[\frac{m^3}{mol}\right]$,
 A - a kamra által lefedett terület nagysága $[m^2]$ (ROCHETTE *et al.*, 1997).

A mintavétel folytonossága alapján a szántóföldi mérési eljárások a következők szerinti alcsoportokba sorolhatók:

- Nem állandó mintavételű kamrák: a kamra talajra helyezését adott időközönként végzik. A mérés a kamra meghatározott inkubációs időtartamig (<1 óra) tart. A kamra talajra helyezésével a kamratérfogatban folyamatosan vagy pedig az inkubációs idő elteltével vizsgálják a CO₂ koncentráció növekedését (JENSEN *et al.*, 1996; SINGH és GUPTA, 1977). A nem állandó mintavételű kamrákat sok mérési pont esetében célszerű alkalmazni a térbeli heterogenitások vizsgálatára.
- Állandó mintavételű kamrák: a mérés hosszú inkubációs idővel (<1 óra; >24 óra) történik. A kamra a mérés teljes időtartama alatt nem kerül elmozdításra, a mérés folyamatosan történik (JANSSENS *et al.*, 2000; PUMPANEN *et al.*, 2004; XU *et al.*, 2006). Főként kisszámú mérőkamra esetén, a kibocsátás időbeli elemzésére használatosak.

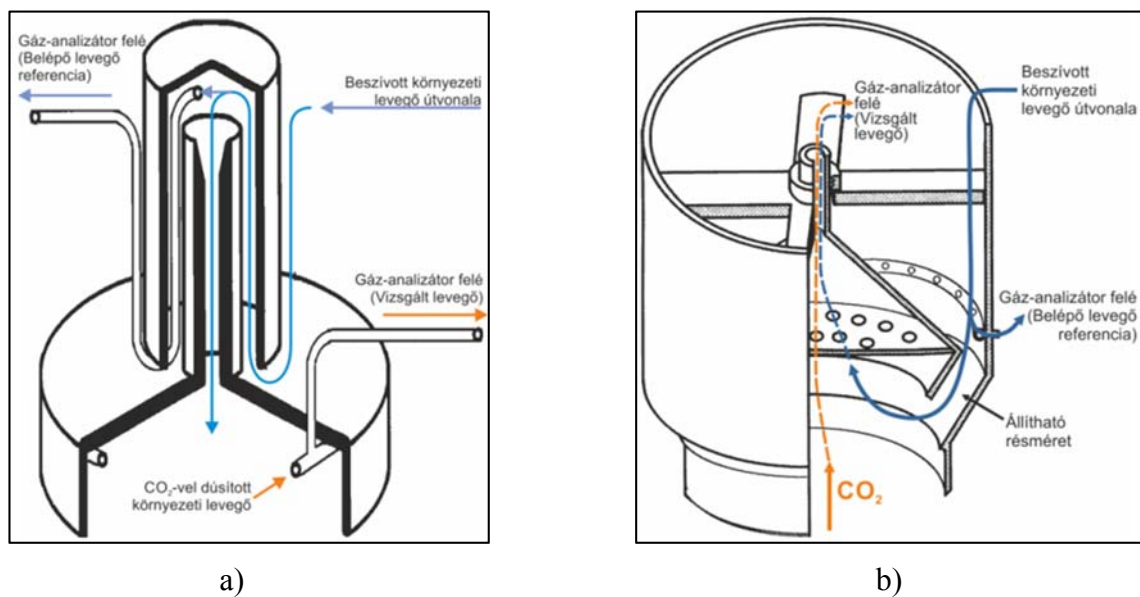
A kamrás mérési eljárások esetében hordozható és automata megoldások is ismertek. A hordozható megoldások egyik hátránya, hogy a kibocsátás időbeli heterogenitásának reprezentálása nehézkes, mivel a mintavételek időtartama és száma korlátozott. Így gyakran nem adnak elegendő információt a napi és szezonális szórásról, az éjszakai kibocsátásról és az epizodikus események, mint például a csapadékimpulzusok hatásáról (VARGAS *et al.*, 2011). Az automata kamrás mérési eljárások folyamatos, vagy félig-folyamatos méréseket biztosítanak. Egyrészt a statikus kamra talajra helyezésének mechanizmusa (EDWARDS, 1974; EDWARDS és RIGGS, 2003), másrészt pedig a kamralevegő koncentrációmérése is automatizálható (KING és HARRISON, 2002; SCOTT *et al.*, 1999).

A jelenlegi szántóföldi mérési gyakorlatban főként három kamrakialakítás használatos a szántóföldi talajok CO₂ kibocsátásának mérésére. A zárt, nem állandó mintavételű kamra, statikus mérési eljárással (zárt, statikus kamra), a zárt, állandó mintavételű kamra, dinamikus mérési eljárással (zárt,

dinamikus kamra) és a nyílt kamrás, állandó, dinamikus mintavételű eljárás (nyílt, dinamikus kamra) (PUMPANEN *et al.*, 2004).

Az első nyílt kamrás mérési eljárással történt kísérletek csak az 1970-es években kezdődtek, de már akkor megállapították, hogy a légköritől eltérő 1 Pa túlnyomás jelentősen megváltoztatja a talaj CO₂ kibocsátásának intenzitását. A negatív nyomáskülönbség kevésbé befolyásolja a mérési pontosságot (KANEMASU *et al.*, 1974). A beszívott légköri levegő dinamikus hatásának tisztázására, FANG és MONCRIEFF (1996) egy egyszerű, téglalap alapú, nyitott kamrával végeztek talaj CO₂ méréseket. Külön szivattyút használtak a légköri levegő kamrába juttatására, és a kamra ellentétes oldalán a kamra levegőjének gáz-analizátorba szivattyúzására. Az esetleges nyomáskülönbségek kompenzálására a légkör felé nyitott, kis átmérőjű furatot használtak a kamra oldalán. Ennek ellenére, csak elenyésző esetben nem tapasztaltak nyomáskülönbséget a kamra bemeneti és a kimeneti oldalai között. A mérési tapasztalatok alapján később a 2.12./b ábrán látható hengeres kamrát alakították ki.

A nyílt kamrás mérési eljárások működési elve megegyezik, de különböző kamrakialakítások találhatók a szakirodalomban (2.12. ábra.).

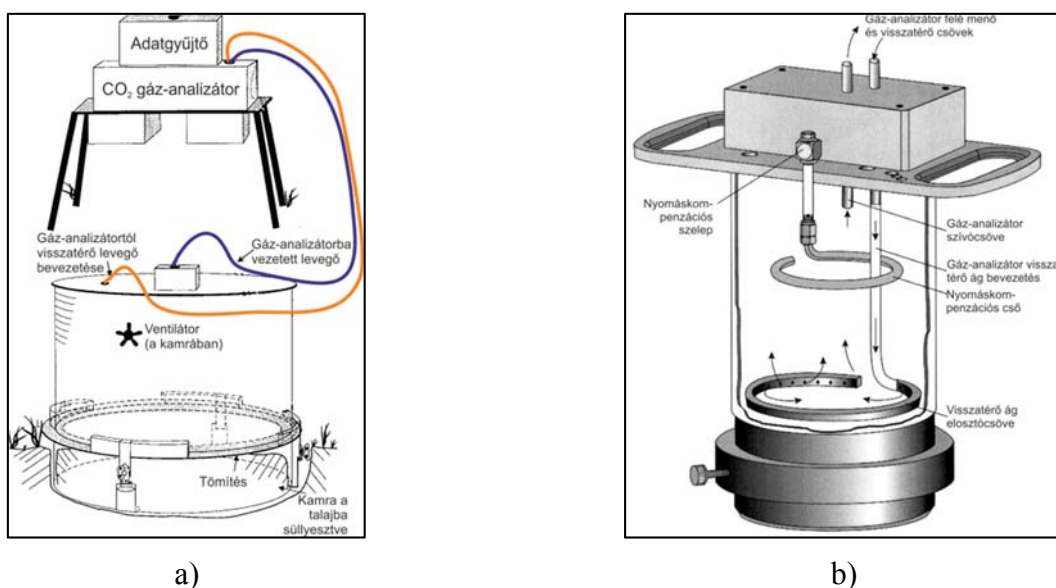


2.12. ábra. Különböző nyitott mérőkamrák sematikus felépítése és működése
a) RAYMENT és JARVIS (1997); b) Fang és Moncrieff, (1998b)

A működési elvből adódóan, nyílt kamrás eljárás esetén a mérés rövid és hosszú inkubációs idővel is történhet, mivel a kamra nem változtatja meg a talaj mikro-ökoszisztémáját olyan mértékben, mint a zárt kamrák. Hosszú inkubációs idővel pontosabb képet kaphatunk egy mérőponton a talaj CO₂ kibocsátásának időbeli lefolyásáról. Rövid inkubációs idő esetén, a mérőkamra több mérési ponton történő elhelyezésével pedig a CO₂ kibocsátás térbeli eloszlására lesz nagyobb rálátásunk. Ugyanakkor a kamra árnyékoló hatása is befolyásolhatja a mérési pontosságot. (FANG és MONCRIEFF, 1998b).

A legáltalánosabban használt, zárt kamrás mérési eljárások mérési gyakorlatának kialakulása a XX. század első harmadára tehető (SINGH és GUPTA, 1977). Ennél az eljárásnál az inkubációs idő minden esetben maximum 5-30 perc időtartamú, mivel az izolált kamra jelentősen befolyásolja a talaj mikro-ökoszisztémáját. Hosszú inkubációs idővel csak a kamrás eljárások elterjedésének kezdeti időszakában használták, de már MONTEITH *et al.* (1964) is felhívták a figyelmet arra, hogy a kamra üvegházakhoz hasonló feltételeket teremt, és ez befolyásolja a talaj kibocsátását és a fotoszintézis által elnyelt CO₂ mennyiségét. A statikus kamra hosszabb inkubációs idővel is alkalmazható, de kizárólag egy adott területen végzett, összehasonlító mérések elvégzésére. Az abszolút kibocsátás csak rövid (5-15 perc) inkubációs idővel végzett méréssorozattal határozható meg (RÁDICS és JÓRI, 2011).

Számos zárt mérőkamra kialakításról számol be a szakirodalom, amelyek többsége egyedi, az adott kutatóintézet vagy kutatócsoport saját megoldása.



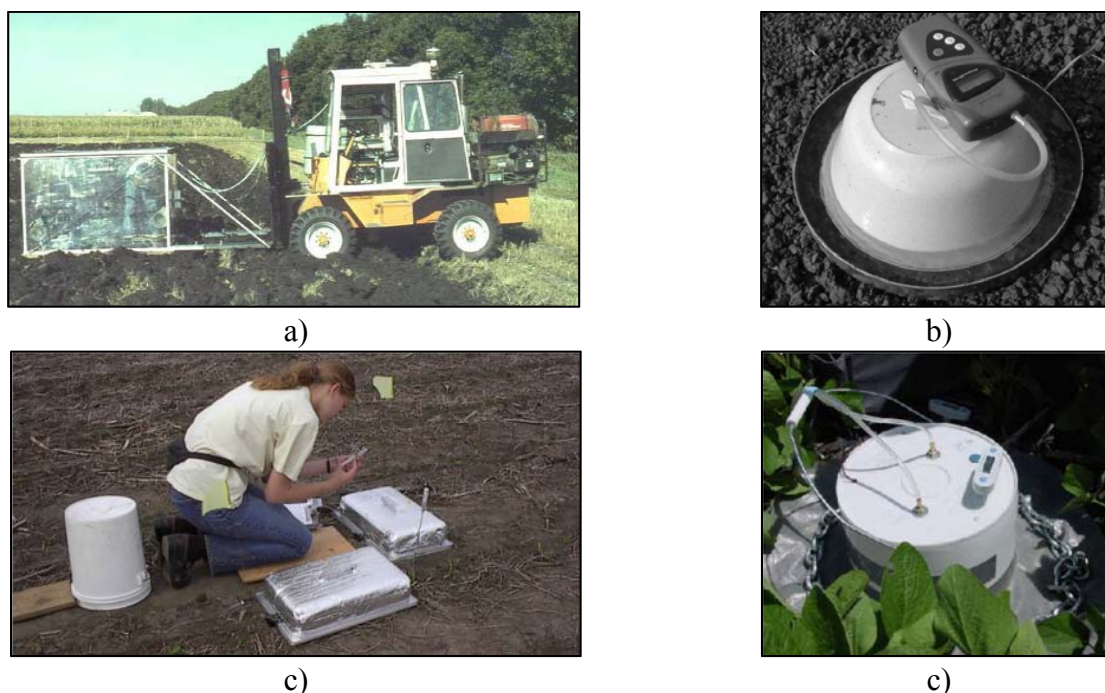
2.13. ábra. Különböző zárt mérőkamrák sematikus felépítése és működése
a) Egyedi mérőkamra (ROCHETTE *et al.*, 1997); b) LI-COR LI-6200 (WELLES *et al.*, 2001)

Az egyedi kamrákban kereskedelmi forgalomban kapható gáz-analizátorokkal vizsgálják a CO₂ koncentrációt, de rendelkezésre állnak kereskedelmi forgalomban lévő, komplett talaj CO₂ kibocsátást mérő rendszerek is (például: LI-COR Biosciences: LI-6400-09 és LI-8100; PP Systems: SRC-1, CPY-4; ADC: SRS-1000) (XU *et al.*, 2006) (2.13. ábra.).

A CO₂ kibocsátás, kamrás eljárásokkal történő mérésére számos eljárás rendelkezésre áll, amelyek között nagy különbség van a pontosság, a térbeli és időbeni felbontás, valamint az alkalmazhatóság tekintetében. Minden ismert mérési eljárás eltérő mértékű pontatlansággal rendelkezik (LUND *et al.*, 1999), de nem létezik egységes szabvány vagy ajánlás a mérési pontosság vizsgálatára (NAKAYAMA, 1990; RAYMENT és JARVIS, 1997). A mérések időpontja (közvetlenül a talajbolygatás után, vagy jóval később történik a mérés) és körülményei (növényi borítottság megléte vagy hiánya, a talaj hőmérséklete és nedvességtartalma, továbbá mindezen tényezők időbeni változása) jelentősen befolyásolják a mérési eredmények megbízhatóságát. A talaj hőmérsékletében és nedvességtartalmában az inkubáció ideje alatt bekövetkezett változások megnehezítik a terepi mérések eredményeinek értékelését, mivel a különböző tényezők emisszióra gyakorolt hatását nehéz elkülöníteni (TÓTH és FARKAS, 2010). A szakirodalomban ezért ellentmondások is találhatóak az egyes talajművelési eljárások szén elnyelő vagy kibocsátó voltáról (ANDERSON, 1982; DERPSCH *et al.*, 2014; NAKAYAMA, 1990). Sok esetben az eredmények összehasonlíthatóságát nehezíti, hogy nem kapunk teljes képet a kutatási körülményekről, mert vizsgált területeken a művelések hatásait (pl. terméshozam) nem közölték (DERPSCH *et al.*, 2014). Több kutatóintézet felismerte a szántóföldi CO₂ kibocsátás mérések nehézkes összehasonlíthatóságát, amely a különböző mérési metodikákból adódik (KARLEN *et al.*, 1994; KNOEPP *et al.*, 2002). Saját ajánlásokat és belső szabványokat adnak ki a mérések egységesítésére. Az USDA saját protokollja (PARKIN és VENTEREA, 2010) például pontosan meghatározza a mérőkamra kialakítására, elhelyezésére a mintavétel folyamatára, frekvenciájára, az ismétlések számára a mintavevő eszköz kialakítására, felhasználható anyagaina vonatkozó követelményeket.

Az egységes validációs rendszer hiánya miatt, többnyire szántóföldi összehasonlító tanulmányok és laboratóriumi vizsgálatok mutatják be a különböző kamrás eljárások mérési pontosságát, előnyeit és hátrányait. A mérési pontosság egyik fontos kérdése a megfelelő mérőeszköz használata. A kamrás mérési eljárásokkal végzett laboratóriumi és szántóföldi vizsgálatok során megállapították, hogy a kamra alacsony CO₂ koncentrációja stimulálhatja a talaj CO₂ kibocsátását, amelynek fő oka, hogy az

abszorbens CO_2 elnyelése. Később igazolták, hogy a kamra CO_2 koncentrációja jelentősen befolyásolja a talajlégzés intenzitását (NAGANAWA és KYUMA, 1991). A mérés technika fejlődésével megjelent hordozható gáz-analizátoros mérési eljárások és a XX. század közepéig rendszeresen alkalmazott abszorpciós eljárás összehasonlítására több vizsgálat is készült. Laboratóriumi és szántóföldi körülmények között is összehasonlították a zárt statikus és a zárt dinamikus kamrák mérési pontosságát. A statikus kamra esetében abszorpciós eljárást, a dinamikus kamránál infravörös gáz-analizátort alkalmaztak. Megállapították, hogy a dinamikus kamrás mérési eljárással jóval pontosabban meghatározható a kibocsátás. A statikus kamrában használt alkáli csapda eltorzíthatja a mérési eredményeket, mivel abszorpciós sebessége függvényében megváltoztatja a kamra gázösszetételét, így az eltér a környezeti levegőtől és megváltozik a kibocsátási gradiens a kamra alatt (JENSEN *et al.*, 1996; NAY *et al.*, 1994). A fenti vizsgálatokban a kamrán kívül elhelyezett gáz-analizátort alkalmaztak, amelyen átszivattyúzták a kamra levegőjét, de a kamrában elhelyezett gáz-analizátorral is hasonló mérési pontosság érhető el (JÓRI *et al.*, 2004).



2.14. ábra. Különböző típusú mérőkamrák a talaj CO_2 kibocsátás szántóföldi mérésére
 a) Nagy térfogatú, hasáb alakú mérőkamra. Forrás: (REICOSKY, 1990)
 b) Csonkakúp alakú mérőkamra. Forrás: (KOVÁCS *et al.*, 2008)
 c) Kis térfogatú, hasáb alakú mérőkamra. Forrás: (PARKIN és VENTEREA, 2010)
 d) Hengeres mérőkamra Forrás: (PARKIN és VENTEREA, 2010)

Az optimális mérőkamra kialakítás több kutatás tárgyát is képezi. Az egyes kutatók különböző alakú és méretű, általában egyedi kialakítású kamrákat használnak. REICOSKY (1990) 3,25 m³ térfogatú, hasáb alakú, légkeveréses kamrával végezte vizsgálatait, PARKIN és VENTEREA (2010) jóval kisebb térfogatú, hengeres és hasáb alakú, légkeverés nélküli kamrák használatát javasolta, ZSEMBELI *et al.* (2005) csonkakúp alakú kamrákat használtak (2.14. ábra.).

A mérőkamra fejlesztések célja a szántóföldi vizsgálatok pontosságának növelése, de a különböző mérőkamrákkal végzett vizsgálatok szükségessé teszik a mérőkamra kialakítások összehasonlító vizsgálatát, a mért adatok megbízhatóságának validálására. A szakirodalomban több kutatási eredmény található a különböző mérőkamrák kialakításával kapcsolatban. JANSSENS *et al.* (2000) mérései alapján, a kamraméret, rövid inkubációs idő esetén nem befolyásolja a mérési pontosságot. RÁDICS és JÓRI (2011) vizsgálatai szerint viszont a nagyobb kamrával 50%-kal megnövelhető az inkubációs idő. A kamrakialakítás egyik fontos szempontja a megfelelő légkeverés biztosítása. A kamralevegő keverése növeli a kamrás vizsgálatok megbízhatóságát, mivel a koncentráció mérés a homogénebb gázkoncentráció miatt pontosabb. Nagyobb kamráknál intenzívebb keverést kell

alkalmazni (KNOEPP *et al.*, 2002). A légkeveréses mérőkamrák nyomásának egyensúlyban kell lennie a külső környezetével, mivel kis eltérések esetén is megváltozhat a talajlégzés tömegárama, amely a CO₂ kibocsátás alá- vagy fölé becsléséhez vezet (FANG és MONCRIEFF, 1998b; LUND *et al.*, 1999). A különböző kereskedelemben kapható mérőrendszerekkel végzett vizsgálatok azt is megmutatták, hogy a kamranyomáshoz hasonlóan, a légkeverés áramlási sebessége is befolyásolja a talaj CO₂ kibocsátását, ezért a mérési pontosság növeléséhez, ezt is a kamrán kívül mérhető értékre kell beállítani (LEDANTEC *et al.*, 1999). Az alkáli csapdás és egyéb abszorpciós eljárással működő vizsgálatoknál viszont a légkeverés miatt a kamrában nagyon lecsökkenhet a CO₂ koncentráció, ami jelentősen befolyásolja a kibocsátási gradienst és így a mérési pontosságot (JENSEN *et al.*, 1996).

A szerzők által bemutatott, különböző kamrás eljárások összehasonlító vizsgálatára több átfogó tanulmány is található a szakirodalomban, amelyek között jelentős ellentmondások is tapasztalhatók. JANSSENS *et al.* (2000) kereskedelemben kapható és egyedi kamrás zárt rendszerű dinamikus, egyedi nyitott kamrás dinamikus (NORMAN *et al.*, 1992), zárt kamrás statikus rendszerű abszorpciós és eddy-kovariancia (lásd 30. oldalon) módszerrel működő mérőrendszerek összehasonlító vizsgálatát végezték el. A különböző mérési eredményeket a zárt kamrás, dinamikus eljárással hasonlították össze. Megállapították, hogy az általuk tesztelt nyitott kamrás eljárás túl alacsony CO₂ kibocsátást mért, míg az abszorpciós eljárással mért értékek jól korreláltak a referencia kamra értékeivel, de jelentősen alulbecsülték a valós kibocsátást.

KNOEPP *et al.* (2002) hasonló vizsgálatot végeztek labor- és szántóföldi körülmények között, két, különböző abszorbensekkel működő, zárt statikus, egy infravörös gáz-analizátorral működő, nyitott dinamikus, valamint két zárt dinamikus (ventiláció nélküli és ventilációval ellátott, gázkromatográffal) mérési eljárással. Méréseik alapján megállapították, hogy mindegyik mérési eljárás alkalmas a művelési eljárások és a térbeli eltérések jellemzésére, de csak a nyitott kamrás mérési eljárást tartják megfelelőnek a szántóföldi ökoszisztéma szénmérlegének meghatározására.

NORMAN *et al.* (1997) négy mérési elven működő, korábbi szakirodalmi tanulmányokban bemutatott hatféle, széles körben használt mérési eljárás vizsgálatával végeztek összehasonlító méréseket. A zárt statikus mérési elv reprezentálása egy légkeveréses és egy légkeverés nélküli egyedi kamrát használtak, amelyekből injekciós fecskendővel vettek mintákat. A zárt dinamikus kamrás mérési elvet a kereskedelemben kapható LI-COR, LI-6200 rendszerrel és egy egyedi kamrával vizsgálták. A nyitott dinamikus mérési elvet a RAYMENT és JARVIS (1997) rendszerével vizsgálták. A kamrás módszerek mellett eddy-kovariancia módszert (lásd 30. oldalon) is használtak. A mért eredmények alapján megállapították, hogy az eredmények szórása 15%-nál nem nagyobb, amely a talaj térbeli heterogenitása alapján megfelelő, vagyis mindegyik mérési eljárás alkalmas a talaj CO₂ kibocsátásának mérésére.

A szakirodalomban több tanulmány is foglalkozik a kamra alatti mikroökoszisztéma megváltozásából és a kamra kihelyezésekor bekövetkező talajbolygatásból adódó, egységesen csak „kamrahatásnak” nevezett jelenségekkel (DAVIDSON *et al.*, 2002; HIBBARD *et al.*, 2004; NAY *et al.*, 1994; RAICH és POTTER, 1995; XU *et al.*, 2006), amelyeket JANSSENS *et al.* (2000) hat pontban foglalták össze:

- A talajba süllyesztett mérőkamrák kihelyezésekor, a kamrafal környezetében, a pórusok összenyomása az azokban tárolt CO₂ hirtelen felszabadulását eredményezheti (MATTHIAS *et al.*, 1980).
- A kamrával lefedett talajban és a kamra levegőjében hőmérséklet és nedvességtartalom változások következhetnek be, amelyek megváltoztathatják a lebomlásból és gyökérlégből adódó kibocsátás intenzitását (MOSIER, 1990).
- A CO₂ koncentráció gradiens módosulása a talaj és a kamra levegő közötti kibocsátás mértékét befolyásolhatja (HEALY *et al.*, 1996).
- A légkör turbulens nyomásfluktuációinak izolálása, csökkentheti a CO₂ kibocsátás tömegáramát (RAYMENT és JARVIS, 1997) és befolyásolhatja a talaj közeli viszkózus réteg kialakulását.

- A légköri nyomástól eltérő kamranyomás csökkentheti, vagy növelheti a CO₂ kibocsátást. A vizsgálatok szerint 1Pa nagyságrendű nyomáskülönbség már megváltoztatja a kibocsátás tömegáramát (FANG és MONCRIEFF, 1996; LUND *et al.*, 1999; RAYMENT és JARVIS, 1997).
- A talajon elhelyezett, vagy a talajba süllyesztett kamra kihelyezése légmozgást és nyomásfluktuációt okozhat, amely a kihelyezés pillanatában, átmenetileg megváltoztathatja a kibocsátást (MATTHIAS *et al.*, 1980; ROCHETTE *et al.*, 1997).

A „kamrahatás” csökkentése érdekében, a kamra levegőjének folyamatos keverése, az inkubációs idő minimalizálása, a kamra magasságának, átmérőjének/szélességi méreteinek maximálása, valamint a mintavétel helyén a talajba süllyesztéshez külön gyűrű használata szükséges, amelyre ráhelyezik a mérőkamrát és a mérések között nem mozdítható el. A mért adatok köztes pontjainak interpolálásakor előnyben kell részesíteni a nemlineáris modelleket, hogy a mérési pontosság növelhető legyen (HEALY *et al.*, 1996).

Egyéb szántóföldi vizsgálati módszerek

A „kamrahatás” mellett, a szántóföldi mérőkamrás módszereket gyakori kritika éri, mivel a mérőkamra elhelyezésének és a mintavételek számának rossz megválasztása bizonytalanságot eredményezhet a térbeli heterogenitásokra miatti kibocsátási eltérések átlagának meghatározásában (MOSIER, 1990). A CO₂ mérések térbeli pontosságának kiterjesztésére, különböző mikrometeorológiai eljárásokat fejlesztettek, mint az eddy-kovariancia módszer, a kibocsátási gradiens módszer, a Bowen arány/energia mérleg módszer és az aerodinamikai módszer, amelyek használatával a térbeli heterogenitások, nem befolyásolják a mérési pontosságot (JANSSENS *et al.*, 2000). A mikrometeorológiai módszerekkel, a mért adatokból nagyrészt empirikus összefüggések segítségével számítják a hő és anyagáramot, de az eddy-kovariancia módszerrel lehetőség van a CO₂ gázcsere közvetlen mérésére is. A módszerrel az adott ökoszisztéma teljes nettó CO₂ gázcsereje vizsgálható, vagyis a fotoszintézis elnyelésének és a talajlégzés kibocsátásának különbsége határozható meg, azonban nincs lehetőség a talaj és a növényzet CO₂ gázcserejének külön-külön történő vizsgálatára. A módszer alapelve, hogy a CO₂ mérleget, a vizsgált terület feletti levegő áramlásai által szállított CO₂ mennyisége alapján határozzák meg, így a vizsgált területre jellemző térben átlagolt értéket mérhetünk (BALDOCCHI és MEYERS, 1991; BUSINGER, 1986; TANG *et al.*, 2005). Az eddy-kovariancia mérések alapelve már az 1950-es években ismert volt (SWINBANK, 1951), de a mérési eredményeinek értékelhetőségét az 1980-as évek előtt technológiai problémák akadályozták. A mérés technika fejlődésével, a nagyfrekvenciás széndioxid koncentráció mérő szenzorok és a szonikus anemométerek elterjedése tette lehetővé a mérések kivitelezhetőségét. Az eddy-kovariancia mérések egyik vitatott kérdése a szélcsendes időben mért értékek kezelése, amelyre különböző korrekciós eljárások léteznek. A legáltalánosabban alkalmazott módszer, hogy az alacsony turbulenciához tartozó mérési eredményeket átlagos értékekkel pótolják (BALDOCCHI *et al.*, 1986; BHATTACHARYYA *et al.*, 2013; BUSINGER, 1986; RANNIK *et al.*, 2006; TANG *et al.*, 2005).

A módszert ma már széles körben használják, főként erdő- és gyepek területek (FALGE *et al.*, 2005; KIM és VERMA, 1990) vizsgálatára, mivel az erdei ökoszisztémákban a fotoszintézis miatti CO₂ elnyelés és a talaj kibocsátásának különbsége ad értékelhető információt a teljes ökoszisztéma szénmérlegéről (DAVIDSON *et al.*, 2002). A szántóföldi kultúrák esetében kevésbé elterjedt, de CO₂-, vízpára- és hőáramlás mérésekre (BHATTACHARYYA *et al.*, 2013; DESJARDINS, 1985; SOEGAARD, 2003), valamint a szántóföldi művelési rendszerek teljes ökoszisztémáját érintő éves szénmérlegek meghatározására szintén használatos eljárás (BAKER és GRIFFIS, 2005; BAVIN *et al.*, 2009; HOLLINGER *et al.*, 2005; VERMA *et al.*, 2005). Az eddy-kovariancia módszer legnagyobb hátránya, hogy homogén felfelé áramlást és állandósult atmoszféra állapotot igényel. A módszer magas telepítési költsége és több vizsgált terület esetében az áthelyezés rugalmatlansága miatt, nagy valószínűséggel nem fogja helyettesíteni a jelenleg általánosan használt mérőkamrás módszereket (JANSSENS *et al.*, 2000; NORMAN *et al.*, 1997).

Talaj CO₂ kibocsátás mérések további kiterjesztése, a talajpórusokban raktározott CO₂ mennyiségének és vertikális eloszlásának vizsgálta, amely segíthet megérteni a légkör és a kamralevegő nyomásváltozásainak hatását a CO₂ kibocsátásra, valamint pontosabb információt adhat a csapadék hatásáról is. Az eljárás alkalmazható a kamrás mérési eljárások mérési pontosságának növelésére vagy kiegészítésére is (FANG és MONCRIEFF, 1998a; HIRANO, 2003; HIRSCH *et al.*, 2004; LUND *et al.*, 1999). Ez mellett megfelelő megoldás lehet, a különböző mértékű CO₂ forrást biztosító talajok közötti különbségek rangsorolására a különböző művelési eljárások tekintetében (RAYMENT és JARVIS, 1997).

2.10.2. Laboratóriumi vizsgálatok

A laboratóriumi vizsgálatok során, a szántóföldön vett talajmintákat, különböző méretű, izolált kamrában (respirométerben) helyezik el, majd folyamatosan vizsgálják annak gázkibocsátását. A vizsgált talajminták lehetnek osztályozott, átszitált, vagy közel bolygatatlannak tekinthetők is. A szántóföldön vett talajminták előkészítése azonban minden esetben megváltoztatja a kezdeti kibocsátást, amely vizsgálat kezdetén, a konstans körülmények ellenére is rendszerint magasabb, mint a későbbi időszakban (FANG és MONCRIEFF, 2001).

Kezdetben a laboratóriumi vizsgálatok során az inkubációs kamrában alkáli abszorbenst (pl.: KOH, NaOH) helyeztek el, majd az abszorbens tömegnövekedéséből határozták meg az elnyelt CO₂ mennyiségét, amely alapján a talajlégzés mértéke számolható (ANDERSON, 1982). A mérés technika fejlődésével a kamra levegőjét, zárt rendszerben infravörös gáz-analizátoron, vagy gáz-kromatográfon vezették keresztül, amely nem változtatja meg a kamra levegőjének összetételét.

Az alkáli abszorpciós eljárás hátránya, hogy a kibocsátott CO₂ elnyelődése miatt, megváltozott a talaj által kibocsátott CO₂ mennyisége is. A zárt rendszerű, gáz-analizátorokkal végzett vizsgálatok esetében a mérési pontosságot az előzővel ellentétes hatás befolyásolja, mivel a zárt rendszer miatt, a kamra megnövekedett CO₂ koncentrációja is hatással van a talaj gázkibocsátására. Ezt a jelenséget a laboratóriumi módszertan szerint kialakított, de általában szántóföldön használt kamrák (lásd 2.10.1. fejezet) összehasonlító vizsgálatainál mutatták ki (JENSEN *et al.*, 1996; LUND *et al.*, 1999; PUMPANEN *et al.*, 2004). Rendelkezésre állnak vizsgálati eljárások a fent említett hátrányok kiküszöbölésére a kamra levegőjének cseréjével, CO₂ mentes és légköri levegővel is, a talajminta felett és a talajmintán keresztül áramoltatásával is (SINGH és GUPTA, 1977).

A talaj CO₂ kibocsátásának laboratóriumi mérései során, főként a kibocsátás talajhőmérséklet és a nedvességtartalom függésére fókuszálnak (CHEN *et al.*, 2010; KIRSCHBAUM, 1995). A vizsgálatokat vagy változó kamra hőmérséklet mellett a pillanatnyi kibocsátást vizsgálva, vagy pedig a lebomlást teljes folyamatának vizsgálatát, folyamatosan állandó hőmérsékleten tartott, különböző hőmérsékletű kamrákkal végzik (REICHSTEIN *et al.*, 2000).

2.10.3. Elméleti megközelítések a bolygatatlan talaj gázcseréjének meghatározására

A szakirodalomban több empirikus megközelítés is található a talajlégzés és a hőmérséklet összefüggésének közelítésére. ROCHETTE *et al.* (1991) lineáris, HOLTHAUSEN és CALDWELL (1980) másodfokú, O'CONNELL (1990) másodfokú exponenciális, JENKINSON *et al.* (1990), SCHLENTNER és CLEVE (1985) logisztikus szigmoid függvényeket használtak. Ezen modellek adott körülmények között jól lekövezték a talajlégzés hőmérséklet függését, de az eltérő elméleti alapok miatt, más-más magyarázatot adnak a talajok gázcseréjének általános leírására, ezért alkalmazásuk bizonytalanságot hordoz magában (FANG és MONCRIEFF, 2001).

A biokémiai folyamatok, így CO₂ kibocsátás hőmérséklet függősége a 19. század végétől ismert. ARRHENIUS (1889) a reakcióban részt vevő molekulák reakcióenergia-eloszlását a (2.5) egyenlet szerint írta le:

$$y = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (2.5)$$

ahol:

A - konstans [–],

E_a - aktivációs energia [J],

R - univerzális gázállandó = $8,314 \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$,

T - hőmérséklet [K].

A mikroorganizmusok aktivitásában a hőmérséklet hatása kettős: egyrészt nő az reakciók sebessége a hőmérséklet növelésével, ugyanis valamennyi sebességi állandó az Arrhenius összefüggés szerint függ a hőmérséklettől. A makroszkopikus mikroba metabolizmus számtalan elemi, molekuláris szintű lépés eredője, amelyek mindegyike a hőmérséklet Arrhenius függvénye (SEVELLA, 2011).

A megalapozott elméleti háttér miatt, a CO₂ kibocsátás és a hőmérséklet kapcsolata közötti reakcióegyenletek alapja sok esetben az Arrhenius összefüggés, vagy ez alapján valamilyen exponenciális függvény (LLOYD és TAYLOR, 1994; THIERRON és LAUDELOUT, 1996). A CO₂ kibocsátáshoz hasonlóan, a nitrogén és kén minaralizáció és NH₄, NO₃, SO₄ kibocsátás hőmérsékletfüggő közelítésére több tanulmányban ugyanezen összefüggés alapján dolgoztak ki modelleket (ELLERT és BETTANY, 1992; MACDONALD *et al.*, 1995).

A talaj komplex összetételű, változatos mikroorganizmusokból álló rendszerében, a különböző organizmusok feltételezhetően eltérő hőmérsékletreakciókkal rendelkeznek. Az Arrhenius összefüggés esetében így az aktivációs energia ezek kombinációjából adódik (KIRSCHBAUM, 1995), továbbá az Arrhenius egyenlet az enzimreakciók állandó, hőfüggetlen aktiválási energiáját feltételezi, és nem számol ennek csökkenésével a hőmérséklet emelkedésekor, ami nem reális, mivel a tapasztalatok azt mutatják, hogy 30°C felett a mikrobiális aktivitást és a gyökérlégzést már gátolja a magas hőmérséklet (LELLEI-KOVÁCS, 2011). Az előzőek miatt LLOYD és TAYLOR (1994) módosította az Arrhenius egyenletet a KAVANAU (1950) által leírt, az aktivációs energia helyett használható félempirikus, hőmérsékletfüggő változó beépítésével, amely így elvesztette elméleti háttérét és modellparaméterként használható. Ezen értelmezés szerint legfeljebb egy konstans, amely a vizsgált minta összegzett aktivációs energiáját jellemzi.

$$R = R_0 * e^{\frac{-E_0}{T+273.15-T_0}}, \quad (2.6)$$

ahol:

R - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{\mu mol}{m^2 s} \right]$,

T - talajhőmérséklet [$^{\circ}C$],

T₀ - hőmérsékletre jellemző modell paraméter [$^{\circ}C$],

E₀ - aktivációs energiára jellemző modell paraméter [–],

R₀ - modell paraméter [–].

A talajlégzés közelítésére használt modellek paramétereinek meghatározására gyakran használják a kémiai reakciók hőmérséklet függésének hasonlóságát, amelyet először VAN'T HOFF (1899) jegyzett le. Kísérletekkel igazolt megállapítása szerint, a reakciósebességek aránya a különböző reakcióknál csak kismértékben tér el egymástól, amelyet a következő formában írt le:

$$\log_{10} k = a + bT, \quad (2.7)$$

ahol:

T - hőmérséklet [K],

a, b - konstans [–].

A biológiai rendszerek, így a talajlégzés hőmérséklet érzékenységének jellemzésére bevezetett, a

(2.8.) egyenlet szerinti Q_{10} hőmérsékleti együttható a (2.7.) egyenletből levezethető, amellyel megadható a talajlégzés két egymástól 10 °C-kal eltérő hőmérsékleten végbemenő folyamatok mértékének aránya:

$$Q_{10} = \frac{R_{T+10}}{R_T}, \quad (2.8)$$

ahol R_T ; R_{T+10} = talajlégzési értékek T és T+10 hőmérsékleten (WINKLER *et al.*, 1996).

Az empirikusan meghatározott Q_{10} együtthatót széles körben használják biológiai folyamatok hőmérséklet függésének jellemzésére, annak ellenére, hogy nincs racionális alapja (LLOYD és TAYLOR, 1994). A szakirodalomban közölt eredmények alapján különböző talajok eltérő hőmérséklet érzékenységet mutatnak, vagyis a Q_{10} hányados is hőmérsékletfüggő. Alacsonyabb hőmérsékleten (5-15°C) nagyobb, míg magasabb hőmérsékleten (15-30°C) kisebb érték (KIRSCHBAUM, 1995; RAICH és SCHLESINGER, 1992; SCHLESER, 1982). Ennek ellenére számos esetben használnak konstans Q_{10} értéket a talajlégzés modellezésére, de ezek a kritikai elemzésekben rendre pontatlannak bizonyulnak (FANG és MONCRIEFF, 2001; LLOYD és TAYLOR, 1994; RAICH és SCHLESINGER, 1992).

A közölt talajlégzés – hőmérséklet modellek összehasonlítása több tanulmány is megvizsgálta saját mérési eredmények alapján. LELLEI-KOVÁCS *et al.* (2011) a talajhőmérséklet és talajnedvesség talajlégzésre gyakorolt hatását vizsgálták VAN'T HOFF (1899) típusú exponenciális (2.9. egyenlet), O'CONNELL (1990) féle Gauss típusú (2.10. egyenlet) és egy egyszerűsített LLOYD és TAYLOR (1994) modell (2.11 egyenlet), saját mérési eredményekre történő illesztésével.

$$R = e^{a+bT}, \quad (2.9)$$

$$R = e^{a+bT+cT^2}, \quad (2.10)$$

$$R = e^{a-\frac{b}{T-c}}, \quad (2.11)$$

ahol:

R - talajlégzés $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,

T - hőmérséklet [K],

a, b, c - modell paraméterek [-].

Megállapításuk szerint, a talajlégzés legjobb modellje a vizsgált félszáraz ökoszisztémában az O'CONNELL (1990) féle Gauss hőmérséklet-függvény, melyben a talajhőmérséklet és a talajnedvesség hatását is jól követi, de az O'CONNELL (1990) által bemutatott optimális aktivitási hőmérséklet feletti tartomány pontosságát nem sikerült tisztázni.

FANG és MONCRIEFF (2001) a hőmérséklet hatását vizsgálták laboratóriumi körülmények között, inkubációs kamrában, a talaj felső 45 cm-es rétegét reprezentáló, szántóföldi és erdőtalajokból vett bolygatatlan talajmintákon. Regresszió analízist végeztek a mért eredmények alapján, empirikusan meghatározott, egyszerűsített lineáris és hatványfüggvények, valamint korábbi hőmérséklet-talajlégzés összefüggést leíró modellek használatával (2.2. táblázat). Megállapításuk szerint, a vizsgált modellek közül, az Arrhenius, valamint a Lloyd és Taylor függvény alkalmas talajhőmérséklet és a talajlégzés kapcsolatának legpontosabb leírására, de figyelembe kell venni, hogy módosították az Arrhenius egyenletet egy hőmérsékletfüggő tag hozzáadásával, amely így a Lloyd és Taylor modellhez hasonló, de elméleti hátterét megtartva kevésbé empirikus.

2.2. táblázat. A talajlégzés és a hőmérséklet összefüggéseinek vizsgálata különböző közelítésekkel.

Összefüggés	Illesztett paraméter	R ²	F-érték
Lineáris: $Y = a + bT$	Szántóföldi talaj: $a = -0.143^*$, $b = 0.0164$ Erdőtálat: $a = -0.176^*$, $b = 0.0153$	0.848 0.763	1331 504
Négyzetes: $Y = aT^2$	$a = 4.13 \times 10^{-4}$ $a = 3.18 \times 10^{-4}$	0.886 0.803	1860 738
Kucera és Kirkham (1971): $Y = a(T + 10)^b$	$a = 1.239 \times 10^{-5}$, $b = 2.794$ $a = 1.683 \times 10^{-7}$, $b = 3.913$	0.898 0.862	2105 978
Eq. (4): $Y = a(T - T_{\min})^b$	$a = 1.664 \times 10^{-8}$, $b = 4.194$, $T_{\min} = -26.5$ $a = 2.408 \times 10^{-8}$, $b = 4.336$, $T_{\min} = -13.4$	0.901 0.862	2150 981
Elsőrendű exponenciális: $Y = ae^{bT}$	$a = 0.03025$, $b = 0.08359$ $a = 0.01047$, $b = 0.1130$	0.902 0.865	2189 992
O'Connel (1990): $Y = ae^{bT + cT^2}$	$a = 0.03282$, $b = 0.07640$, $c = 1.485 \times 10^{-4}$ $a = 0.01738$, $b = 0.07065$, $c = 8.416 \times 10^{-4}$	0.902 0.865	1906 996
Arrhenius: $Y = a \exp\left(\frac{E}{R(T + 273.2)} \frac{T - 10}{283.2}\right)$	$a = 0.06648$, $E = 6.141 \times 10^4$ $a = 0.02992$, $E = 8.361 \times 10^4$	0.902 0.865	2192 1007
Lloyd and Taylor (1994): $Y = a \exp\left(\frac{E_0}{T + 273.2 - T_0} \frac{T - 10}{283.2 - T_0}\right)$	$a = 0.06769$, $E_0 = 1.833 \times 10^4$, $T_0 = -170.9$ $a = 0.03071$, $E_0 = 2.117 \times 10^4$, $T_0 = -134.5$	0.902 0.865	2191 1008
Jenkinson (1990): $Y = \frac{d}{a + b^{-(T-10)^{10}}}$	$a = -0.02688$, $b = 2.147$, $d = 0.0740$ $a = -0.05487$, $b = 2.37$, $d = 0.03705$	0.902 0.858	2181 949
Schlentner and Van Cleve (1985): $Y = \frac{d}{a + b^{-(T-10)^{10}}} + c$	$a = -0.377$, $b = 1.284$, $d = 0.1108$, $c = -0.113$ $a = -0.3807$, $b = 1.351$, $d = 0.06334$, $c = -0.0731$	0.904 0.866	2211 1009

Forrás:(FANG és MONCRIEFF, 2001)

2.10.4. Matematikai modellek a művelésből adódó kibocsátás számszerűsítésére

A bolygatatlan talaj (természetes) gázcsereje fontos tényező a szárazföldi rendszerek szén anyagáramának meghatározásában. Azonban a művelt talajok antropogén eredetű kibocsátásának számszerűsítéséhez, a természetes kibocsátás mellett, hasonlóan fontos tényező a műveléskor fellazított talaj levegő bekeverés, aggregátum- és pórustérfogat megváltozás hatására bekövetkező intenzívebb kibocsátásának modellezése (LASCALA JR. *et al.*, 2008). *A talajok CO₂ kibocsátás formájában történő szénkészlet csökkenése erősen korrelál a (művelésből adódó) aggregátum-méret változással, valamint a munkagép által átművelt talajkeresztmetszettel*, mivel a makro aggregátumok aprózódása a bennük elzárt szénkészletek feltárását teszi lehetővé a mikrobiológiai folyamatok számára (SILVA-OLAYA *et al.*, 2013). Kimutatták továbbá, hogy a műveletlen talaj CO₂ kibocsátásának hőérzékenységéhez hasonlóan, a művelés utáni CO₂ kibocsátásra is hatással van a hőmérséklet változása, de a műveletlen talajhoz képest eltérő mértékben. Következésképpen a művelés nem csak a talaj CO₂ kibocsátásának intenzitását, hanem a CO₂ kibocsátás hőmérséklet-érzékenységét is megváltoztatja. A művelés után mért adatok alapján, a CO₂ kibocsátás hőmérséklet-érzékenysége arányban van a talajművelés intenzitásával. (LASCALA JR. *et al.*, 2005).

Az irodalomban számos, szántóföldi mérések alapján meghatározott intenzitási és kumulált érték található a közvetlenül a művelésből adódó kibocsátás számszerűsítésére (ALVAREZ *et al.*, 2001; LOPEZ-GARRIDO *et al.*, 2014; LUO *et al.*, 2011; REICOSKY *et al.*, 1997; REICOSKY és LINDSTROM, 1993; ROCHETTE és ANGERS, 1999; SILVA-OLAYA *et al.*, 2013) (lásd bővebben: 2.8. ;2.10.1. fejezetek), azonban csak néhány olyan matematikai modell áll rendelkezésre, amelyekkel a CO₂ kibocsátás művelés utáni jellege, vagyis a művelés közvetlen hatása leírható.

ELLERT és JANZEN (1999) exponenciális modellt illesztett az általuk vizsgált mérsékelt száraz

csernozjom talaj, vetés utáni CO₂ kibocsátás mérési eredményeire. A vetést közvetlenül egy pálcás sarabolóval felszerelt, szántóföldi kultivátorral végzett magágykészítés előzte meg és gyomirtó kezelés követte. A művelés előtti 9 órában, valamint a művelés után 0,6; 3; 6; 12; 24 és 48 órával végezték a CO₂ kibocsátás mérését. A mért eredmények alapján, a művelt és a műveletlen parcellák mérési eredményeinek különbségéből határozták meg a művelés hatására megnövekedett kibocsátást. Több különböző (exponenciális, hiperbolikus) modell illeszkedését vizsgálták a mért eredményekre. A vizsgált empirikus modellek közül a (2.12.) egyenlet illeszkedését mutatták be, de megjegyezték, hogy több, 0,8 R² érték körüli illeszkedésű modellt is alkalmasnak találtak a kibocsátás modellezésére.

$$y = kM_0e^{-kt}, \quad (2.12)$$

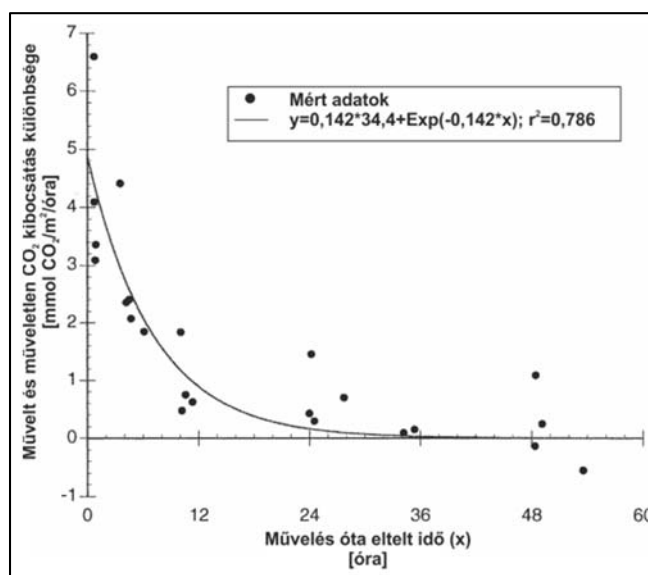
ahol:

y - talajlégzés $\left[\frac{\text{mmol CO}_2}{\text{m}^2}\right]$,

M_0 - egy műveléssel felszabadítható szén-dioxid = $34 \left[\frac{\text{mmol CO}_2}{\text{m}^2}\right]$,

t - művelés óta eltelt idő [s],

k - modell paraméter [–].



2.15. ábra. A talajművelés utáni CO₂ kibocsátás és közelítése exponenciális függvénnyel
Forrás: (ELLERT és JANZEN, 1999)

REICOSKY és ARCHER (2007) szántott területen, a művelést követő 500. óráig vizsgálta a művelési mélység hatását a talaj CO₂ kibocsátására. A méréseket a művelést követően közvetlenül, majd 24, később 48 óránként végezték. Korábbi mérési eredményekre alapozott feltételezésük szerint, a művelés után közvetlenül tapasztalható intenzívebb és az ezt követő mérsékeltebb kibocsátás egy kéttagú, összetett modell felállítását igényli. Ez alapján a kibocsátás leírására a (2.13.) egyenlet szerinti függvényt használták, amely 0,76-0,89 közötti R² értékkel követte le a különböző művelési mélységek mért adatait. Modelljük elméleti alapja a műveletlen és művelt terület kibocsátás intenzitásának használata modellparaméterként.

$$CER = a_0 + (1 - \delta)b_0e^{-k_0t} + \delta b_0e^{-(k_0+k_1)t+0,22k_1}, \quad (2.13)$$

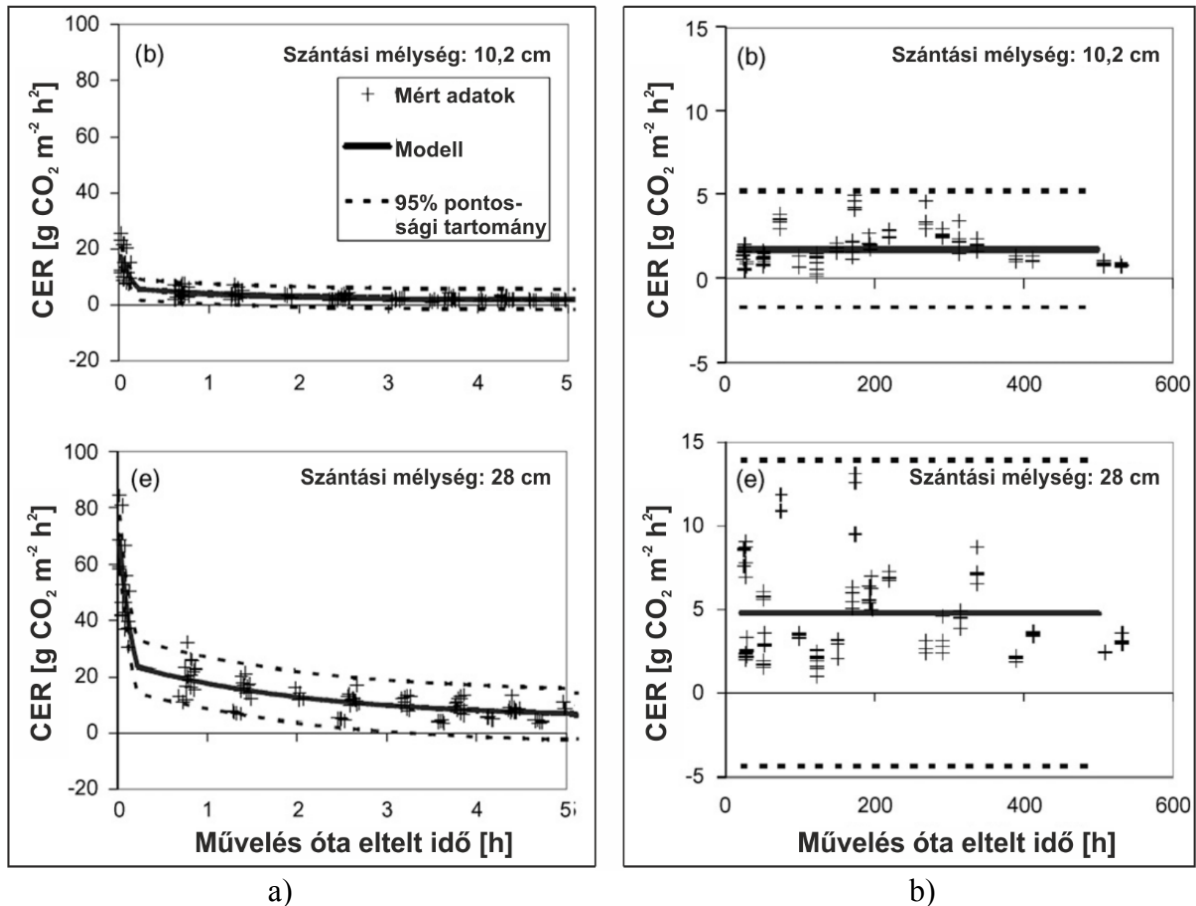
ahol:

CER - CO₂ csere arány⁴ $\left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{m}^2\text{h}}\right]$,

a_0 - a CER alsó határértéke $T \rightarrow \infty$ esetben $\left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{m}^2\text{h}}\right]$,

⁴ carbon dioxide exchange rate

- δ - a függvény töréspontja (megfigyelések alapján meghatározható) [h],
 b_0 - CER maximális értéke a kibocsátás lassan változó szakaszában $\left[\frac{gCO_2}{m^2h}\right]$,
 k_0 - hanyatlási hányados a kibocsátás lassan változó szakaszában $\left[\frac{gCO_2}{m^2h}\right]$,
 t - művelés óta eltelt idő [h],
 k_1 - hanyatlási hányados növekménye a kibocsátás gyorsan változó szakaszában $\left[\frac{gCO_2}{m^2h}\right]$,
 $(k_0 + k_1)$ - hanyatlási hányados a kibocsátás gyorsan változó szakaszában $\left[\frac{gCO_2}{m^2h}\right]$.



2.16. ábra. Szántást követő talaj CO₂ kibocsátás különböző művelési mélységek esetén

a) A művelést követő 5 órában

b) A művelést követő 500 órában

Forrás: (REICOSKY és ARCHER, 2007)

LA SCALA JR. *et al.* (2008) több művelési eljárás (talajmaró, középnyelazító, váltvaforgató eke, nehéztárcsa) után vizsgálták a talaj CO₂ kibocsátását. Elméletük szerint a művelés utáni kibocsátásra, a műveletlen talaj labilizálható szénttartalom csökkenése alapján lehet következtetni elsőrendű reakciókinetikai modellek alapján. Az elméleti alapokból (2.14 egyenlet) levezetve, az előző modellekhez hasonlóan, elsőfokú exponenciális közelítésre jutottak (2.15 egyenlet), de jóval jobban sikerült leköveti a mért adatokat ($R^2=0,97$).

A talaj labilizálható szénttalékának CO₂ kibocsátás hatására történő csökkenésének jellemzésére bevezették a művelt és a műveletlen területhez tartozó (k_T és k_{NT}) csillapítási paramétert, amely irodalmi adatok alapján exponenciálisan függ a talajhőmérséklettől és logaritmikusan a talaj nedvességtartalmától (PARTON *et al.*, 1994). A k változót és ennek megfelelően az ebből levezetett b_T ; a_1 ; a_2 változókat modelljükben konstansként kezelték, tekintettel arra, hogy ennek meghatározására további szántóföldi és laborvizsgálatok szükségesek.

$$F_T(t) = b_T \left[\frac{C_{0NT} + C_{0T}}{C_{0NT}} \right] e^{-(b_T-1)k_{NT}t} F_{NT}(t), \quad (2.14)$$

$$F_T = a_1 F_{NT} e^{-a_2 t}, \quad (2.15)$$

ahol:

F_T, F_{NT} - talajlégzés művelt és műveletlen talajon $\left[\frac{mmol CO_2}{m^2} \right]$,

C_{0NT}, C_{0T} - A labilizálható C mennyisége, művelés nélküli (NT) és művelt (T) területen $\left[\frac{g}{m^2} \right]$,

k_{NT}, k_T - talaj C mennyiségének csökkenéséhez tartozó csillapítási paraméter, művelés nélküli (NT) és művelt (T) területen [-],

b_T - csillapítási tényezőparaméterek aránya, modell paraméter = $\frac{k_T}{k_{NT}}$ [-],

$a_1 = \frac{b_T(C_{0NT} + C_{0T})}{C_{0NT}}$ - modell paraméter [-],

$a_2 = (b_T - 1)k_{NT} = k_T - k_{NT}$ - a csillapítási paraméterek különbségét jellemző modell paraméter [-],

t - művelés óta eltelt idő [h].

Az előző modell pontosítására LA SCALA JR. *et al.* (2009) külön vezették le a művelt (2.17 egyenlet) és a műveletlen területre (2.16 egyenlet) vonatkozó modelleket, mivel a növényi maradványok bekeverésével vagy egyéb szerves anyag visszajuttatásával megváltozik a k_{NT} értéke. Így célszerűbb a művelt és a műveletlen területek kibocsátására eltérő modelleket alkalmazni.

$$F_{NT} = C_{0NT} k_{NT} e^{-k_{NT} t}, \quad (2.16)$$

$$F_T = F_{NT} + a_1 e^{-a_2 t}, \quad (2.17)$$

ahol:

F_T, F_{NT} - talajlégzés művelt és műveletlen talajon $\left[\frac{mmol CO_2}{m^2} \right]$,

C_{0T} - A labilizálható C mennyisége művelt (T) területen $\left[\frac{g}{m^2} \right]$,

k_{NT}, k_T - talaj C mennyiségének csökkenéséhez tartozó csillapítási paraméter, művelés nélküli (NT) és művelt (T) területen [-],

$a_1 = C_{0T} * k_T$ - labilizálható C mennyiségének csökkenését jellemző modell paraméter $\left[\frac{g}{m^2} \right]$,

$a_2 = k_T$ - modell csillapítási paraméter [-],

t - művelés óta eltelt idő [h].

TEIXEIRA *et al.* (2010) felhasználva a korábbi modellezési tapasztalatokat (REICOSKY és ARCHER, 2007; LA SCALA JR. *et al.*, 2009, 2008), három tagból álló modellt használt. Feltevése szerint a művelés utáni CO₂ kibocsátást két, eltérő elméleti alapú jelenség befolyásolja, mivel a különböző szántóföldi mérések tapasztalatai azt mutatják, hogy a művelés után hirtelen megnő a kibocsátás, amit egy exponenciális jellegű csökkenési fázis követ. A (2.18) egyenlet első két tagja a talajhőmérséklet és nedvességtartalom változásából adódó, bolygatatlan talajok esetében használt félempirikus modellel írja le a CO₂ kibocsátás második, kisebb intenzitású szakaszát, amikor a talajművelésből adódó bolygatás hatása már kevésbé érvényesül. Az egyenlet utolsó tagja pedig közvetlenül a művelést követően, a talajbolygatás miatt várható nagy intenzitású kibocsátásra ad elsőfokú exponenciális közelítést.

$$F_{CO_2} = a_1 T + a_2 \theta + a_3 e^{-a_4 t}, \quad (2.18)$$

ahol:

F_{CO_2} - talajlégzés művelt talajon $\left[\frac{g CO_2}{m^2 h} \right]$,

a_1 - hőmérsékletre tartozó modellparaméter $\left[\frac{g CO_2}{m^2 h ^\circ C} \right]$,

T - talajhőmérséklet [$^\circ C$],

a_2 - nedvességtartalomhoz tartozó modellparaméter $\left[\frac{g\ CO_2}{m^2\ h\ térf.\%}\right]$,

θ - talaj nedvességtartalom $\left[\% \frac{V}{V}\right]$,

$a_3 = \beta * C_{OT} * k_T$ - labilizálható C mennyiségének csökkenését jellemző modell paraméter $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,

C_{OT} - A labilizálható C mennyisége művelt (T) területen $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,

k - talaj C mennyiségének csökkenéséhez tartozó csillapítási paraméter $\left[\frac{g\ CO_2}{m^2\ h}\right]$,

$a_4 = k_T$ - modell csillapítási paraméter $\left[\frac{1}{nap}\right]$,

t - művelés óta eltelt idő [h].

A modellparaméterek meghatározására tárcsás ekéből és fogasboronából álló kombinált gépkapcsolat (hagyományos művelés), valamint rögtörő hengerrel felszerelt középnyílazító (csökkentett művelés) munkája után végeztek szántóföldi vizsgálatokat. A munkamélység mindkét esetben 30 cm volt. A számított modellparamétereket a 2.3. táblázat tartalmazza.

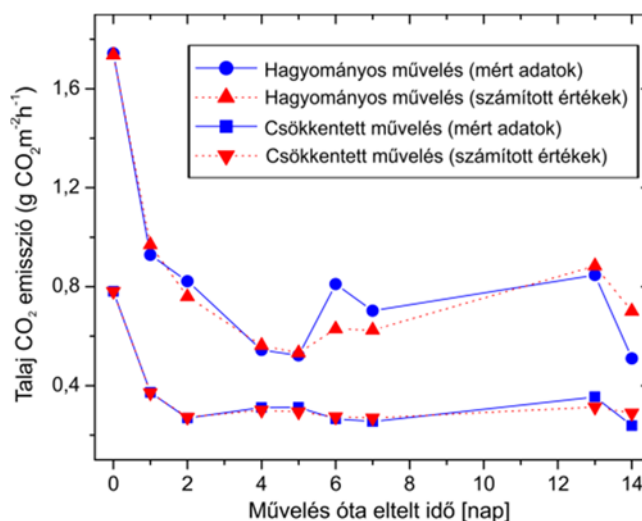
2.3. táblázat. A Teixeira modell paraméterei és illeszkedése

Művelés	Modell paraméterek $F_{CO_2} = a_1T + a_2q + a_3e^{-a_4t}$	R^2	Kumulált emisszió (gCO_2m^{-2}) mért/számított
Hagyományos (tárcsás eke + fogasborona)	$a_1 = 0,0322 \pm 0,0069$ $a_2 = -0,0068 \pm 0,0077^*$ $a_3 = 1,0792 \pm 0,1379$ $a_4 = 1,1416 \pm 0,4853$	0,93	260,65 / 254,70
Csökkentett (középnyílazító + rögtörő henger)	$a_1 = 0,0080 \pm 0,0018$ $a_2 = 0,0041 \pm 0,0019$ $a_3 = 0,5191 \pm 0,0372$ $a_4 = 1,9618 \pm 0,5130$	0,98	107,19 / 105,04

*Nem szignifikáns

Forrás: (TEIXEIRA *et al.*, 2010)

A mért és a számított kibocsátási adatokat a 2.17. ábra mutatja.



2.17. ábra. A mért és a Teixeira modellel számított adatok a talaj művelést követő CO_2 kibocsátására hagyományos és csökkentett művelés esetén

Forrás: (TEIXEIRA *et al.*, 2010)

2.11. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A légkörbe jutó antropogén eredetű üvegházhatású gázok legnagyobb része az energia előállításból, az iparból, az intenzív mezőgazdasági és erdőgazdálkodási tevékenységekből származik. Ezek részeként a mezőgazdasági földhasználatból adódó CO₂ kibocsátás is hozzájárul a globális klímaváltozási folyamatokhoz. A művelésbe vont talajok éves kibocsátását megadó mérőszámok használata nem célszerű, mivel a Föld lakosságának élelmiszer ellátásához szükség van a különböző kultúrnövények termesztésére, vagyis a művelt területek kibocsátásának csökkentése, nem járhat a művelt területek méretének csökkentésével. Ezért az általános kibocsátási értékek meghatározása helyett, sokkal fontosabb felismerni azt a potenciált, hogy a csökkentett művelési eljárásokkal, a termésmennyiségek fenntartása mellett, a termesztéstechnológia szén–elnyelő irányba fordítható.

A szántóföldi növénytermesztést megalapozó talajművelési eljárások tekintetében számos alternatíva áll rendelkezésre, amelyekkel csökkenthető a talajok szén-dioxid kibocsátása, de a csökkentés mértékének meghatározása többnyire kimerül az egyes művelési eljárások, adott termőhelyi körülményekhez, adott vizsgálati időszakra vonatkoztatott rangsorolásában. Emiatt talajművelés CO₂ kibocsátása, kedvező, számos alternatívát kínáló termőhelyi adottságok esetén is csak sokdrangú szerepet kap az alkalmazott művelési eljárás kiválasztásában.

A talajtípus, a szerves anyag ellátottság alapvetően meghatározza a gázemisszió intenzitását. A kidolgozandó modellezési módszer felhasználásának tehát egy átfogó, „talaj emissziós adatbank” adhat gyakorlati használhatóságot, amelyben a művelési eljárások kibocsátása talajtípusokhoz és hőmérséklet viszonyokhoz kötve megtalálható.

Az egyes művelési módok hatása nem feltétlenül lineáris a környezeti hatások paramétereivel, ezért az adott talajnál a méréseket célszerű egy időben elvégezni. A művelési eljárások intenzitása jelentősen befolyásolja az emisszió mértékét. A tényleges hatásokra adható, általánosítható modell a szántóföldi technológiák fenntarthatósági elemzéséhez elengedhetetlen. Az EU jogrendjében terjedő technológiai fenntarthatóság kritériuma szükségessé teszi az általánosítható módszer és modell megalkotását.

A szántóföldi mérési eljárások folyamatosan fejlődnek. A kibocsátás térbeli és időbeli heterogenitása miatt csak empirikusan, összehasonlító mérések segítségével határozhatók meg a különböző hiányosságok. A zárt kamrák fő hátránya például, hogy megváltoztatják a talaj mikro-ökoszisztémáját, a nyílt kamránál pedig a levegő áramoltatása miatt elkerülhetetlen nyomáskülönbség befolyásolja a mérés pontosságát. Ezért egyelőre nincs optimális megoldás vagy egységes szabvány a talaj CO₂ kibocsátás mérési módszereire, de a mérési eljárások validálására sem. A különböző szerzők ajánlásai, közölt mérési tapasztalatai segítségével elkerülhetők a hibás megoldások:

Méréstechnikai szempontból jelentős zavarást okoz a vizsgált talajfelszín felett a levegő mikro áramlása, amely egyfelől a talaj-levegő hőmérséklet eltéréséből adódó termikus, másfelől pedig a légköri nyomáseltérésekből adódó tömegáramok eredője. Olyan talaj-levegő kölcsönhatást mérő rendszer szükséges, amely ezeket a tényezőket kizárja, vagy hatásukat minimálisra csökkenti.

A tapasztalatok szerint, zárt mérőkamrák légkörtől eltérő CO₂ koncentrációja befolyásolja a talaj kibocsátási intenzitását, ez a hatás azonban jóval kisebb az előzőnél. A koncentrációváltozásból adódó hibát minimalizálhatjuk a kamra megfelelő méretével, az inkubációs idő csökkentésével, a mért levegő kiszivattyúzásával, gáz-analizátoros mérőrendszer használatával, a kamralevegő keverésével, a tapasztalaton alapuló ürités-telítés módszerének kidolgozásával.

A művelés nélküli talajok CO₂ kibocsátásának leírására alkalmazott teoretikus alapokon nyugvó, empirikus és fél-empirikus modelleket összehasonlító vizsgálatok, az eltérő vizsgálati háttér miatt nem összevethetők, és esetenként egymásnak ellentmondó eredményekre jutottak. Bizonyos körülmények között, az Arrhenius összefüggést alapul vevő, máskor a tapasztalati alapokon nyugvó

függvények bizonyultak pontosabbnak. A művelés utáni kibocsátás esetében, a fizikai-biokémiai alapokat figyelembe vevő modellek követik le pontosabban a mért eredményeket. Azonban az alkalmazott talaj- és egyéb környezeti változótól függő paraméterek meghatározására, nem minden esetben végeztek vizsgálatokat. Azok többnyire elméleti háttérük nélküli konstansként, vagy empirikus módon meghatározott paraméterként szerepelnek a modellekben. Így könnyen előfordulhat, hogy több paraméter különböző kombinációjával, azonos eredményt kapunk.

A szakirodalom alapján, a művelés nélküli területek emissziójának intenzitása a talaj hőmérsékletváltozásával van összefüggésben. A talajbolygatás hatására bekövetkező emisszió egyrészt a természetes termikus folyamat, másrészt a megváltozott biotikus reakciók eredménye. A modell felállításánál tehát célszerű a reakció-folyamatot leíró differenciálegyenletek használata.

A hatótényezők közül a nedvességtartalom, a szakirodalomban bemutatott intervallumokban nem befolyásolja számottevően a felszíni emissziós értékeket. A különböző modelleket bemutató tanulmányok szerzői, a bolygatatlan és a művelt talajok esetében is kiemelték, hogy a kibocsátás inkább erősen hőmérsékletfüggő. Azonban a bemutatott modellek csak a műveletlen talajok esetében vették figyelembe a talajhőmérsékletet. A művelés utáni kibocsátást leíró modellekben ez nem található meg.

A talajok művelése nemcsak a talaj CO₂ kibocsátásának intenzitását, hanem a CO₂ kibocsátás hőmérséklet-érzékenységét is megváltoztathatja. A hőmérséklet hatásának figyelembe vétele kiemelten fontos a reakció leírásánál, de konkrét változó, vagy kapcsolati modell használata helyett, célszerűbb lehet a változás jellegének figyelembe vétele.

A szerzők rámutattak arra, hogy nem található megfelelő matematikai modell a talajművelési rendszerek teljes szén-dioxid kibocsátás modellezésére. Különösen hiányosak az ismeretek a művelés utáni közvetlen jelentkező, impulzusszerű kibocsátás modellezésében és az emittált mennyiség kvantitatív meghatározásában.

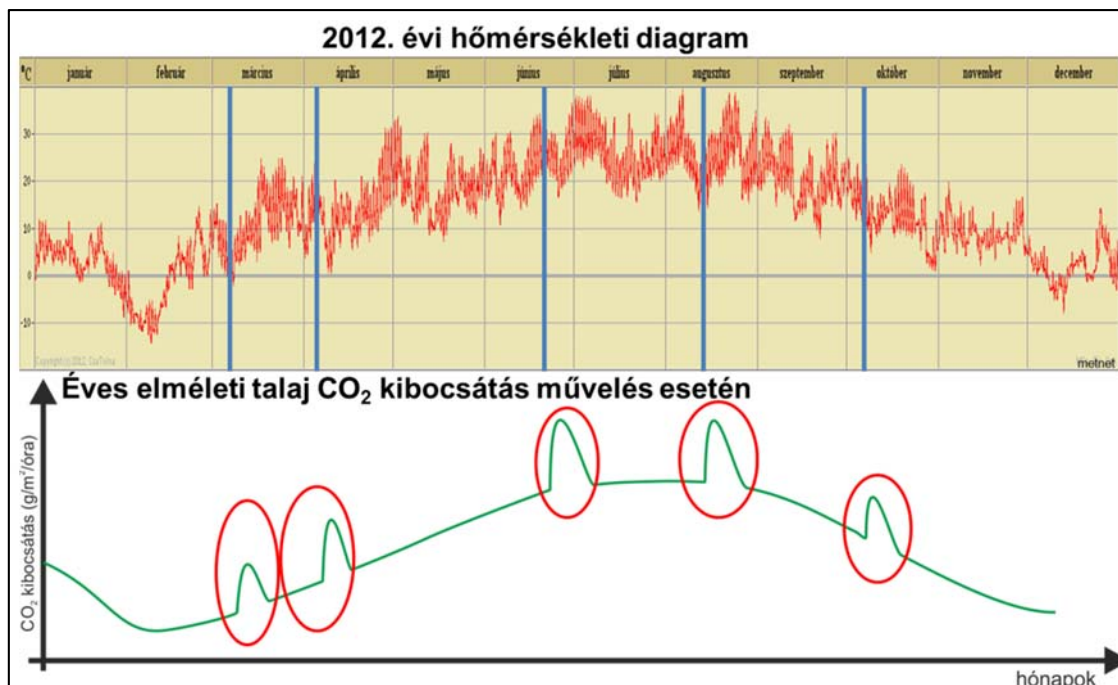
Az irodalomban fellelhető becslések az emisszió átlagértékeire (vagy induló értékeire) irányulnak. A tapasztalat szerint a megnövekedett emisszió lecsengéséig a napi ingadozás jelentős lehet, amely hatást gyakorol az integrális „teljes kibocsátásra”. Ennek figyelembe vétele jelentősen pontosíthatja a kibocsátási modellt.

A szakirodalomban bemutatott mérések ciklusideje nem, vagy csak felületesen követi a kibocsátás intenzitásának változásait. Ezért a mérési módszer kidolgozása során, az emisszió változásainak pontosabb nyomon követésére, a mérések ciklusidejének pontosítása szükséges, így a kibocsátás modellezése is pontosabb eredményt adhat.

A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése alapján, dolgozatom második részében, a fentiekben megfogalmazott kutatási irányvonalak mentén végzett munkámat fogom bemutatni.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A mezőgazdasági művelésbe vont területek CO₂ kibocsátását a művelések között időszakban főként a hőmérsékletváltozás hatása befolyásolja. A talajművelés hatására a kibocsátás intenzitása rövid időszakra jelentősen megnő, majd idővel a műveletlen terület kibocsátásának megfelelő szintre áll vissza. Ezt a folyamatot mutatom be a 3.1. ábrán. A kutatás célja, az ábrán pirossal bekarikázott, a művelés hatására megváltozott kibocsátási intenzitás meghatározása és modellezése volt.



3.1. ábra. A levegőhőmérséklet éves változása a 2012-ben (forrás: csatolna.hu), valamint az ehhez tartozó feltételezett CO₂ kibocsátás görbe

3.1. A szántóföldi vizsgálatok módszerének kiválasztása, a vizsgálatok módszertana

A kutatás alapvető feladata a megfelelő mérési eljárás kidolgozása, amellyel megbízhatóan vizsgálható a művelés utáni talajfelszín, és ezzel azonos időben a műveletlen terület CO₂ kibocsátása. A mért adatok alapján a későbbiekben a talajművelés utáni emissziós folyamat leírása és a kibocsátott CO₂ mennyiség meghatározására is lehetőség nyílik.

A mérési eljárás kiválasztásánál a fő szempontok a következők voltak:

- A kidolgozott mérési eljárásnak a lehető legpontosabban kell információt adnia a művelt és a műveletlen talaj CO₂ kibocsátásáról. A mért értékek validálására szakirodalmi adatok állnak rendelkezésre.
- A mérések során több kísérleti területen, ezeken belül több parcellán, a talaj térbeli heterogenitásainak kezelésére, legalább három ismétlésben kell vizsgálni a CO₂ emissziót. Ezért a mérési eljárásnak rugalmasnak kell lennie, amely telepítése nem igényel különleges eszközöket.
- A kidolgozott mérési eljárásnak a későbbiekben lehetővé kell tennie különböző művelt területeken a gyors és rugalmas emisszió mérést a „talaj emissziós adatbázis” létrehozásához. Ez megköveteli azt is, hogy gyorsan telepíthető, áthelyezhető, alacsony költségű rendszer legyen.
- Közvetlenül a művelést követően, a talaj mikroklímájának minimális befolyásolásával, lehetőség legyen az emisszió intenzitásának megfelelően, változtatható időközönként, a kibocsátás mérésére.

A szakirodalomban számos mérési eljárás leírása található meg, amelyekkel szántóföldi körülmények között vizsgálható a talaj CO₂ kibocsátása (2.10.1. fejezet). A mikrometeorológiai eljárások segítségével nagy pontossággal határozható meg egy-egy terület szénmérlege. Használatuk azonban nem biztosítja a kellő rugalmasságot a mérések során, mivel nagy anyagi ráfordítást igénylő telepített eszközök. Működési elvükből adódóan nem választható szét a talaj kibocsátása és a növények fotoszintézise révén elnyelt szén-dioxid mennyisége. A különböző talajszondák használata pontos képet ad a különböző talajokban raktározott CO₂ mennyiségéről és a gázok mozgásáról a talajban, de ezek az eljárások főként a talajok kibocsátási potenciáljának feltérképezésére szolgálnak.

A szakirodalomban található tanulmányok alapján, a művelt talajok emissziójának vizsgálatára főként a kamrás eljárások terjedtek el. Az általánosan használt kamrás eljárások között alapvető különbség van a zárt és a nyílt kamrás eljárások mérési alapelve között. A környezeti levegő keringetésével működő nyílt kamrás eljárások közül csak néhány jól működő megoldás ismert. Az ezeket bemutató tanulmányok kiemelték, hogy ezzel az eljárással a talaj mikroklímájába történő beavatkozást sikerült minimalizálni, de az eljárás különösen érzékeny a levegő áramoltatása miatti nyomásváltozásokra. A leírások alapján egy ilyen mérőrendszer kidolgozása pontos laboratóriumi és szántóföldi validációs vizsgálat sorozatot igényel.

A zárt kamrás mérési eljárás kidolgozásában jelentős segítséget nyújtanak a szakirodalmi leírásokban megfogalmazott tapasztalatok és irányelvek, amelyek segítségével a mérési hibák jelentős része elkerülhető. A szakirodalom áttekintése megerősítette azt a feltételezést, miszerint a jelenlegi mérési gyakorlatban nincs olyan kamrás mérési eljárás, amellyel a talaj mikroklímájába történő minimális beavatkozás nélkül lehetséges a CO₂ kibocsátás pontos mérése. A későbbi saját tapasztalataim is megerősítették ezt, ezért a mérések során folyamatos törekvés volt a talajtulajdonságokba és a talaj mikroklímájába történő beavatkozás minimalizálását szem előtt tartó mérési eljárás kidolgozása.

A kamrás vizsgálati módszer alapja, hogy a talajlégzés során keletkező és a talajból távozó szén-dioxidot a talaj felett egy kamrában akkumuláljuk, és ebből mintát véve, vagy közvetlenül a kamrában vizsgáljuk a gázkoncentrációt. A mért adatok alapján, a kamra által letakart terület egység és a kamratérfogat, valamint az inkubációs idő alapján számítható az egységnyi területre vonatkoztatott szén-dioxid kibocsátás, amely az adott talajtípusra és adott művelésre jellemző értéket ad meg.

A vizsgálati területen, egymás mellett több vizsgálati parcellán végeztünk különböző műveléseket a korábbi művelési irányoknak megfelelően. A mérés során minden esetben vizsgáltam a műveletlen terület kibocsátását is, amelyet a kiértékelés során, egységesen referencia területnek neveztem. A referencia terület kibocsátása adta meg az adott területre, talajtípusra jellemző értéket, amely viszonyítási alapul szolgált a művelt területeken mért, a művelés hatására megnövekedett kibocsátás számszerűsítésére.

A vizsgált parcellákon a CO₂ gyűjtésére használt kamrákat a művelés után közvetlenül elhelyeztem a vizsgált területrészekben, így a művelés következtében, a talajból emittált CO₂ akkumulálása a művelés után azonnal megkezdődött.

A mérések során egységesen vizsgált paraméter volt a légkör CO₂ koncentrációja, amelyet a kiértékelés során minden esetben figyelembe vettem a kiértékelés során. Így a mért adatok alapján, kizárólag a művelés következtében keletkezett CO₂ mennyiségét tudtam kiszámítani.

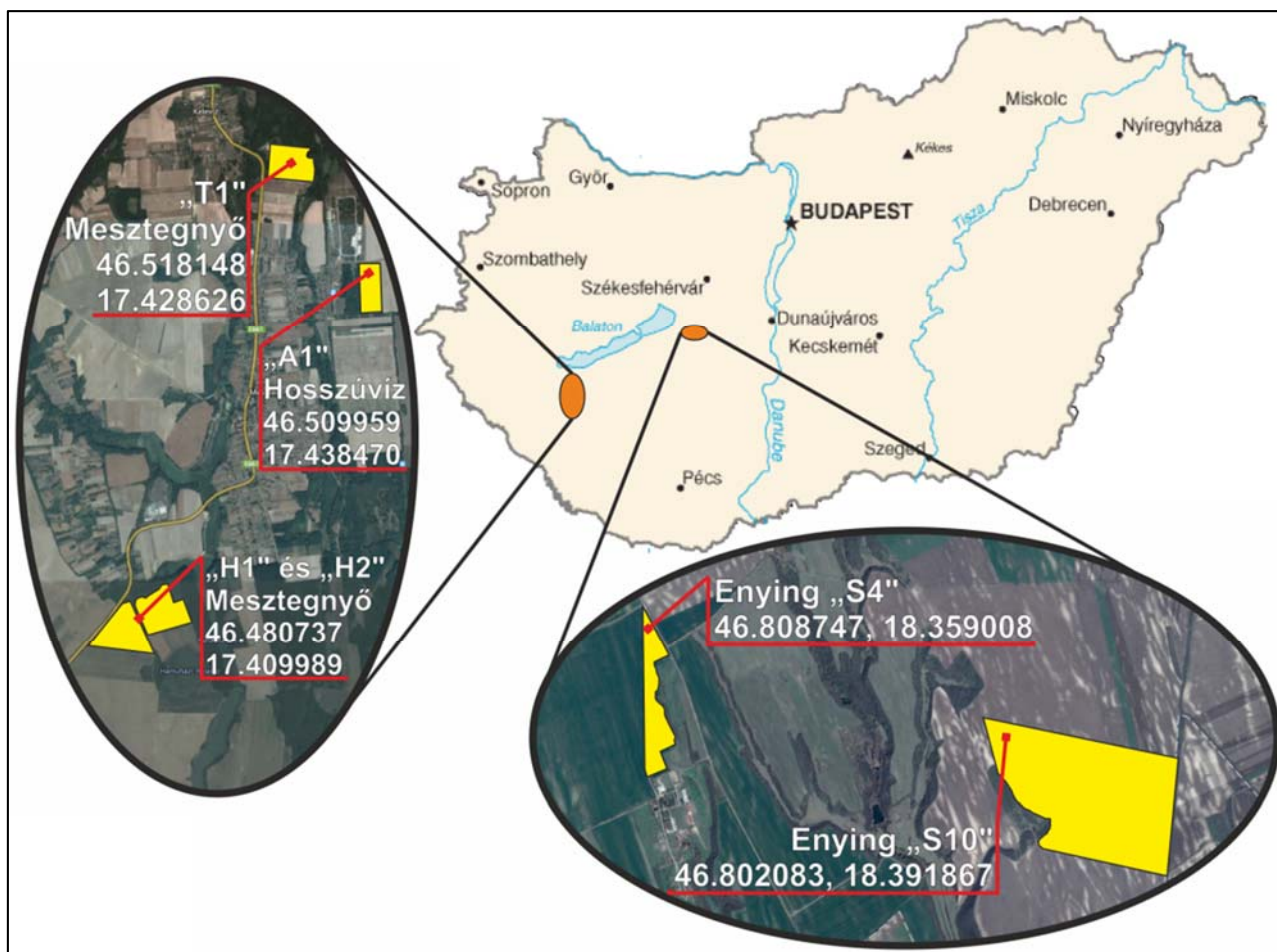
A mérések során az ismétlések számát minden esetben a rendelkezésre álló erőforrások ismeretében igyekeztem maximálni. Ezt egyrészt a mérőműszerek mérési sebessége, másrészt a rendelkezésre álló kamrák száma és a kísérleti terület mérete határozta meg. A mérőpontokat ill. mérési helyeket a kísérleti parcellákon, véletlenszerű mintavételi helyeken, úgy helyeztem el, hogy az a lehető legpontosabban tükrözze a megművelt talajfelszín jellemzőit. Így például középmezélylazítás után, a lazítókések vonalában és közöttük is vizsgáltam a CO₂ kibocsátást és ezek átlagértékét vettem a művelést jellemző értéknek. A mérések ismétlésének értékeit átlagoltam, majd számítógépen dolgoztam fel. A különböző műveletek hatásának megállapítása érdekében a mért értékeket összehasonlítottam a műveletlen terület természetes emissziójával.

3.2. A kísérleti területek bemutatása

A CO₂ kibocsátás vizsgálatokat az Enyingi Agrár Zrt., Fejér megyei, Lajoskomárom- és Rádics Balázs mezőgazdasági vállalkozó, Somogy megyei, Mesztegyő térségében lévő területein végeztem. A mérések során a vizsgált területen kisebb parcellákat jelöltem ki a forgókon belüli részen, amelyeken felváltva alkalmaztuk a különböző műveléseket.

A vizsgálati területeken a méréseket megelőző időszakban hagyományos, szántásos alpművelést folytattak. Az Enyingi Agrár Zrt. kezelésébe tartozó vizsgálati területek nagy szervesanyag tartalmú vályogtalajok. Rádics Balázs egyéni vállalkozó kezelésében lévő területek közül a Mesztegyő „T1” és Hosszúvíz „A1” területek alacsony szervesanyag tartalmú homoktalajok, míg a Mesztegyő „H1” és Mesztegyő „H2” területek szintén alacsony szervesanyag tartalmú, erősen agyagos vályogtalajok.

A kísérleti területek elhelyezkedését a 3.2. ábrán mutatom be.



3.2. ábra. A kísérleti területek elhelyezkedése

3.3. A vizsgált munkagépek bemutatása

A méréseknél használt munkagépeket a mérőterület kezelőjének gépparkjából választottam, illetve a Somogyi mérések esetén, a Lemken Thorit szántóföldi kultivátort és a Symba Xpress tárcsás boronát az Első Somogyi Raktár Szövetkezet tagjai ajánlották fel. A vizsgált munkagépeket a 3.3.-3.13. ábrákon, a kísérleti területek előkészítése közben készült fényképeken mutatom be.



3.3. ábra. Rába IH770 tárcsás borona + Güttler henger



3.4. ábra. Kverneland CLE lazító



3.5. ábra. Kverneland BB 115 ágyeke



3.6. ábra. Komondor mulcskultivátor



3.7. ábra. Kuhn Optimator kompakt tárcsás borona



3.8. ábra. Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor + Pöttinger Lion forgóborona



3.9. ábra. Lemken Thorit szántóföldi kultivátor



3.10. ábra. Egyedi építésű közepmélylazító



3.11. ábra. Symba X-press tárcsás borona



3.12. ábra. Vogel&Noot ©plus XM váltvaforogató eke



3.13. ábra. Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor, egyedi rögtörő hengerrel

A vizsgált gépek többnyire gyári kialakításúak, műszaki paramétereik és kialakításuk megegyezik a gyártók specifikációjával a következők gépek kivételével:

Az egyedi építésű középmezélylazító (3.10. ábra.) gerendelye melegen hengerelt „U”-acélból készült, melyre 5db VIBROLAZ-80/E parabola alakú gerinclemezzel van felszerelve 60°-os „V” elrendezésben. A lazítószerszámok 220 mm hosszú, 60mm széles lazítóékek íve a gerinclemezek görbületének meghosszabbítása, melyek 55° nyílásszögű, 150 mm széles szárnyakkal vannak ellátva. A lazítószerszámok után két, tandem elrendezésű, Pöttinger típusú, tüskés rögtörő henger helyezkedik el.

A 3.8. ábrán látható gépkapcsolat esetében, az erőgép első függesztő szerkezetére felszerelt Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátorról a gyári tömörítő henger le volt szerelve. A mélységtartást egy egyedi építésű, menetirányba önbeálló kerekekkel szerelt szerkezet biztosította, amelyen paralelogramma mechanizmussal lehetett beállítani a mélységállító kerekek helyzetét. A művelt terület tömörítését a hátsó függesztő szerkezetre kapcsolt Pöttinger Lion forgóborona tömörítő hengerével végeztük. Ezzel a gépkapcsolattal csak kultivátorozott és kombinált művelést is végeztünk. A csak kultivátorral művelt területek esetében a forgóboronát kikapcsoltuk és a tömörítő hengert a legalsó helyzetbe állítottuk be, így a forgóborona nem végzett talajbolygatást.

Ugyanezt a Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátort használtam a traktor hátsó függesztő berendezésén üzemeltetve is (3.13. ábra.), ekkor egy egyedi építésű, 450 mm átmérőjű, 100 mm osztással elhelyezett, háromszög alakú fogakkal ellátott nehéz tömörítő henger végezte a művelt terület lezárását.

3.4. A vizsgálatok körülményeinek ismertetése

A különböző talajművelési eljárások CO₂ kibocsátásra gyakorolt hatásának vizsgálatára elvégzett szántóföldi mérések összefoglaló adatait a 3.1.-3.2. táblázatokon mutatom be.

A 3.1. táblázatban szereplő 1. mérés, illetve az egy munkagéppel végzett szántóföldi vizsgálatok célja a mérési eljárás fejlesztése és validálása volt. Ezeknél a méréseknél a műveletlen és az egy munkagéppel művelt területek szén-dioxid kibocsátásának mérését, a mérési eljárás fejlesztése és a mérések összehasonlíthatóságának érdekében többféle mérőkamrával, vagy különböző mérési eljárással végeztem.

A dolgozat következő részeiben az alábbi terminológia szerint hivatkozok a mérések egy-egy csoportjára a mérések időtartama tekintetében:

- A művelést követően 1-5 órás időszak kibocsátásának vizsgálatára végzett mérésekre a *rövid időtartamú mérések*,
- a művelést követő 28-30 órában végzett vizsgálatokra a *középes időtartamú mérések* kifejezéseket használom.

3.1. táblázat A rövid időtartamú mérések összefoglaló adatai

Mérés száma	Művelet / dátum	Terület (3.2. ábra)	Időjárási- és talajviszonyok	Talajművelő gép (3.3. fejezet)	Művelési mélység, [cm]
1.	Tarlóhántás gabonatarlón 2003. 07.15.	Enying "S4"	Száras, szeles idő, 28 °C száras talaj	Rába-IH tárcsás borona+ Güttler henger	14-16
				Komondor mulcskultivátor	14-16
				Kverneland CLE középmeélylazító	24-26
2.	Alapművelés kukorica tarlón 2003. 09.23.	Enying "S10"	Száras, szeles idő, 20 °C, száras talaj	Rába-IH tárcsás borona+ Güttler henger	19-21
				Kverneland BB 115 ágyeke	24-26
	2003. 10.16.		Száras, szeles idő, 16 °C, nedves talaj	Komondor mulcskultivátor	18-20
3.	Tarlóhántás gabonatarlón 2007. 06.06.	Mesztegyő "H1"	Száras, napos idő, 26- 28 °C, nyirkos talaj	Symba X-press tárcsás borona	12-14
4.	Tarlóhántás repcetarlón 2007. 06.07.	Mesztegyő "A1"	Száras, napos idő, 29- 31 °C, nyirkos talaj	Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor + Pöttinger Lion forgóborona	16-18
				Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor	22-25
5.	Tarlóhántás gabonatarlón 2007. 07.14.	Mesztegyő "H1"	Száras, napos idő, 25- 28 °C, nyirkos talaj	Középmeélylazító	38-45
				Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor	22-25
				Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor + Pöttinger Lion forgóborona	16-18
6.	Tarlóhántás repcetarlón 2007. 07.15.	Mesztegyő "A1"	Száras, napos idő, 29- 31 °C, nyirkos talaj	Symba X-press tárcsás borona	12-14
7.	Alapművelés gabonatarlón 2011. 08.09.	Mesztegyő "T1"	Száras, napos idő, 28- 31 °C, nyirkos talaj	Egyedi középmeélylazító	38-42
8.	Tarlóhántás napraforgótarlón 2011. 09.17.	Mesztegyő "H1"	Száras, napos idő, 25- 28°C, száras talaj	Lemken Thorit szántóföldi kultivátor	14-16

3.2. táblázat. A közepes időtartamú mérések összefoglaló adatai

Mérés száma	Művelet / dátum	Terület (3.2.)	Időjárási- és talajviszonyok	Talajművelő gép (3.3. fejezet)	Művelési mélység, cm
9.	Tarlóhántás gabonatarlón 2004.07.15.-2004.07.16.	Enying "S4"	száras, napos idő, 28 °C, száras talaj	Kuhn Optimizer kompakt tárcsás borona	12-14
				Kverneland BB115 ágyeke	24-26
10.	Tarlóhántás gabonatarlón 2014.08.18-2014.08.19.	Mesztegyő "H2"	száras, napos idő, 28 °C, nedves talaj	Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor	20-22
				Vogel&Noot váltvaforogató eke	32-35

A művelést követő mérések tervezett ciklusidejére a 3.3. táblázat szerinti értékeket határoztam meg. A táblázatban megjelölt iránymutató értékektől a mérések során több esetben el kellett térni, mivel a mérőműszerek mérési ideje, vagy egyéb szervezési okok nem tették lehetővé a tervezett ciklusidők betartását.

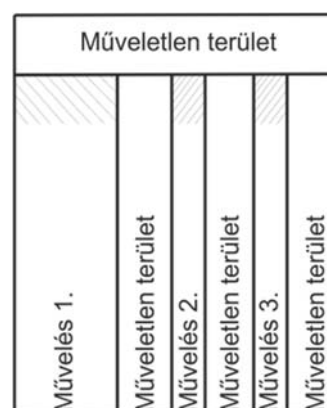
A vizsgált területeken a művelt és a műveletlen területű mintavételi parcellák kijelölése felváltva történt. Az enyingi közepes időtartamú mérés mintavételi parcelláit, a mintavételi edények véletlenszerű elhelyezését és a mérőparcellák elrendezésének tervezett struktúráját mutatja be a 3.14. ábra. A műveletlen terület kibocsátási értékeit minden esetben közvetlenül a művelt területek mellett vizsgáltuk. A mérőparcellák kijelölésekor a táblaszéli forgó területe minden esetben elhagyásra került. A mérőparcellákon a mintavevő edények elhelyezése véletlenszerűen történt. A mérőpontok megközelítése során ügyeltünk arra, hogy minden esetben a műveletlen terület felől, felesleges taposás okozása nélkül történjen a mintavevő edények elhelyezése és a kamrakoncentráció mérése.

3.3. táblázat. A szántóföldi mérések tervezett ciklusideje

Mérés időszaka a művelés után	Mérés ciklusideje
Rövid időtartamú mérések	
0-90 perc	15 perc
90-240 perc	30 perc
Közepes időtartamú mérések	
0-4 óra	40 perc
4-9 óra	60 perc
9-30 óra	120 perc
éjszaka	240 perc



a)



b)

3.14. ábra.

a) A mintavevő edények elhelyezése a mintavételi parcellákon

b) A mérések általános vázlatja

3.5. A mérési eljárás kidolgozása

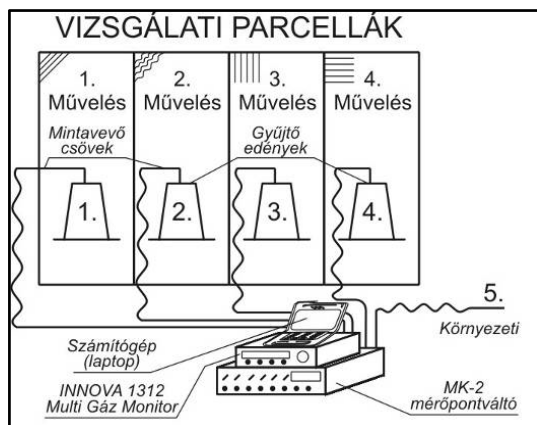
A megbízható mérési adatokat biztosító mérési eljárás kidolgozásának alapvető feladata a megfelelő mérőműszer kiválasztása és a talajból emittált szén-dioxid gyűjtésére alkalmazott inkubációs kamra kidolgozása volt.

3.5.1. Mérőműszer kiválasztása

A szén-dioxid kibocsátási vizsgálatok kidolgozásának kezdeti időszakában az automatizált mérésre törekedtem. A szakirodalomban javasolt irányelvek alapján, a mérést egy kamrán kívül elhelyezett, nagy pontosságú gáz-analizátorral kívántam megoldani. Ehhez a VM Mezőgazdasági Gépesítési Intézetnél rendelkezésre álló, korábban több gázkoncentráció vizsgálatnál is használt (FENYVESI *et al.*, 2004), INNOVA 1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor típusú eszközt választottam ki, amelyhez tartozott egy CBiss Intelligent Sampling System MK2 típusú mérőpontváltó, amely segítségével a mérőeszköz szellőztetése és méréssorozatonként nyolc mérőkamrából történő mintavétel végezhető (3.16. ábra.). A teljes mérőrendszert a 3.15. ábrán mutatom be. A mérési eljárás előnye, hogy a mintavétel automatizált módon, zárt rendszerben történik, ppb (a gázkoncentráció összefüggésében az összes molekula milliárdod része) nagyságrendű mérési pontossággal. Az ezzel a mérőrendszerrel végzett vizsgálat során a mérőkamrák csónkakúp alakú, 8,3 liter térfogatú, PE anyagú edények voltak, amelyek mérőkamráként 415 cm² területet fedtek le. A mérés során a mérőkamrákat és a mérőpontváltót mintavevő csővezeték kötötte össze (3.15. és 3.16. ábra.), amelyet a mérések során nem távolítottunk el a mérőedényekből. A csővezetéken keresztül a mérőpontváltó, adott időközönként mintákat vett a mérőedényekből és eljuttatta a mérőegységbe, amely meghatározta a CO₂ koncentrációt. A mérés paramétereinek összefoglalása a 3.4. táblázatban található.

3.4. táblázat. Az INNOVA mérőrendszer paramétereinek összefoglalása

Mérőegység paramétere	Gáz-analizátor típusa	<i>INNOVA 1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor</i>
	Mérőpontváltó típusa	<i>CBiss Intelligent Sampling System MK2</i>
	Mérőpontok száma	8
	Mintavevő cső átmérője	$\varnothing 6 \text{ mm}$
	Mintavevő cső hossza	20 m (egységesen)
	Mintavételi idő minimumértéke:	10 perc
Inkubációs kamra paramétere	Mérőkamra alapterülete	415 cm ² / gyűjtőedény
	Mérőkamra térfogata	8,3 dm ³
	Mérőkamra anyaga	LDPE



3.15. ábra. A mérés vázlatja



3.16. ábra. INNOVA 1312 Multi Gas Monitor és CBiss mérőpontváltó

Az INNOVA műszer szellőztetésének szükségessége miatt, a mérőrendszer nem tette lehetővé, hogy a kiszivattyúzott levegőt a mérőkamrába visszavezessük és zárt rendszerben történjen a mérés. Ezért a kamrából kiszivattyúzott levegő a környezetbe távozott, a kamrában a nyomáskiegyenlítés a zárt kamra miatt a talajon keresztül történt. A 3.4.táblázat adatai alapján kiszámítható, hogy a mintavételhez szükséges, egységesen 20 méter hosszúnak választott csővezeték teljes térfogatának feltöltéséhez 0,565 dm³ levegőt kell a mérőkamrából kiszivattyúzni, amely a mérőkamra térfogatához képest viszonylag nagy érték. Ezért a pontos méréshez, a mintavevő edényben lévő CO₂-levegő keverékének jelentős részét ki kell szivattyúzni, továbbá a csővezeték feltöltése után, a pontos méréshez minimálisan 15 másodpercig kell a kamralevegőt a mérőrendszeren keresztül áramoltatni. A nagyarányú légcserre alapján azt feltételeztem, hogy ez az eljárás hosszabb távon jelentősen befolyásolhatja a mérés pontosságát.

A nagy légcserre miatti bizonytalanság, valamint a költségek csökkentése és a mérés egyszerűsítése céljából beszereztünk egy egyszerűen használható, hordozható, ppm (a gázkoncentráció összefüggésében az összes molekula milliomod része) nagyságrendű mérési pontossággal rendelkező TESTO 535 típusjelű CO₂ koncentráció mérő műszert (3.17. ábra.), amelyet Fenyőharaszton a Józsefmajori Tangazdaságban beállított talajművelési tartamkísérletben az INNOVA 1312 Multi-gas monitorral hitelesítettük 2003.06.12-én. A vizsgálatokat a Tangazdaság hagyományos, szántásos alapművelésű és művelés nélküli, direktvetésű parcelláin végeztük. A légköri kontroll eredményeket a vizsgálati terület felett 1 m-es magasságban mért légköri CO₂ koncentráció jelentette. A TESTO műszer infravörös fényabszorpciós elven működő mérőfejjel rendelkezik, amelyet az inkubációs idő végén, a mérőkamra tetején kialakított furat kinyitása után kell a mérőkamrába helyezni. Így a mérőkamrák maximális számát nem korlátozza a rendelkezésre álló mérőcsatornák száma, mint az INNOVA műszer esetében, de a koncentrációmérés időszükséglete korlátot jelenthet rövid inkubációs- és ciklusidő esetén. A két műszer összehasonlító vizsgálata esetében a mérési pontosságon kívül, megvizsgáltuk, hogy befolyásolja-e a mérési pontosságot a TESTO műszer

mérőfejének mintavevő edénybe helyezése.



3.17. ábra. TESTO 535 műszer és elhelyezése a mintavevő kamrában

A két műszer összehasonlító mérései alapján, adott mérési pontokon legfeljebb 3 %-os eltérés volt tapasztalható (3.5. táblázat.), ezért a későbbi méréseket a TESTO műszerrel végeztem.

3.5. táblázat. A TESTO 535 és az INNOVA 1312 műszerek mérési pontosságát összehasonlító vizsgálat eredményei

A mérőeszköz megnevezése:	INNOVA 1312	TESTO 535	Különbség	
			ppm	%
Légköri koncentráció átlaga	335	344	9	2,69
A művelt terület átlaga	Direktvetés	449	6	1,35
	Szántás	476	-5	1,04

3.5.1.1. A különböző mérőrendszerek szántóföldi vizsgálat

Az első méréssorozat során (3.1. táblázat, 1. mérés), a különböző művelési eljárások CO₂ kibocsátásának vizsgálata mellett, a két mérőrendszer összehasonlító vizsgálatát is elvégeztük, hogy a különböző művelési eljárások, várakozások szerint eltérő kibocsátási értékei és a folyamatos mérés mellett is vizsgálható legyen mérőrendszerek közötti különbség. A mérés kezdetekor a környezeti hőmérséklet már több napja rendkívül magas, 30 °C körüli volt, ami intenzív talajéletre engedett következtetni, ugyanakkor a hosszú csapadékmentes időszak miatt, a talaj alacsony nedvességtartalma ellenkező irányba befolyásolhatja ezt, amennyiben helyenként a talaj nedvességtartalma a mikroorganizmusok működéséhez szükséges tartományt nem érte el.



3.18. ábra. A mérőkocsi és a mintavevő edények a különböző mérőrendszerek összehasonlító vizsgálatánál

A vizsgálati területen tárcsás borona, középmeélylazító és mulcskultivátor munkája után, valamint a

műveletlen parcellán vizsgáltuk a talaj CO₂ kibocsátását. A lazított terület esetében a mérőkamrákat a gerinclemezek vonalában helyeztünk el, hogy a mérési eljárásokat, a várhatóan intenzíven növekvő kamrakoncentráció mellett is össze lehessen hasonlítani.

A különböző művelésű mérőparcellákon a munkagépek elhaladása után mindkét mérőműszernek külön kamrákat helyeztünk a talajra (3.18. ábra.), így az INNOVA műszer által kiszivattyúzott levegő nem befolyásolta a másik műszer mérési pontosságát. A kamrák elhelyezésekor a kamrák tetején, a mérőműszer behelyezésére szolgáló nyílást nem zártuk le, hogy a kamra talajra helyezése ne okozzon nyomásfluktuációt.

3.5.1.2. A nagyszámú kamrával végzett mérés műszerezése

Az első közepes időtartamú mérés (3.2. táblázat, 10. mérés) során, 21 kamrával történt a művelt terület vizsgálata, amely kivitelezhetetlen lett volna egy TESTO műszerrel, mivel egy mérés ideje átlagosan 60-120 másodperc. A SZIE Növénytermesztési Intézet rendelkezésemre bocsátott egy azonos típusú TESTO műszert, ezért mindkettővel párhuzamosan végeztük a méréseket. A mérés kezdetén elvégeztük a műszerek összehasonlító kalibrációját. Ez alapján megállapítottuk, hogy a két műszer eltérése egymáshoz képest, jóval a gyárilag megadott +/- 5%-os hibahatáron belül volt, amelyet elfogadhatónak tekintettem.

3.5.2. A mérőkamrák kialakítása

3.5.2.1. A rövid időtartamú méréssorozatok kamrakialakítása

Az első és második méréssorozatok (3.1. táblázat, 1. és 2. mérés) alkalmával a méréseket 8,3 dm³ térfogatú, csonkakúp alakú, polietilén anyagú edényekkel végeztük. A mérések célja a különböző művelési eljárásokat követő, az aggregátumok aprózódása miatt diffúziós jelleggel bekövetkező, impulzusszerű kibocsátás összehasonlító vizsgálata volt. Ezért a kamrák a mérés teljes időtartama alatt nem kerültek elmozdításra. Az inkubációs idő 1,5-4 óra volt. A mérések során szerzett tapasztalatok azt mutatták, hogy a szakirodalomban is megtalálható feljegyzésekkel összhangban az alkalmazott módszer, amely során a mérőedényeket a mérés végéig nem ürítjük, az esetleges telítődés és a talaj mikroklimájára gyakorolt hatás miatt nem alkalmas a megbízható adatokat adó, hosszabb időtartamú (>4 óra) mérések elvégzésére.

3.5.2.2. A közepes időtartamú méréssorozatok kamrakialakítása

Az előzőek miatt, az első közepes időtartamú méréssorozat során (3.2. táblázat, 10. mérés), amikor a művelés után megváltozott biotikus reakciók eredményeként kibocsátott CO₂ kibocsátás folyamatát is vizsgálni kívántam, kétféle mérési eljárást alkalmaztam. A mérőedények egyik felénél a korábbi, hosszú inkubációs idejű módszert alkalmaztam, és a mérőedényeket a mérés teljes időtartama alatt nem mozdítottam el (kumulált mérési eljárás). A mérőkamrák másik felénél, a mérések között szellőztettem a mérőedényeket (ürítéses mérési eljárás).

Az ürítéses mérési eljárás esetében az egyszerűbb mérőkamra kialakítás és a nagyobb számú mérőpont mellett döntöttem. Elsődleges szempont volt, a művelés utáni kibocsátás időbeli lefolyásának, a természetes folyamatokba történő minimális beavatkozással történő mérése, a vizsgált terület átlagos kibocsátásának (térbeli heterogenitások) figyelembe vételével. A mérőkamrákat, minden mérés alkalmával más-más, véletlenszerűen kiválasztott mérési ponton, talajba süllyesztve helyeztem el, így minden egyes mérőpont esetében biztosított, hogy mérés megkezdéséig, nem történik beavatkozás a természetes folyamatokba és a mért értékek a valós, a művelésre természetes körülmények között jellemző emissziós értékeket adják meg. Ez viszonylag gyakori mérést és nagyszámú mérőpontot követel. Továbbá így a vizsgált területen található természetstechnológiai hiányosságok (pl.: permetezőgép kimosás, hidraulikus rendszer meghibásodás), vagy egyéb, a mérőterület csak elenyésző (és nem reprezentatív) részét jellemző anomáliák helyén kijelölt mérőpontban csak egy hibás mérés torzíthatja a mért adatokat. Amennyiben a hosszú időtartamú mérések során, azonos mérőpontokon történik a mérés, és ezek egyike ilyen területre esik, az a mért

eredmények átlagolása ellenére is hibás következtetésekre vezethet.

Az üritéses mérések esetén minden méréssorozat előtt szükség van a környezeti levegő CO₂ koncentrációjának feljegyzésére is, mivel a vizsgált terület CO₂ kibocsátása, főként gyenge légmozgások esetén, megváltoztatja a terület feletti levegő összetételét. Így a szellőztetett kamrák CO₂ koncentrációja, az inkubációs idő kezdetén, a mérőterület feletti légköri koncentrációval egyezik meg. Ezért a kamrák kihelyezésekor, minden méréssorozat első lépéseként, a korábbi gyakorlathoz hasonlóan, a mérőterület felett körülbelül 1 m-es magasságban mértük a légköri CO₂ koncentrációt, amely alapján az üritett edényeknél pontosabban nyomon követhető volt az inkubációs idő alatti koncentráció változás.

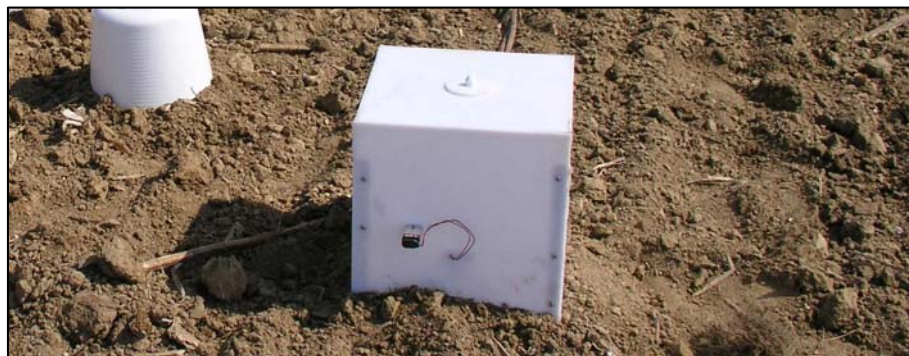
A mérőkamra továbbfejlesztését főként a hosszú inkubációs idejű kamráknál tapasztalt mérési anomáliák miatt tartottam fontosnak. Az inkubációs idő növelése a művelést követő 1-5 órás időszakban, a viszonylag sűrűn elvégzett koncentrációmérések miatt jelentősen megkönnyítené a mérések elvégzését, mert rövid inkubációs idő esetén, a kamrák elhelyezése miatt nagyon feszített tempójúak a mérések. Ezért, a nagyobb aggregátum méretet eredményező művelések miatt, a kamra által lefedett terület növelése mellett döntöttem. Ezért további vizsgálatokat végeztem azzal kapcsolatban, hogy a szakirodalmi ajánlásokban megfogalmazott irányelvek segítségével növelhető-e a mérés pontossága és az inkubációs idő. Az általam megfogalmazott legfontosabb szempontok a következők voltak:

- A kamra a lehető legkisebb mértékben melegedjen fel a napsugárzástól és minimális mértékben engedje át a fény infravörös tartományát. Ellenkező esetben a kamra könnyen „mini-üvegházként” is funkcionál, ami rövid inkubációs idő alatt, a kamra levegőjének felmelegedése következtében, jelentős beavatkozást jelenthet a mért terület mikro-klimájába. Ezért a kamra külső burkolatának nem áttetsző, fehér színűnek vagy reflektív anyagnak kell lennie.
- A felhasznált anyagok nem léphetnek reakcióba, és nem nyelhetik el a légköri és a talajból emittált gázokat. Ezért a kamrát nem reaktív anyagok felhasználásával kell elkészíteni (rozsdamentes, saválló acél, alumínium, PVC, polypropilén, polyetilén, vagy plexi).
- A mérési pontosságot növeli, ha a kamra és a mintavételi terület méretét is növeljük. A mintavételi terület növelésével nagyobb terület átlagos kibocsátását tudjuk mérni, a kamratérfogat növelésével pedig nagyobb térfogatban tudnak eloszlni az emittált gázok, így azonos mértékű kibocsátás esetén, a magasabb kamrában alacsonyabb a CO₂ koncentráció, ami kevésbé befolyásolja a kibocsátást. A kamra méretének meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a kamrák könnyen szállíthatók legyenek.
- A nagyobb kamrák esetén a kamralevegő koncentrációmérése pontosabbá tehető, amennyiben a kamrákat légkeveréssel látjuk el, mivel így biztosított a gázok egyenletes elkeveredése. A légkeverés azonban csak minimális nyomásváltozást okozhat a kamra belsejében, különben megváltoztatja a kibocsátott CO₂ mennyiségét.

A fentiek figyelembe vételével új kamrákat terveztem és gyártottam le. Az új mérőkamrák alakját négyzet alapú hasábnak választottam, méretét 300x300x350 mm-ben határoztam meg. Anyaga polimetil-metakrilát (PMMA). A kamra alsó 50mm-es részét a mérések során a talajba kell nyomni. A kamra által lefedett mintavételi terület 104,5 %-kal 0,09 m²-re nőtt, a kamratérfogat pedig 255%-kal 0,027 m³-re.

3.6. táblázat. A mérőkamrák geometriai jellemzőinek összefoglalása

Mérőkamra típusa	Kamra által lefedett terület [m ²]	Kamra térfogata [m ³]	Térfogat – felület arány
Csonkakúp alakú mérőkamra	0,044	0,0076	0,171
Hasáb alakú mérőkamra	0,09	0,027	0,3

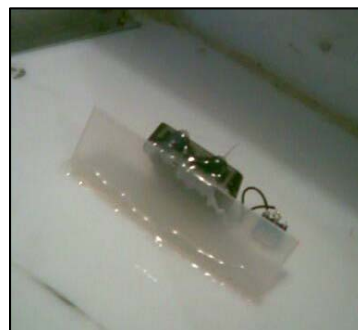


3.19. ábra. Hasáb alakú cella elhelyezése a mérőterületen

A kamrákba a jelentősen megnőtt térfogat-felület arány (3.6. táblázat.) miatt SUNON típusú, 40x40x10 mm-es, 45°-os szögben elhelyezett ventilátorokat szereltem a kamra aljától 100 mm-es magasságban, amelyek a kamra alsó részétől, a kamra felső része felé mozgatják a levegőt. Annak érdekében, hogy a ventilátorok szívó oldali nyomáscsökkenése ne befolyásolja a kibocsátást, a 3.20.-3.21. ábrákon látható légterelőket építettem be, amelyek megakadályozzák, hogy közvetlenül a talajfelszín felett negatív nyomás keletkezzen. A ventilátorok üzemi feszültsége 12 V, üzemi fordulatszáma 4500 1/perc, amely mellett a névleges térfogatáram 0,15 m³/perc. A légsebesség és az esetleges nyomásnövekedés csökkentésére, a névelegesnél alacsonyabb feszültségen, 9V-os alkáli elemekről üzemeltettem a ventilátorokat.



3.20. ábra. A csonkakúp alakú mérőcellánál alkalmazott légkeverő beépítése



3.21. ábra. A hasáb alakú mérőcellánál alkalmazott légkeverő beépítése

A csonkakúp alakú mérőkamrák esetében összehasonlító vizsgálatot végeztem, amelyben a ventilátorral ellátott és a ventilátor nélküli mérőkamrák mért értékeit hasonlítottam össze. Az összehasonlító vizsgálat célja annak megállapítása volt, hogy a korábbi, ventilátor nélküli kamrákkal végzett mérések összevethetők-e a ventilátorral ellátott kamrák mérési eredményeivel.

Az elkészült hasáb alakú mérőkamrák tömítettségének ellenőrzését, a ventilátor beépítés előtt vízbe merítéssel végeztem el. A kamra tetején, a mérőműszer behelyezésére szolgáló nyílást lezártam és a kamrát teljes egészében víz alá merítettem, amely 27,81 Pa-os nyomáspróbának felel meg. Ez a viszonylag csekély nyomás a szántóföldi mérések során a mérőkamrában elképzelhetetlen. Amennyiben a nyomáspróba során a kamra oldalán és illesztéseinél buborékképződést nem tapasztaltam, a kamrákat szivárgásmentesnek ítéltam.

A Mésztegyő „T1” területen végzett 7. mérés (3.1. táblázat, 7. mérés), valamint a Mésztegyő „H1” területeken végzett 8. mérés (3.1. táblázat, 8. mérés) során a művelés utáni kibocsátás vizsgálata

mellett, összehasonlító vizsgálatot végeztem a légkeveréses csonkakúp, a légkeverés nélküli csonkakúp, és a légkeveréses hasáb cellák között (3.22. ábra.).



3.22. ábra. A mérőkamrák elhelyezése az összehasonlító vizsgálat során

A Mesztegyő „T1” területen végzett vizsgálat során homokos vályog talajon, középmedélylazítóval művelt területen, a Mesztegyő „H1” területen agyagos vályog talajon szántóföldi kultivátor munkáját követően hasonlítottam össze a kamrák mérési pontosságát.

3.6. A mérési eredmények értékelése

A természettudományos feladatok megoldásához, a vizsgált jelenségek, folyamatok főbb jellemzői közötti összefüggések ismeretére, azaz modelljére van szükség. Gyakran ezek az összefüggések az általános természeti törvények alapján, elméleti alapon levezethetők. Vannak azonban olyan esetek is, amikor ilyen összefüggések közvetlenül nem, vagy csak részben ismertek. Ilyenkor közvetlen, tapasztalati ismeretekre kell támaszkodnunk. A tapasztalati ismeretekből történő információ kinyerésével és ennek alapján történő modellalkotással a mesterséges tanulás elmélete foglalkozik. Ide tartozik a mintákon történő tanulás módszerével történő modellalkotás, az az eset, amikor nagyszámú mérési vagy egyéb tapasztalati adat áll rendelkezésünkre és ezen adatok közötti kapcsolatokat kell modell formájában meghatározni. A keresett modellt egy függvénnyel reprezentáljuk. A függvény típusát, formáját felvesszük, kiválasztjuk, majd a függvényben szereplő paramétereket úgy határozzuk meg az adatok alapján, hogy azok legjobb közelítését kapjuk (PALÁNCZ, 2011).

3.6.1. A kibocsátott CO₂ mennyiségének meghatározása

A mérőkamrákban az inkubációs idő végén mért CO₂ koncentrációkat a TESTO műszer [ppm]-ben adja meg, amely SI mértékegységben értelmezve [$\mu\text{mol/mol}$]. A mért értékek önmagukban csak az azonos időpontban és körülmények között, a különböző mérőpontokban mért értékek összehasonlítására használhatók, nem jellemzik a talaj CO₂ kibocsátásának intenzitását, mivel az intenzitás [$\text{g/m}^2/\text{h}^{-1}$] mértékegységben, a mért értéken felül függ a:

- kamra alatti mintavételi területtől,
- a kamra térfogatától,
- a kamralevegő hőmérsékletétől és az
- inkubációs időtől.

A kamrákban mért koncentráció átszámítását az alábbi formula szerint végeztem MEYER *et al.* (1987), WIDÉN és LINDROTH (2003) alapján:

$$F_{CO_2} = \frac{dC}{dt} \frac{VpM}{R(273,15+T)A}, \quad (3.1)$$

ahol:

F_{CO_2} - CO₂ kibocsátás intenzitása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,

dt - a mérés időtartama [óra],

dC - a mérőkamra koncentráció változása az inkubációs idő alatt $\left[\frac{mol}{mol}\right]$,

V - a mérőkamra térfogata [m^3],

p - légnyomás [Pa],

M - CO₂ moláris tömege = 44,01 $\left[\frac{g}{mol}\right]$,

R - egyetemes gázállandó = 8,314 $\left[\frac{J}{mol*K}\right]$,

T - környezeti hőmérséklet [$^{\circ}C$],

A - a mérőkamra által lefedett terület [m^2].

A mért értékek (3.1) egyenletbe történő behelyettesítéséhez, a mért értékek átváltását az egyenlet szerinti [mol/mol] mértékegységre a következő egyenlet szerint végeztem:

$$C_{\left[\frac{mol}{mol}\right]} = \frac{C_{ppm\left[\frac{\mu mol}{mol}\right]}}{1*10^6}, \quad (3.2)$$

ahol:

$C_{\left[\frac{mol}{mol}\right]}$ - CO₂ koncentráció $\left[\frac{mol}{mol}\right]$,

$C_{ppm\left[\frac{\mu mol}{mol}\right]}$ - CO₂ koncentráció $\left[\frac{\mu mol}{mol}\right]$.

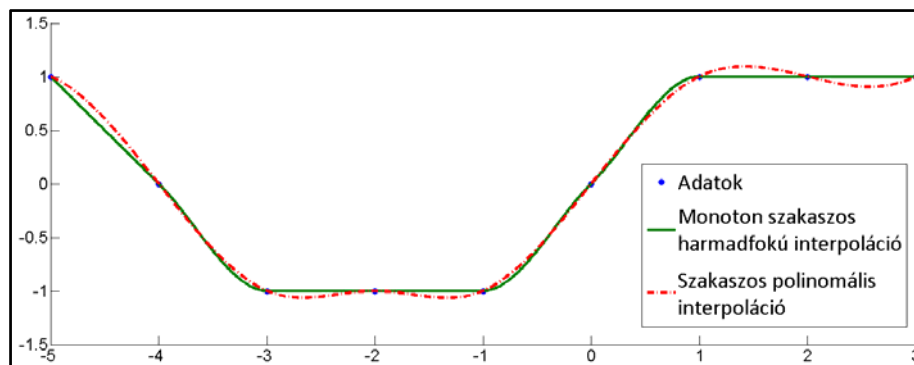
3.6.2. A mért értékek interpolálása

A talaj CO₂ kibocsátásának intenzitása időben folyamatosan változó folyamat, amely pontos leképezése minden esetben diszkrét időpontokban elvégzett mérések alapján történik. A mérési eredmények időbeni felbontása a mérés típusa (rövid vagy közepes időtartamú) és a vizsgálati idő függvényében, a mérőműszer mérési időszükséglete és a mintavételi idő alapján, a mérések során változó.

A mintavételi időközöket a kezdeti méréseknél a kibocsátás valószínűsíthető intenzitása, majd a mérési tapasztalatok alapján a kibocsátás reprezentálásának optimalizálására törekedve igyekeztem meghatározni. A művelést követő 3-5 órás időszakban a legintenzívebb a kibocsátás. Ennek megfelelően az intenzitás változása is nagyobb mértékű lehet. Ebben az időszakban minimalizáltam a mérések közötti időt, noha ezt a minimális inkubációs idő, a kamrák száma, valamint a pillanatnyi kamrakoncentráció mérésének időszükséglete behatárolja. A mérés időszükségletét a TESTO műszer esetében főként az határozza meg, hogy a pontos méréshez, a mérőfejnek alkalmazkodnia kell a kamra atmoszférához, amely tapasztalataim alapján 60-90 másodperc a környezeti levegő hőmérsékletétől függően.

Az előzőek miatt a mérési eredmények az idő függvényében nem egyenletes eloszlású diszkrét értékek. A kibocsátási modell és a talajművelési eljárások hatására emittált CO₂ mennyiségének meghatározásához szükség van a mért értékek interpolálására. A mért adatok közötti értékek meghatározását alaktartó, monoton szakaszos harmadfokú interpolációval (FRITSCH és CARLSON, 1980) végeztem. Ez az eljárás a lineáris interpolációnál jóval pontosabb és valóságosabb eredményt ad és a gyakran használt polinómális interpolációval (spline közelítés) ellentétben pontosan lekövethetők a monoton lineáris szakaszok. Az alaktartó monoton szakaszos harmadfokú interpoláció fő előnye, hogy alaktartó módon illeszti a mérési pontokra a harmadfokú Hermite-polinomokat, így

az interpolált értékek lokálisan nem futnak túl az eredetileg megadott értékeken, vagyis amennyiben lineáris interpoláció esetén az eredeti érték lokális minimum vagy maximum, az interpolált adatok esetében is az lesz (MOLER, 2004). A két eljárás közötti különbséget a 3.23. ábrán látható példán mutatom be. A két görbe numerikus integrálja közötti különbség elhanyagolható ugyan (<2%), viszont a normál spline közelítés, a nem alaktartó tulajdonsága miatt, a CO₂ kibocsátás esetén valószerűtlen görbelefutást eredményez. Így a mérési eredmények közelítésére kevésbé alkalmas.



3.23. ábra. A különböző interpolációs algoritmusok összehasonlítása. (MOLER, 2004) alapján

A mért értékek bemutatására a következő fejezetekben több esetben lineáris vagy polinómális interpolációt is használok, de csak akkor, ha a diagramok célja az adatok reprezentálása, vagy a trendek bemutatása.

3.6.3. A kibocsátás modellezésének alapjai

A mért adatok közelítésének alapvető igénye, hogy a közelítő függvény univerzális approximátor legyen, vagyis a mért adatokat tetszőlegesen kicsi hibával leírja. A legalapvetőbb módszer a mérési adatok pontos leírására a polinómális közelítés. Azonban az analóg természeti jelenségek mért adatainak feldolgozásakor minden esetben számolni kell azzal, hogy a mérési eljárás többé vagy kevésbé, de hatással van a vizsgált jelenségre és így a mérési adatok hibával terheltek. A polinómális közelítés szélsőséges esetben alkalmas arra, hogy a mért adatokat tökéletesen lekövesse. A folyamatok leírására alkalmazott matematikai modellekkel szemben alapvető elvárás, hogy ne tanulják meg a biológiai rendszerek vizsgálata esetében, az inhomogenitásból adódó mérési hibákat, hanem a jelenségeket inkább a természeti törvények alapján közelítsék meg (PALÁNCZ, 2011).

Ennek értelmében a talajművelést követő CO₂ kibocsátás vizsgálatának fő célja az emissziós folyamat matematikai törvényszerűségeinek felismerése az általános természeti törvények alapján, amely így lehetővé teszi, hogy a későbbiekben a kibocsátási modell jellemző szakaszaiban történő viszonylag rövid mérések elvégzésével a művelést követő kibocsátás jó közelítéssel leírható.

Bolygatatlan talajok esetében a CO₂ kibocsátást főként a talaj hőmérséklet ingadozása befolyásolja. A művelés hatására megváltozó talaj CO₂ kibocsátás időben változó folyamatának lezajlását több folyamat együttes hatása eredményezi. Ezek egyrészt a művelés hatására, a talajban raktározott CO₂ hirtelen feltáródása, másrészt a műveléssel a talajba kevert oxigén által katalizált enzimek reakciói, harmadrészt pedig a talaj hőmérsékletének változásai által módosult sebességű enzimek reakciói.

A talajban raktározott CO₂ mennyiségét számos, főként talajtulajdonságokkal, környezeti hatásokkal összefüggő tényező befolyásolja. A művelés hatására, bekövetkező hirtelen feltáródásából adódó, a művelés pillanatában bekövetkező kibocsátást alapvetően a talajaggregátumok aprózódása, a pórustér fogat megváltozása eredményezi, amelynek determinisztikus leírására jelenleg nem léteznek matematikai modellek, azonban az oxigén bekeverés hatására felgyorsuló enzimek reakció folyamatára, és a hőmérséklet reakciósebességre gyakorolt hatását leíró modellek ismertek.

3.6.3.1. Reakciókinetikai közelítés

Fontos biológiai elv, hogy minden biológiai folyamat tartalmaz véletlenszerű vagy legalábbis általunk bizonytalanul ismert jelenségeket, tehát alapvetően sztochasztikus viselkedésű. Ennek ellenére gyakoribb a determinisztikus leírások használata, mivel a sztochasztikus megközelítések is várható értékben egy-egy determinisztikus leírást adnak (SEVELLA, 2011).

A művelés hatására a talajban feldúsult oxigén az aerob baktériumokban enzimreakciókat indít be, és felgyorsítja a baktériumok oxigénabszorpciós folyamatait. Az enzimek által katalizált reakciók kinetikáját jellemzően a Michaelis-Menten kinetikával szokás jellemezni, amely sztöchiometriai egyenlete a következő (NYESTE, 1988):



ahol:

- S - szubsztrát,
- E - enzim,
- ES - enzimszubsztrát komplex,
- P - végtermék.

A (3.3.) egyenlet alapján négy szimultán differenciálegyenlet írható fel, amelyek közül az alapanyagot és a végterméket érintő egyenletek a talaj CO₂ kibocsátásának vonatkozásában használt változók behelyettesítésével a következők:

$$\frac{dC_{CO_2}(t)}{dt} = k_2 [C_{talaj} - C_{CO_2}(t)], \quad (3.4)$$

$$\frac{dC_{talaj}(t)}{dt} = -k_1 C_{talaj}(t), \quad (3.5)$$

ahol:

- C_{CO_2} - talaj CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
- t - idő [h],
- k_2 - paraméter [-],
- C_{talaj} - talaj mobilizálható szén tartalma $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,
- k_1 - paraméter [-].

A (3.4) és a (3.5) egyenletek megoldása a (3.6) és a (3.7) egyenletek:

$$C_{CO_2}(t) = C_{talaj} - C_{0CO_2} e^{-k_2 t}, \quad (3.6)$$

$$C_{talaj}(t) = C_0 e^{-k_1 t}, \quad (3.7)$$

ahol:

- C_{CO_2} - talaj CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
- C_{talaj} - talaj mobilizálható szén tartalma $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,
- t - idő [h],
- k_2 - paraméter [-],
- C_0 - talaj kezdeti mobilizálható szén tartalma $\left[\frac{g}{m^2}\right]$,
- C_{0CO_2} - talaj kezdeti CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
- k_1 - paraméter [-].

Jól látható, hogy mind a végtermék képződés, mind pedig az alapanyag mennyiségének csökkenése exponenciális jellegű, vagyis a kibocsátást leíró modellben is exponenciális közelítést célszerű használni.

3.6.3.2. A hőmérsékletváltozás hatásának figyelembe vétele

A mért adatok közelítésének egyik fontos szempontja a felszíni hőmérséklet hatásának és jellegének figyelembe vétele, mivel az enzimek reakciók sebességét a hőmérséklet jelentősen befolyásolja. Ugyanakkor a hőmérséklet direkt hatásának, hőmérsékletfüggő változóval való követése nem indokolt. A különböző környezeti hatások és talajadottságok által befolyásolt, mérésel meghatározható kibocsátási értékek már tartalmazzák a hőmérséklet paramétert, mivel a kibocsátás, a katalizált enzimkinetikai reakció várható dominanciája mellett, a hőmérséklet függvénye is. A mérési eredményekre történő, a hőmérséklet napi változásának jellegét figyelembe vevő modell illesztésével, a kibocsátás leírása pontosabb eredményt ad.

A Föld felszíni hőmérsékletét napi és éves periódusban periodicitás jellemzi, amely a Nap horizont feletti magasságának függvényében változik. A napsugárzást jellemző hőáramsűrűség intenzitásától függően vagy a hő felvétel, vagy pedig a hő leadás kerül túlsúlyba. A felszíni hőmérséklet változása VÖLGYESI (1982) alapján az alábbi függvénnyel írható le:

$$T = T_0 + A \sin \frac{2\pi}{t_0} t, \quad (3.8)$$

ahol:

- T - felszíni hőmérséklet [$^{\circ}C$],
- T_0 - napi vagy éves középhőmérséklet [$^{\circ}C$],
- A - a hőmérsékletváltozás amplitúdója [$^{\circ}C$],
- t_0 - a periódus hossza (24 óra, vagy 365 nap*24 óra) [h],
- t - idő [h].

A CO₂ kibocsátást leíró modellekben a légköri hőmérséklet helyett a talajhőmérséklet használata indokolt, mivel ennek van közvetlen hatása az enzimek reakciók sebességére. A talajhőmérséklet napi és éves ingadozása a felszín közeli levegő hőmérséklet ingadozásához hasonló, azonban amplitúdójában, középhőmérsékletében is eltér és ez mellett a levegő hőmérsékletéhez képest fáziseltolódás is tapasztalható. A talaj CO₂ kibocsátást leíró modellnek ezért a fenti (3.8.) egyenlet leírása mellett, célszerű tartalmaznia a fáziseltolódásra utaló tagot is:

$$T = T_0 + A \sin \left(\frac{2\pi}{t_0} t + \beta \right), \quad (3.9)$$

ahol:

- T - talajhőmérséklet adott mélységben [$^{\circ}C$],
- T_0 - talaj középhőmérséklet [$^{\circ}C$],
- A - a talajhőmérséklet változás amplitúdója [$^{\circ}C$],
- t_0 - a periódus hossza (24óra, vagy 365 nap*24 óra) [h],
- t - idő [h],
- β - fáziseltolódás [h].

Az előzőekben bemutatott összefüggések felhasználásával dolgoztam ki a kibocsátási modellt, és végeztem el a mért adatok regresszió analízisét. Az eredményeket a következő fejezetben ismertetem.

4. EREDMÉNYEK

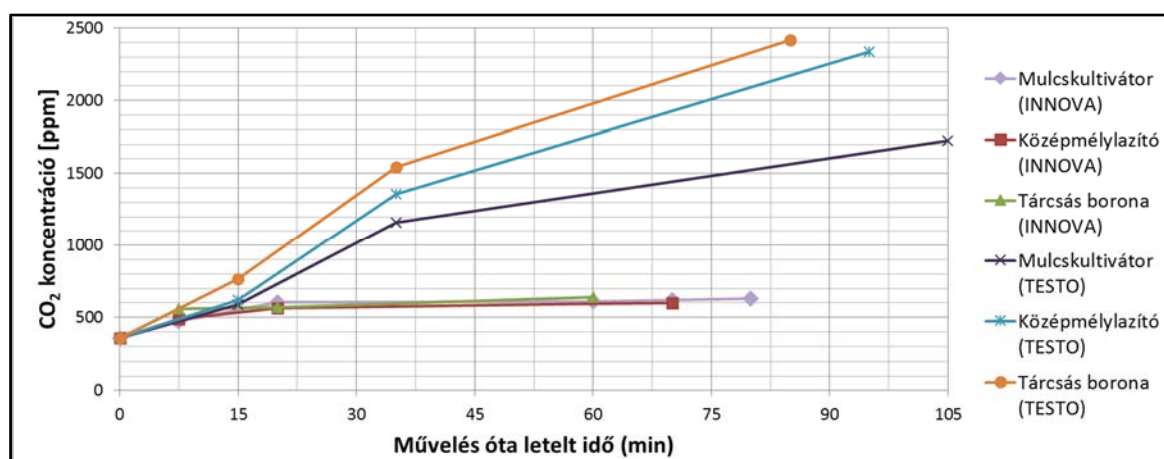
A kutatási hipotézisben megfogalmazott célkitűzések megvalósítását, az előző fejezetben ismertetett vizsgálati tematika szerint, a bemutatott módszertan alkalmazásával, az ismertetett eszközök és mérőműszerek segítségével hajtottam végre. Ebben a fejezetben a mérési eredményeket, az adatfeldolgozás eredményét, következtetéseit, valamint az új tudományos eredményeket mutatom be.

4.1. A mérési eljárások összehasonlító méréseinek eredményei

A kutatás egyik alapvető célkitűzése, a talaj CO₂ kibocsátásának mérésére rugalmasan alkalmazható, megbízható mérési eljárás kidolgozása volt. Az előző fejezetben bemutatott mérőeszközökkel és mérési eljárásokkal végzett mérések eredményeinek összehasonlítását és validálását kívánom ebben a fejezetben bemutatni.

4.1.1. A különböző mérőrendszerek összehasonlítása

A TESTO és INNOVA mérőműszerek összehasonlító vizsgálata (3.1. táblázat, 1. mérés) során mért értékeket a 4.1. ábrán mutatom be.

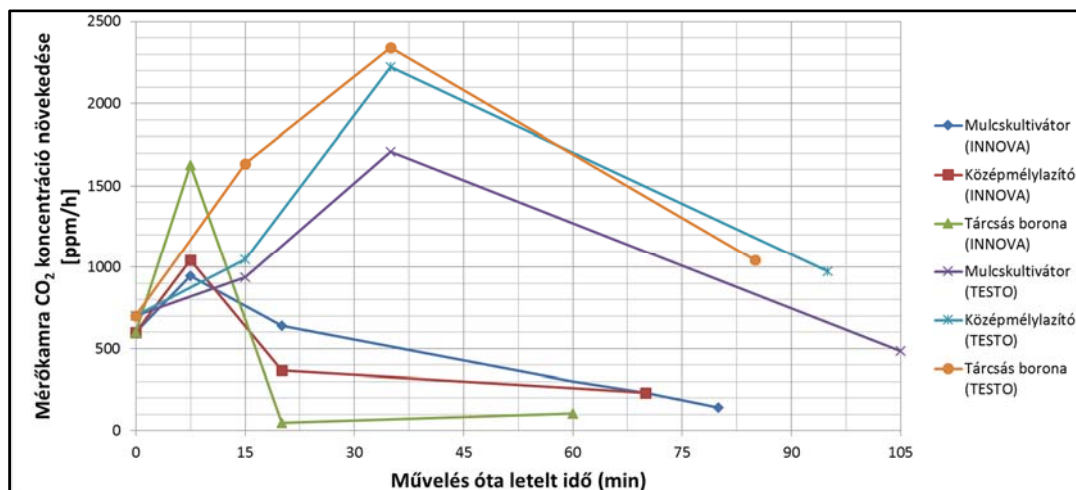


4.1. ábra. A talaj CO₂ emissziójának mért értékei különböző művelések után

A 4.1. ábra alapján megállapítható, hogy az első mérési időpontig a kamrakoncentráció a két műszerrel mért értékek alapján mindhárom vizsgált mintaterület esetében hasonló meredekséggel emelkedik. Ez arra enged következtetni, hogy mindkét műszerrel, azonos pontossággal határozható meg a talaj CO₂ kibocsátása.

Az első mérési időpontot követően azonban a mért értékek alapján a kamrakoncentráció emelkedése a két műszer esetében teljesen eltérő mértéket mutat. A szakirodalom alapján a hosszú inkubációs idejű kamrák esetében a művelés utáni néhány órás időszakban a kamrakoncentráció emelkedése várható, de csak a TESTO műszerrel mért értékek felelnek meg ennek a trendnek. Az INNOVA műszer által mért értékek alapján a kultivátorozott és a lazított terület esetében, a kamrakoncentráció már az első mérés után is csak nagyon kis mértékben növekszik, míg a tárcsázott területen elhelyezett mérőkamrákban a szén-dioxid koncentráció csökkenése mérhető, ami valószínűtlen és mérési hibának tekinthető. A kamra gázkoncentrációjának csökkenése és stagnálása valószínűleg a mérési elvből adódó légcserére vezethető vissza, mivel az INNOVA műszer esetében a méréshez a kamra levegőjének jelentős részét ki kell szivattyúzni, jelentősen megváltozhat a mérés hatására a kamra levegőjének CO₂ koncentrációja.

Még jelentősebb eltéréseket fedezhető fel, ha megvizsgáljuk a mérőkamrákban a CO₂ koncentráció, mért értékek alapján számított növekedésének sebességét (4.2. ábra.), amely a kibocsátás intenzitására visszavezethető információt ad. A TESTO műszerrel a szakirodalomnak megfelelő intenzitásváltozást mértünk, míg az INNOVA műszer által mért értékek alapján, ugyanazokon a mérőterületeken az első mérési időpont után, ellentétes intenzitású kibocsátást tapasztaltam.



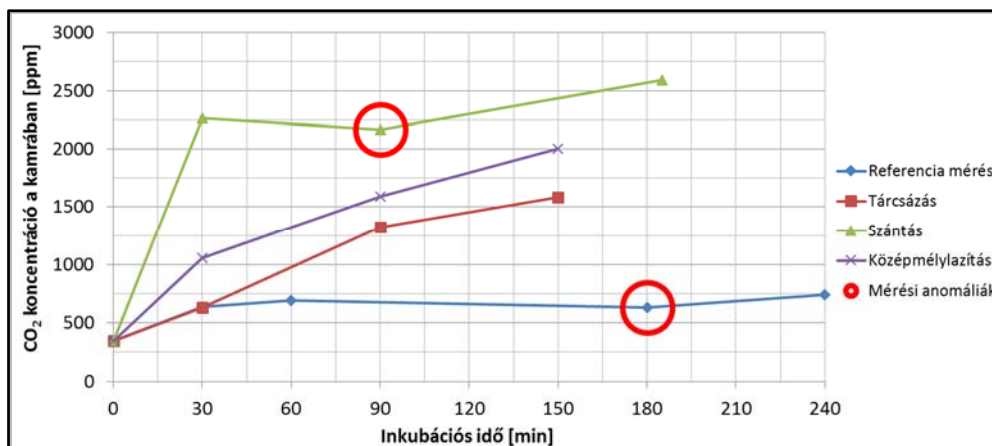
4.2. ábra. A mérőkamrák CO₂ koncentráció növekedésének sebessége a különböző mérőműszerek és művelések esetén az idő függvényében

A fentiek igazolták azon döntésemet, hogy az INNOVA mérőrendszer esetében tapasztalt anomáliák miatt a további méréseket, a megbízhatóbb mérési eredményeket nyújtó, könnyű, gyors és alacsony költségű TESTO 535 műszerrel végzem, az INNOVA rendszerrel mért adatokat hibás mérésnek tekintem, és figyelmen kívül hagyom.

4.1.2. A kumulált és az üritéses mérési eljárás összehasonlítása

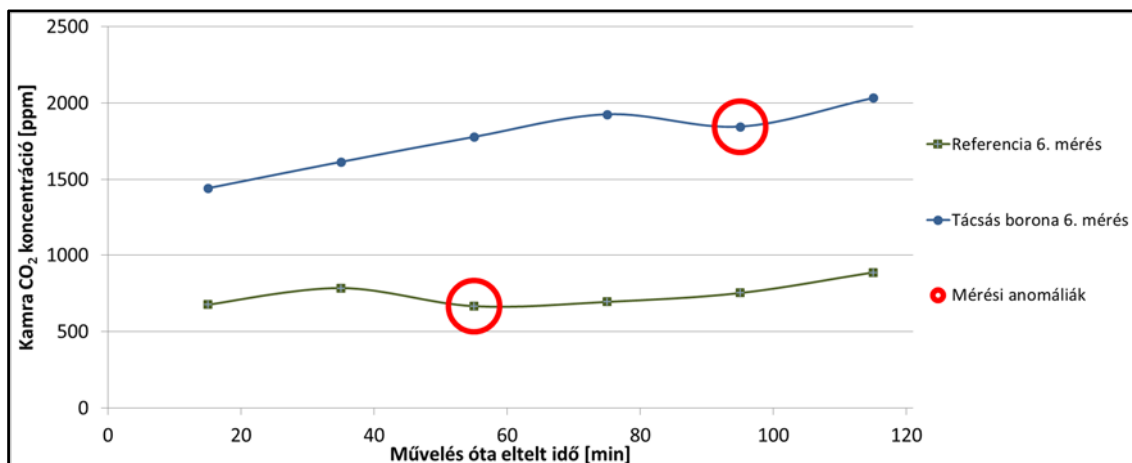
A 2. mérés során (3.1. táblázat, 2. mérés) mért értékeket a 4.3. ábrán mutatom be az inkubációs idő függvényében. A különböző parcellák esetében az egyes művelések emisszió szerinti sorrendje megfelel az egyes művelések talajbolygatásból következő intenzitásának. A szántott terület kibocsátása a legintenzívebb, majd ezt követi a középmélylazítás, a tárcsázás és a műveletlen terület.

A tárcsás boronával és a középmélylazítóval művelt parcellák esetében a mért értékek követik az elméleti trendeket, mivel minden mérési időpontban a kamrában növekszik a CO₂ koncentráció. A műveletlen parcella (referencia mérés) és a szántott terület esetében, viszont a mérési anomáliaként megjelölt mérési időpontokban a kamrában csökkent a mért CO₂ koncentráció. Ez a jelenség elméletileg nem lehetséges, amennyiben a kamra által letakart területet a vizsgált parcella reprezentációjának tekintjük, mivel a kibocsátás csak pozitív, vagy zérus lehet. Negatív előjelű kibocsátási érték nem értelmezhető, mivel ebben az esetben a talajnak szén-dioxidot elnyelőnek kellene lennie.



4.3. ábra. Mérési anomáliák a hosszú inkubációs idejű kamrákban (2. mérés)

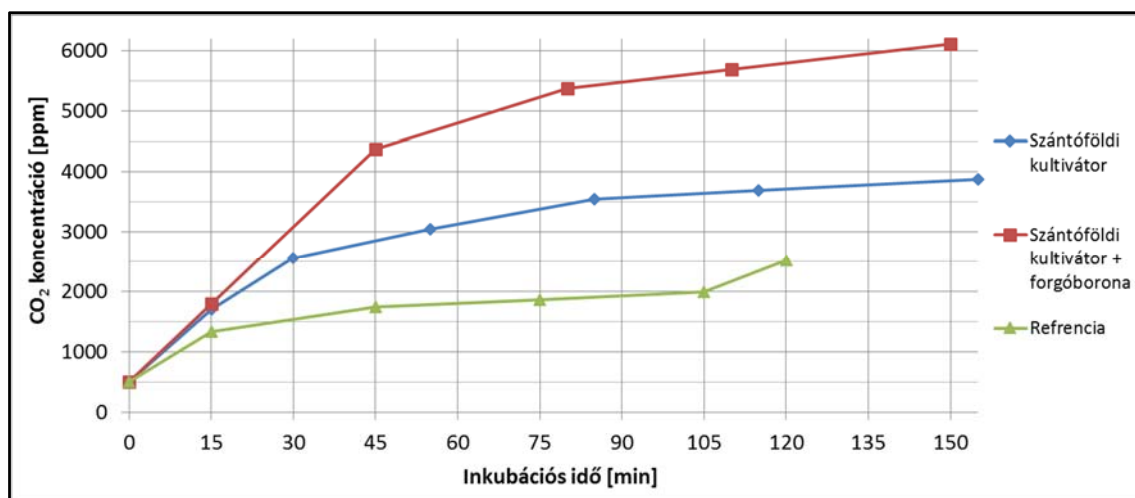
Ugyanezt a jelenséget tapasztaltam a 6. mérés (3.1. táblázat, 6. mérés) mért adatainak elemzése során, a művelt és a műveletlen terület esetében is (4.4. ábra.).



4.4. ábra. A kumulált mérőkamrák kamrakoncentráció változásában bekövetkezett anomáliák (6. mérés)

A jelenség magyarázata valószínűleg az, hogy a vizsgálati parcella feletti légmozgás miatt a kamra körül, a kamrában lévónél kisebb nyomás keletkezett, amely a kamrából a talaj felé áramoltatta a levegőt. Emiatt számszerűen nem értékelhetők azok a mért értékek, amelyek a kamrakoncentráció csökkenése után találhatók, mivel nem ismert, hogy a külső hatások milyen mértékben csökkentették a kamrakoncentrációt.

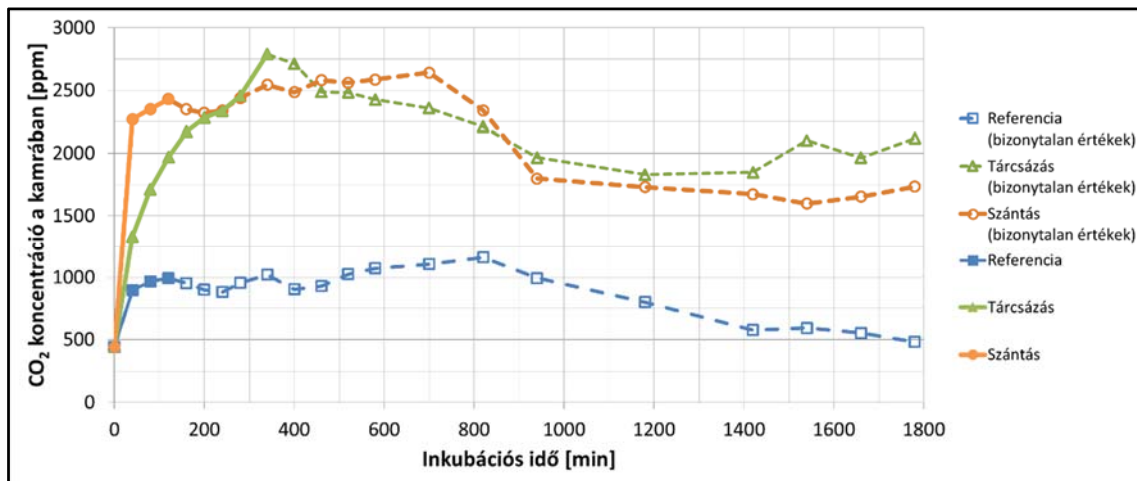
Az 4.5. ábra, a Mesztegyő „A1” mérőterületen végzett vizsgálat során, kumulált mérési eljárással mért értékeket mutatja be. Jól látható, hogy a mérőkamrákban, a hosszú inkubációs idő ellenére, a mérés teljes időtartama alatt nem tapasztalható a koncentráció csökkenése.



4.5. ábra. A mérőkamrák CO₂ koncentrációjának változása az inkubációs idő függvényében (4. mérés)

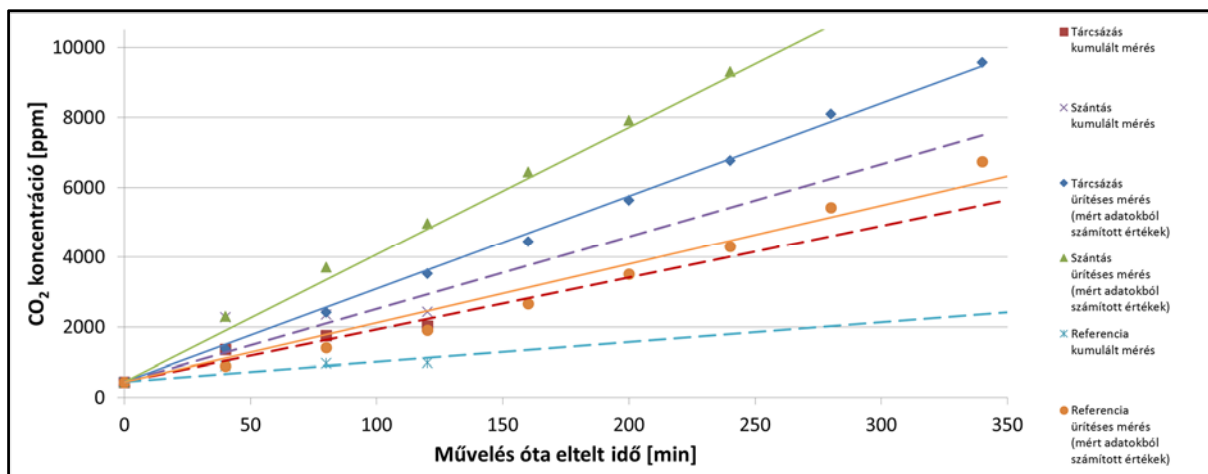
Az első közepes időtartamú mérésnél (3.2. táblázat, 9. mérés) a különböző művelési eljárások CO₂ kibocsátásának összehasonlítása mellett a kumulált és az üritéses mérési eljárás összehasonlító vizsgálatait is elvégeztem. A 4.6. ábra a kumulált mérési eljárással mért értékeket ábrázolja az inkubációs idő függvényében.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a kamrakoncentráció rendellenes csökkenése, a szántott és a referencia terület esetében a 4. mérési pontban, vagyis 120 perc után, míg a tárcsázott terület esetében 340 perc után következik be. Az ábrán az ezen időpontok után mért értékeket pontozott vonallal jelöltem, amely a bizonytalan pontosságú méréseket jelöli.



4.6. ábra. A CO₂ koncentráció az inkubációs idő függvényében a kumulált mérés esetében.

A 4.7. ábra. mutatja a kumulált kamrák koncentrációcsökkenése előtti időszak trendjeit. A kumulált mérési eljárás esetében a mért értékeket ábrázoltam, míg az ürítéses eljárásnál a mért értékekből kivontam a kamra lehelyezésekor mért légköri CO₂ koncentrációt, majd mérési pontonként összegeztem a kapott értékeket. Így az ürítéses kamrák esetében egy elméleti kumulált koncentrációt ábrázoltam, amely már összevethető a kumulált méréssel meghatározott értékekkel. A mért értékeket nulla időpontban mért légköri koncentrációval megegyező pontból kiindulva, lineáris regresszióval közelítettem, azért, hogy a koncentráció növekedés tendenciája látható legyen. Jól látható, hogy a két mérési eljárás értékei között jelentős az eltérés, amely azonos művelések esetén különböző mértékű CO₂ kibocsátást feltételez.



4.7. ábra. A kumulált és az ürítéses mérés összehasonlítása a 9. mérés esetében, a mért adatok lineáris regressziója alapján (az ürítéses eljárás mért adatai kumulatív értékekben megadva)

A 9. mérés esetében az ürítéses és a kumulált mérési eljárás pontjaira illesztett egyenesek meredekségének hányadosa 0,43-0,67. A szántott és a tárcsázott területek esetében a meredekségek hányadosa közel azonos, azonban a referencia terület esetében jóval nagyobb különbség tapasztalható (4.1. táblázat.).

A 9. mérésnél tapasztaltakhoz hasonlóan, a többi összehasonlító mérés esetében is eltérő az illesztett lineáris függvények meredekségének hányadosa (4.1. táblázat.)

4.1. táblázat. A kumulált és az ürítési mérések értékeire illesztett lineáris függvények egyenletei és az ezekből számított értékek eltérése

Mérés száma (3.1.táblázat)	Művelés	Kumulált mérés f_k	Ürítési mérés f_u	Merekségek hányadosa f_k'/f_u'
9.	Szántás	$y = 20,73x + 441$	$y = 36,397x + 441$	0,569
	Tárcsázás	$y = 14,868x + 441$	$y = 26,554x + 441$	0,559
	Referencia	$y = 5,6429x + 441$	$y = 16,816x + 441$	0,335
4.	Szántóföldi kultivátor	$y = 28,088x + 510$	$y = 54,588x + 510$	0,514
	Szántóföldi kultivátor +forgóborona	$y = 46,137x + 510$	$y = 91,65x + 510$	0,503
	Referencia	$y = 16,967x + 510$	$y = 42,045x + 510$	0,403

A mért értékek eltérése ellenére, a különböző művelésekre jellemző közelítő függvények merekségének sorrendje az egyes mérésorozatokon belül, azonos a kumulált és az ürítési mérések esetében is. Ezért a hosszú inkubációs idejű, szellőtetés nélküli mérési eljárás mérési adatai kvantitatív módon nem használhatók a kibocsátott CO₂ mennyiségének meghatározására. Ugyanakkor a mérési eljárások összehasonlítására, a különböző művelések rangsorolására, kizárólag a kamrakoncentráció csökkenéséig figyelembe vett mért adatok alapján, használhatók, amennyiben a művelés azonos időpontban és azonos területen történik.

Megfigyelhető az is, hogy a különböző mérési eljárásokkal mért, kumulatív eredményekre illesztett elsőfokú polinomok merekségeinek hányadosának értéke, valamint a kamrakoncentráció rendellenes csökkenésének bekövetkezése valószínűleg összefüggésben van a jellemző aggregátum mérettel és a légátjárhatósággal.



4.8. ábra. A felszíni aggregátumok *tárcsázás* után vályog talajon (9. mérés)

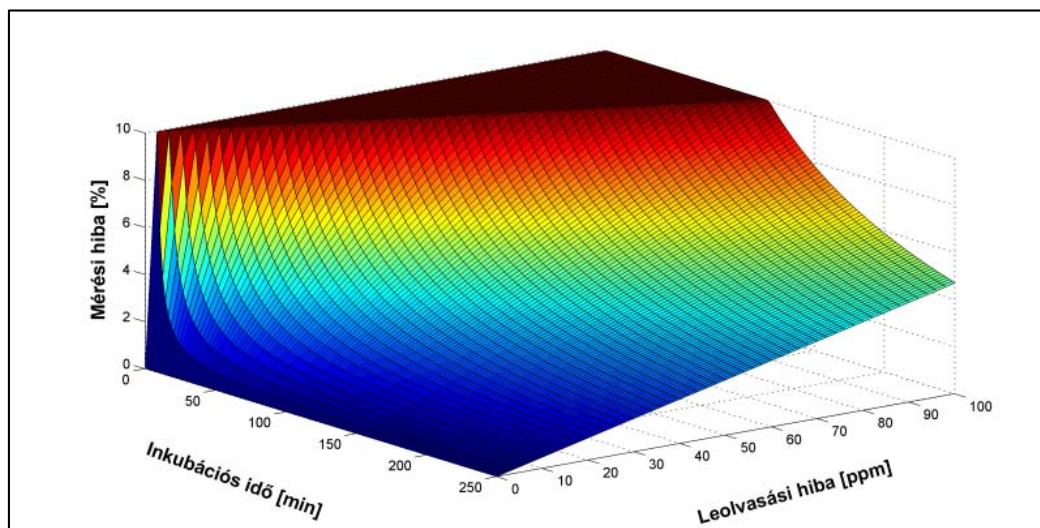


4.9. ábra. A felszíni aggregátumok *szántás* után vályog talajon (9. mérés)

A nagyméretű rögfrakció túlsúlya, illetve tömörítő eszköz hiánya esetén a morzsa és porfrakció nem tölti ki a rögök közti hézagokat (4.8.-4.9. ábrák) így jelentősen megnő a pórustér százalékos aránya, és ezzel a művelt talajban horizontálisan és vertikálisan is nagyobb lesz a légátjárhatóság. Ezért a kamrán kívüli légmozgások, a laza talajon keresztül könnyen hatással lehetnek a kamra levegőjére. Ezért a talajművelés hatásainak vizsgálatokor a talaj és a keletkező aggregátum méret függvényében csökkenteni vagy növelni lehet az inkubációs időt. Erős légmozgások és nagyarányú rögfrakció esetén megfontolandó olyan kamrák használata, amelyek a művelés mélységéig belenyomhatók a talajba. Így csökkenthető a légmozgások hatása, de a kamrák elhelyezése a nagyfokú talajbolygatás és izoláció miatt, jelentősen befolyásolhatja a mérés pontosságát. Ugyanakkor a művelési eljárások hatásának rangsorolására, a talaj mikroklímájára gyakorolt azonos mértékű hatás miatt alkalmas lehet.

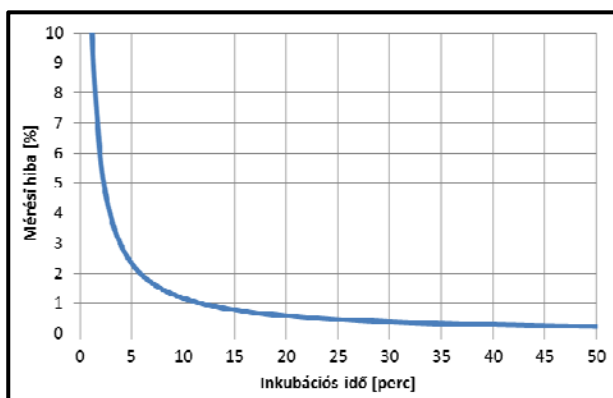
4.1.3. A minimális inkubációs idő meghatározása

Az ürítéses mérési eljárás lehetőséget ad a közepes, vagy hosszabb időtartamú szántóföldi vizsgálatok elvégzésére. Ezeknél a méréseknél a nagyszámú kamra használata az inkubációs idő csökkentését teszi szükségessé. Ugyanakkor a rövidebb inkubációs idő miatt, a leolvasás bizonytalanságából adódó hiba jelentős hatással van a teljes mérési hibára. Emiatt a minimális inkubációs idő meghatározására megvizsgáltam, hogy a kamralevegő CO₂ koncentráció mérésének hibája, hány százalékban befolyásolja a mérési eredményekből számolt kibocsátási intenzitás értékeit. Ehhez a 3.6.1 fejezetben bemutatott számítási eljárást vettem alapul és az egységnyi kamratérfogat és mintavételi felület alapján határoztam meg a mérési hibát. Az eredményeket a 4.10. ábrán szemléltetem.

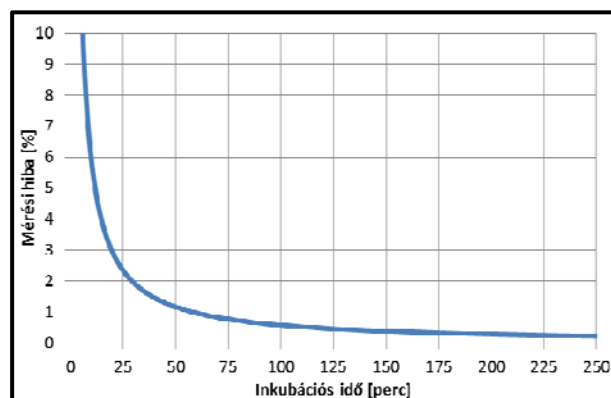


4.10. ábra. A mérési hiba százalékosan a mérőműszer leolvasási hibája és az inkubációs idő függvényében

A mérések tapasztalatai szerint a mérés leolvasási hibája, a folyamatosan növekvő koncentráció miatt, 1-5 ppm közötti tartományba esik. A 4.11.-4.12. ábrák tartalmazzák ezen intervallum szélső értékeihez tartozó számolt eredményeket, amelyek a 4.10. ábra metszetei.



4.11. ábra. A mérési hiba az idő függvényében a mérőkamra 1 ppm koncentráció változása esetén



4.12. ábra. A mérési hiba az idő függvényében a mérőkamra 5 ppm koncentráció változása esetén

Látható, hogy amennyiben a kamrakoncentráció mérési hibájából következő, kibocsátási értékek meghatározásának hibáját 5% alatt kívánom tartani, az inkubációs idő minimális értéke 12 perc. Ezért a minimális inkubációs időt 15 percen határoztam meg.

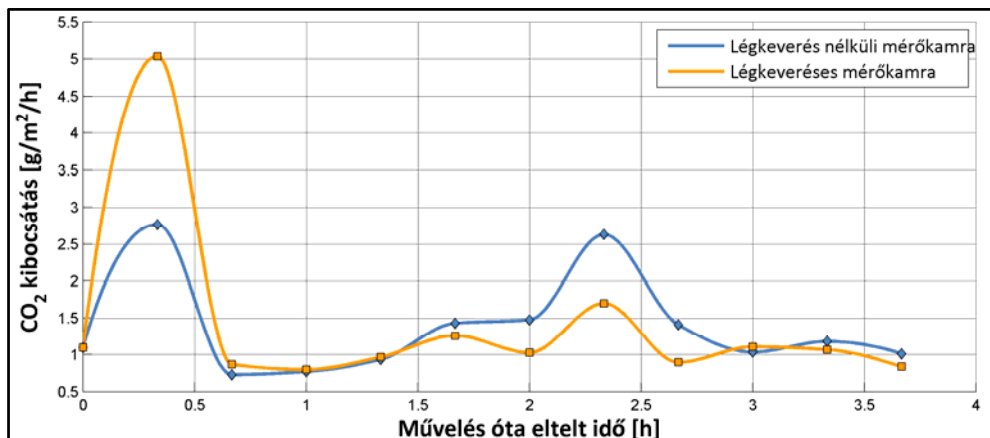
4.1.4. A csonkakúp és a hasáb alakú kamrás mérési eljárás összehasonlítása

A 7. és 8. mérés (3.1. táblázat, 7., 8. mérés) során elvégzett vizsgálatok célja a kamrakialakítás megváltoztatása miatt, a különböző kamrákkal végzett mérések összehasonlíthatóságának feltárása,

amely az adatfeldolgozás során a különböző mérőkamrákkal végzett vizsgálatok mérési adatainak kezelését segítheti.

A 4.13. ábrán mutatom be a légkeveréses és a légkeverés nélküli mérőkamrák által mért adatok alapján meghatározott kibocsátási intenzitás értékeket a 7. mérés adatai alapján.

Az interpolációt a teljes mérési időre vetített 1/10000-es felbontással végeztem, majd numerikus integrálással meghatároztam a görbék alatti területet, amely megadja a kibocsátott CO₂ mennyiségét. Az eredményeket a 4.2. táblázatban összegeztem, amelyek alapján a két kamra által mért értékek alapján a kibocsátott CO₂ mennyisége 4,1%-kal tér el egymástól.

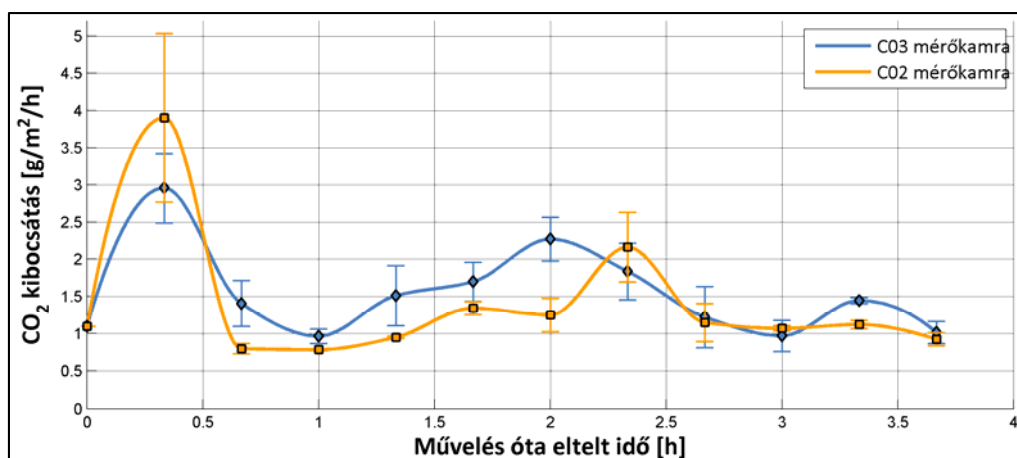


4.13. ábra. A légkeveréses és a légkeverés nélküli, csonkakúp alakú kamrák mérési eredményeinek összehasonlítása

4.2. táblázat. A légkeveréses és a légkeverés nélküli mérőkamrákkal mért kibocsátási adatok összehasonlítása

	Zérus időpont kibocsátási intenzitása [g/m ² /h]	Kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés időtartama alatt [g/m ²]	A kibocsátott CO ₂ mennyiségének eltérése [%]
Légkeverés nélküli mérőkamra	1,0962	5,2546	100
Légkeveréses mérőkamra		5,4709	104

A 4.14. ábrán mutatom be a homokos talajon végzett 8. mérés eredményei alapján számolt intenzitási értékeket. A mérési eredmények alapján a különböző mérőkamrákkal végzett mérések alapján, a kibocsátás intenzitása nagyon hasonló.



4.14. ábra. A csonkakúp és a hasáb alakú kamrákkal mért értékek alapján számolt kibocsátási intenzitás és szórása

4.3. táblázat. A C02 és a C03 mérőkamrákkal mért kibocsátási adatok összehasonlítása

	Zérus időpont kibocsátási intenzitása [g/m ² /h]	Kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés időtartama alatt [g/m ²]	A kibocsátott CO ₂ mennyiségének eltérése [%]
C02 (csonkakúp alakú) mérőkamra	1,0962	5,3481	100
C03 (hasáb alakú) mérőkamra		5,9015	110

A kisebb térfogatú, csonkakúp alakú cella első mérési pontjában tapasztalható nagy kibocsátási intenzitás érték a talaj heterogenitásából is adódhatnak, amelyet a mérési eredmények nagy szórása is mutat. Jól látható azonban, hogy teljes mérési intervallumot nézve, a hasáb alakú cellával végzett mérési eredmények variációjája jóval kisebb, mint a csonkakúp alakú cellával végzett mérések esetében. Ez alapján a hasáb alakú cellák segítségével egyenletesebb eredmények kaphatók, amely a kamra által lefedett, nagyobb mintavételi területnek is köszönhető.

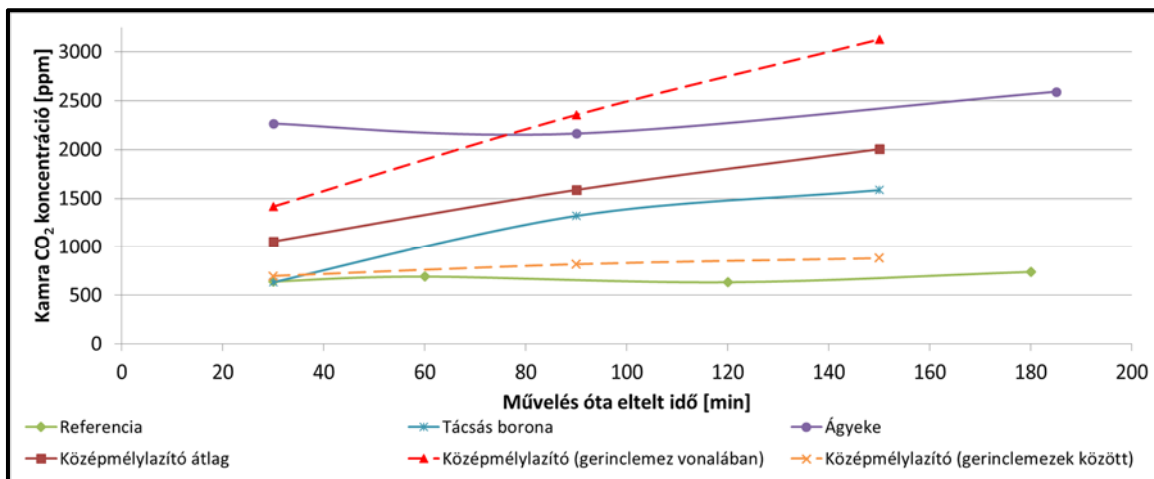
4.2. A rövidtávú mérések eredményei

A rövid időtartamú mérések célja egyrészt a mérési eljárások fejlesztése, másrészt a különböző művelési eljárások rangsorolása volt. A 4.1.2. fejezetben bemutatott következtetéseknek megfelelően a kumulált mérési eljárással végzett mérések, a mérési eljárás bizonytalansága miatt nem használhatók a kibocsátott CO₂ mennyiségének kvantitatív meghatározására. Ugyanakkor az azonos mérőterületen, azonos időben vett mintákat, közel azonos külső hatások érik, valamint a kamra kedvezőtlen hatása a talaj mikroklímájára is azonos mértékű. Ezért a kumulált mérési eljárással, azonos időben, azonos területen végzett méréssorozat eredményei segítségével a különböző munkagépekkel művelt mintaterületek CO₂ kibocsátása összehasonlítható és a művelési eljárások rangsorolhatók. A kibocsátott CO₂ mennyiségéről pontos képet csak akkor kaphatunk, amennyiben a különböző mintaterületek vizsgálata ürítéssel mérési eljárással történik.

Az első mérés (3.1. táblázat, 1. mérés) célja a különböző mérőműszerek összehasonlító vizsgálata volt, amelynek eredményét a 4.1.1. fejezetben mutattam be. Ennél a mérésnél nincs lehetőség a különböző művelések összehasonlítására, mivel a középmezőlylazító esetében a mérés a gerinclemezek vonalában történt, ezért ennek mérési eredményei nem vethetők össze a tárcsás boronával történő műveléssel, ahol a mérőkamrák CO₂ koncentrációja a teljes művelt terület kibocsátását reprezentálja.

A második méréssorozat (3.1. táblázat, 2. mérés) célja a különböző művelések összehasonlítása volt. A mérés kezdetekor a környezeti hőmérséklet az évszaknak megfelelő 20°C volt. A méréssorozat két mérést tartalmaz, mivel az első mérés során szervezési okok miatt nem volt lehetőség a mulcskultivátor vizsgálatára. A második mérés során mulcskultivátorral végzett vizsgálat eredményei nem vethetők össze az első mérésnél vizsgált művelésekkel, mivel a mérési körülmények, főként a környezeti és talajhőmérséklet jelentősen eltértek egymástól. A 2. méréssorozat első mérésének eredményeit a 4.15. ábrán mutatom be. Az ábrán a mért értékek mérési pontonként átlagolt értékét jelenítettem meg. A kumulált mérési eljárás miatt a kvantitatív értékekben történő ábrázolás nem lenne helyénvaló. A méréssorozat második mérésének eredményeit a mellékletben közlöm.

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a művelt területek közül a szántott területnek volt a legintenzívebb a CO₂ kibocsátása. A vizsgált területek rangsora a CO₂ kibocsátás intenzitása szerint növekvő sorrendben a következő: műveletlen terület, tárcsázás, középmezőlylazítás, szántás. A középmezőlylazítás esetében szaggatott vonallal megjelenítettem a gerinclemez vonalában és a gerinclemezek között mért kamrakoncentráció átlagát, amely adatok alapján jól látható, hogy a gerinclemez vonalában a kibocsátás a szántott területnél is nagyobb intenzitást mutat, míg a gerinclemezek között a műveletlen területtel szinte megegyező értékeket mértem.

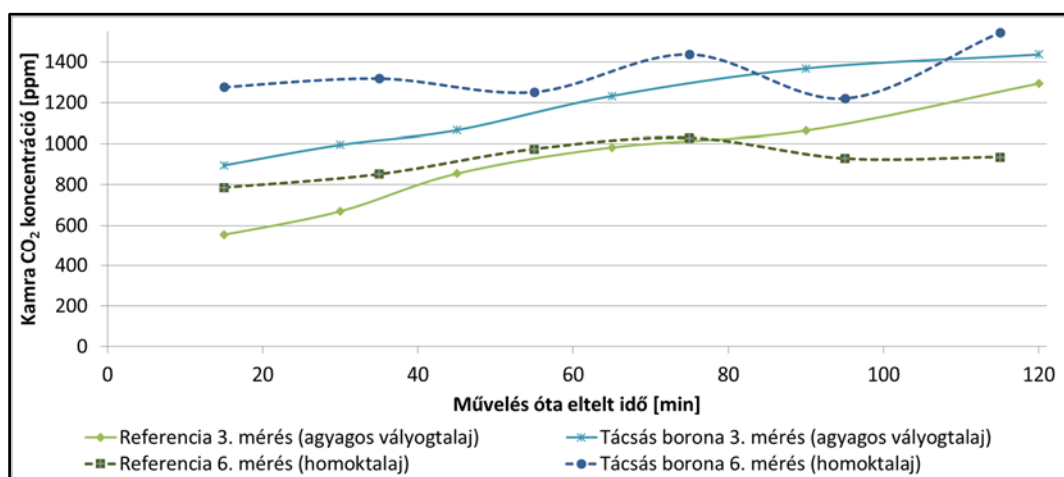


4.15. ábra. A különböző művelések utáni CO₂ koncentráció a mérőkamrákban a 2. mérés esetében

A 3-6. mérések (3.1. táblázat, 3-6. mérés) egy méréssorozathoz tartoznak, de szervezési okok miatt nem állt azonos időben minden munkagép rendelkezésre, ezért nem lehetséges a különböző munkagépek korlátozás nélküli összehasonlítása, ugyanakkor a munkagépek emissziós hatása egy-egy mérésen belül is összehasonlítható, valamint a különböző talajon, hasonló körülmények között végzett mérések eltéréseiből is levonhatók következtetések.

A 3. és a 6. mérés során ugyanazt a munkagépet vizsgáltam különböző talajokon. A két időpontban a napi középhőmérséklet hasonló, valamint a méréseket megelőző időszakban a csapadékeloszlás is közel azonos volt, ezért a mért eredményeket összevethetők. Figyelembe kell azonban venni, hogy a 3. mérés során a mérőterületek előkészítése 18:45-kor, míg a 6. mérés esetében 13:55-kor történt, és azonos napi középhőmérséklet mellett az eltérő napszakban végzett, azonos művelések különböző kibocsátási értékeket produkálhatnak a talajhőmérséklet eltérése miatt. Ez alapján a 6. mérés esetében intenzívebb kibocsátási értékek voltak várhatók a mérés időpontjában mért magasabb környezeti hőmérséklet miatt.

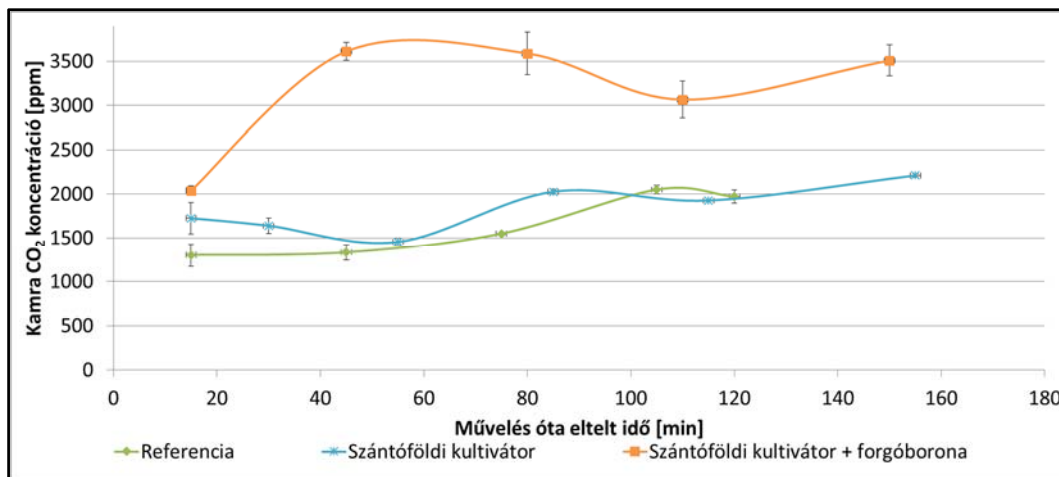
A két mérés összehasonlítása (4.16. ábra) alapján látható, hogy mindkét talajon a kibocsátás lefolyása, valamint a művelt terület eltérése a referenciaértékektől is hasonló. A 6. mérés esetében mért magasabb kamrakoncentrációs értékek arra engednek következtetni, hogy a két talaj kibocsátási értékei hasonlóak és a mért értékek eltérése nagyrészt az eltérő környezeti hőmérséklet hatása.



4.16. ábra. Homok-, és agyagos vályog talajon végzett mérés eredményei a művelést követő időszakban az ürítéses mérőkamrák eredményei alapján (3. és 6. mérés)

A 4. mérés (3.1. táblázat, 4. mérés) során kultivátor és forgóboronával kiegészített kultivátor (3.8. ábra.) által művelt területek kibocsátásának mérésére került sor. Mindkét művelés során a forgóborona tömörítő hengerével végzetük a műveletek lezárását.

A mérés eredményeit a 4.17. ábrán mutatom be.

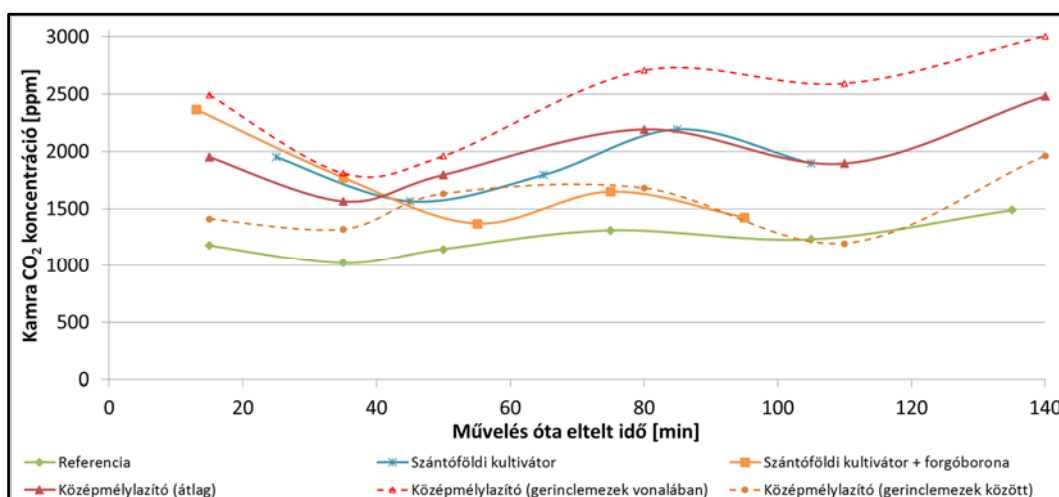


4.17. ábra. Forgóborona hatásának vizsgálati eredményei kultivátorozott területen (4. mérés)

A mért eredmények alapján látható, hogy a kombinált géppel művelt terület esetében jelentősen nagyobb kibocsátási értékeket mértem, mint a kultivátorozott területen. Ez arra enged következtetni, hogy a forgóborona aprító és keverő hatása miatt, az aprómorzsás talajszerkezet kialakításával jelentősebb nagyobb mértékben vált hozzáférhetővé az aerob mikroorganizmusok számára a levegő oxigéntartalma, míg a kultivátorozott terület esetében az enzimreakciókat katalizáló oxigén, a nagyobb rögök belsejébe nehezebben jutott el.

Az 5. mérés (3.1. táblázat, 5. mérés) során kultivátor, forgóboronával kombinált kultivátor és középmeélylazító által művelt területek CO₂ kibocsátásának összehasonlítására került sor erősen agyagos talajon. A mért adatokat a 4.18. ábrán mutatom be.

Az ábra alapján látható, hogy a lazított és a kultivátorozott területen hasonló mértékű kibocsátást mértem, viszont a lazító gerinclemezeinek vonalában az összes műveléshez képest jelentősen intenzívebb volt a kibocsátás. Ugyanakkor a középmeélylazító esetében az is megfigyelhető, hogy ennél a mérésnél a gerinclemezek között mért értékek jelentősen meghaladják a műveletlen területen mért értékeket, amelynek nagy valószínűséggel az oka, hogy az agyagos vályogtalajon a lazítás során a repedés terjedése intenzívebb volt, és az így nagyobb mennyiségű oxigén vált a mikroorganizmusok számára elérhetővé.



4.18. ábra. Különböző intenzitású művelések vizsgálati eredményei (5. mérés)

A kultivátorral és forgóboronával is művelt területen, a 4. mérésnél megfigyelt intenzív kibocsátást csak a művelést közvetlenül követő mérésnél tapasztaltam. Ezt követően a kombinált gép esetében alacsonyabb értékeket mértem, mint a csak kultivátorral művelt területen. Ugyanakkor fontos

megjegyezni, hogy az agyagos vályogtalajon a forgóborona porhanyító hatása kevésbé érvényesült. A talajfelszín vizsgálata alapján (4.19. és 4.20. ábrák), az agyagos vályogtalajon inkább a rögfrakció volt túlsúlyban, míg a homoktalajon főként morzsafrakció. Ezért a rögök belsejében lévő mikroorganizmusok nem, vagy csak lassabban juthattak oxigénhez, vagyis a forgóborona levegő bekeverő keverő hatása is kisebb mértékben érvényesült.



4.19. ábra. Morzsa és porfrakció alkotta talajfelszín kultivátor + forgóborona munkája után homok talajon repcetarló hántásakor (4. mérés)



4.20. ábra. A talajfelszín kultivátor + forgóborona munkája után agyagos vályog talajon gabonatarló hántása után (5. mérés)

Az elvégzett mérések tapasztalati alapján elmondható, hogy a különböző talajművelő gépek munkája után mérhető CO₂ kibocsátást főként a művelés intenzitása, a tömörítő eszköz hatékonysága valamint a keletkező aggregátum méret befolyásolja.

Fontos megjegyezni, hogy a rövidtávú mérések eredményei csak a művelés utáni intenzív kibocsátásról adnak megbízható információt. A hosszabb távú hatások megítélése, vagyis a kezdeti kibocsátás extrapolálása, az elvégzett mérések tapasztalatai alapján, a talajadottságok és a művelés utáni talaj jellemzőinek hatására miatt sok változó függvénye. Ezért a rövid időtartamú mérések extrapolációjára csak matematikailag nyílik lehetőség, azonban a talaj, mint bonyolult biológiai, biokémiai rendszer tekintetében az extrapoláció nagy bizonytalanságot hordoz magában. Ezt támasztja alá a mért kamrakoncentráció adatok, a talaj heterogenitása miatt tapasztalt viszonylag nagy szórása is, amely e tekintetben óvatosságra ad okot. Az extrapoláció bizonytalansága valószínűsíthetően nem a kibocsátás mennyisége miatt, hanem inkább a valós kibocsátástól való eltérések jellege és az eltérés iránya miatt vezethet megjósolhatatlan hibákkal rendelkező következtetésekre, ezért a rendelkezésre álló adatok alapján a rövid időtartamú mérések extrapolációja nem alkalmazható a különböző művelések hatására kibocsátott CO₂ kvantitatív meghatározására.

4.3. A közepes időtartamú mérések eredményei

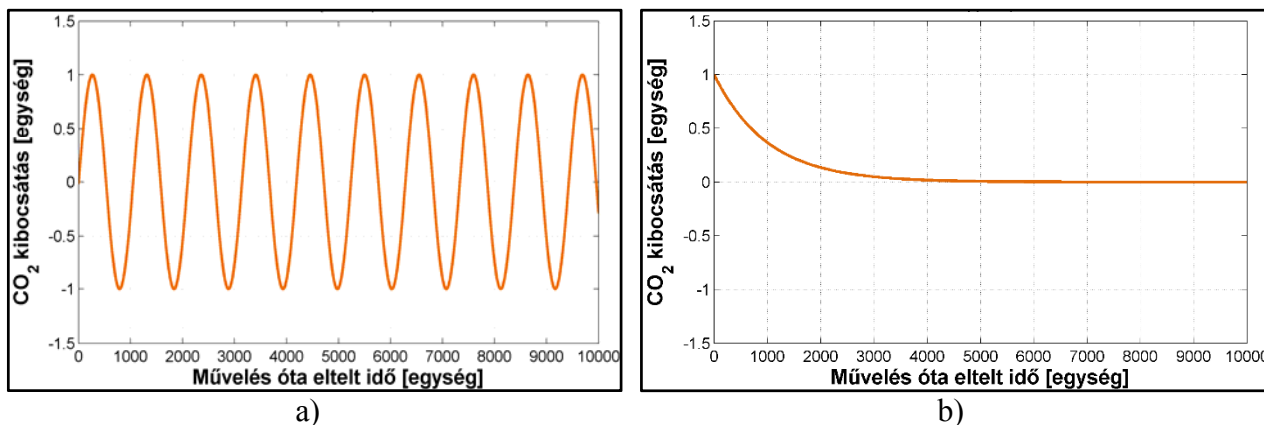
A közepes időtartamú mérések célja a talajművelést követő CO₂ emisszió folyamatának hosszabb időtartamú vizsgálata, a kibocsátási modell validálása, valamint a vizsgált művelések esetében a modell együtthatóinak meghatározása volt. A művelések hatására emittált CO₂ intenzitását legnagyobb valószínűséggel befolyásoló folyamatok alapvető törvényszerűségeit a 3.6.3. fejezetben ismertettem. A kitűzött célok elérésének következő lépése, a mérési eredményeket legjobban közelítő, a fizikai-biokémiai folyamatokat figyelembe vevő modell megalkotása és az illesztésre alkalmas regresszió analízis algoritmusának kidolgozása. A közepes időtartamú mérések (3.2. táblázat) adatai alapján validáltam a felállított modellt. Így lehetőség nyílt a kibocsátási modell illeszkedésének elemzésére, s ezáltal a modell alkalmasságának ellenőrzésére, és a modellparaméterek meghatározására.

4.3.1. A talajművelés utáni CO₂ kibocsátási modell kidolgozásának eredményei

A művelés utáni CO₂ kibocsátást a 3.6.3. fejezetben megfogalmazottak szerint alapvetően a művelés során a talajba kevert levegő hatására végbemenő katalizált enzimreakció kinetikája és a biokémiai folyamatokra jellemző hőmérsékletfüggőség befolyásolja.

A katalizált enzimreakció hatására a CO₂ kibocsátás folyamata a (3.7) egyenlettel leírható. A kibocsátás hőmérsékletfüggősége pedig a napi hőmérséklet ingadozással arányos, vagyis a (3.9) egyenlettel jellemezhető.

A kibocsátás lefolyását befolyásoló két alapjelenség a 4.21. ábrán látható függvényekkel jellemezhető, amelyek a kibocsátási modell kidolgozásának alapját jelentik.



4.21. ábra. A talajművelés utáni CO₂ kibocsátás

a) hőmérsékletfüggőségére; b) katalizált enzimreakcióra jellemző célfüggvény jellegének ábrázolása

A kibocsátást befolyásoló jelenségeket leíró függvények egyszerű összeszorzásából kapott (4.1) egyenlet alapján felrajzolható függvény (4.22. ábra.) hasonló a csillapított rezgőmozgás leírásához, azonban jelen esetben ez nem kielégítő, mivel az alapvető ok a művelés utáni CO₂ kibocsátás és a műveletlen talaj CO₂ kibocsátásának különbözőségére, a talajba kevert, oxigént tartalmazó levegő hatása az aerob baktériumok enzimreakcióira, amely minden esetben pozitív irányba tolja el a függvényértékeket.

$$W = \left(\frac{(Ae^{(t-c_0)})}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)), \quad (4.1)$$

ahol:

W - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

A - az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-],

t - a művelést követően eltelt idő [h],

c_0 - az emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható [-],

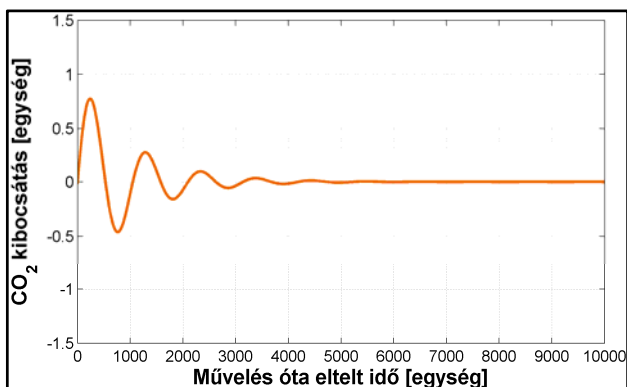
c_1 - a műveletlen terület CO₂ kibocsátásának periódusidejét megadó együttható [-],

c_2 - a kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható [-].

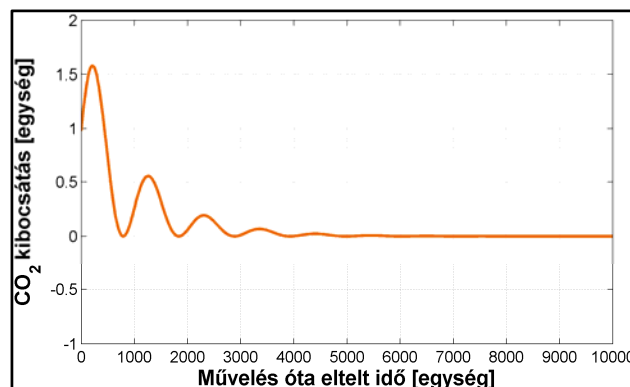
Ebből következően a (4.1) egyenlet szerinti függvény esetében indokolt a függvényértékek eltolása egy exponenciális taggal (4.2. egyenlet), amellyel a modell középértéke exponenciálisan csökkenő jelleget mutat (4.23. ábra.).

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t-c_0)})}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)) \right) + \left(\frac{(Ae^{(t-c_0)})}{2} \right), \quad (4.2)$$

ahol a jelölések megegyeznek a (4.1) egyenletben megadottakkal.



4.22. ábra. A (4.1) egyenlet grafikus megoldásának jellegábrázolása



4.23. ábra. A (4.2) egyenlet grafikus megoldásának jellegábrázolása

Ez mellett könnyen belátható, hogy a rendelkezésre álló, katalizáló hatású oxigén kimerülésével, vagy a korábbi szintre csökkenésével az enzimreakciók sebessége és ezzel együtt a művelt talaj CO₂ kibocsátásának intenzitása a műveletlen talaj szintjére kell, hogy visszatérjen.

Az előzőek alapján a talajművelést követő CO₂ kibocsátás leírására a (4.3) egyenlet ad reális megoldást, melynek grafikus ábrázolása a 4.24. ábrán látható.

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)) \right) + \left(\frac{(Be^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + j, \quad (4.3)$$

ahol:

W - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

A - az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-],

B - az emisszió minimumértékének kezdeti értékét megadó együttható [-],

t - a művelést követően eltelt idő [h],

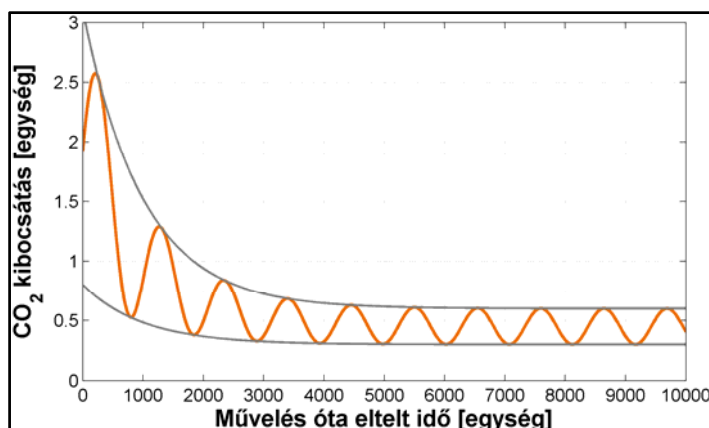
c_0 - az emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható [-],

h - a műveletlen terület maximális kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

c_1 - a műveletlen terület CO₂ kibocsátásának periódusidejét megadó együttható [-],

c_2 - a kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható [-],

j - a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$.



4.24. ábra. A (4.3) egyenlet grafikus megoldásának jellegábrázolása

A kibocsátási modell szerint, a művelt terület CO₂ kibocsátása a végtelenben éri el a műveletlen kibocsátás szintjét, azonban könnyen belátható, hogy az exponenciális tag viszonylag gyors lecsengésével a művelt terület maximális kibocsátásának eltérése a műveletlen terület kibocsátásától, a belátható mérési pontosságnál jóval kisebb érték.

A (4.3) egyenlet burkológörbéi a (4.4) és (4.5) egyenletekben leírt exponenciális függvények. A felső burkológörbe (4.4. egyenlet) a nappali kibocsátás maximumát, míg az alsó burkológörbe (4.5. egyenlet) az éjszakai kibocsátás minimumát adja meg. Ezért a felső burkológörbe aszimptotája a műveletlen terület kibocsátásának maximuma, míg az alsó burkológörbe aszimptotája a műveletlen terület minimumértéke.

$$W_f = \left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + \left(\frac{(Be^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + j, \quad (4.4)$$

$$W_a = \left(\frac{(Be^{(t c_0)} + h)}{2} \right) - \left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + j, \quad (4.5)$$

ahol a jelölések megegyeznek a (4.3) egyenletben megadottakkal.

A (4.3) egyenlet állandó napi középhőmérsékletre igaz, vagyis leginkább a művelést követő azon rövid időszak jellemezhető vele, amikor a napi hőmérsékletingadozás középértéke nem változik. Ezért a teljesség érdekében, hosszú távú és szezonális mérések esetén az éves hőmérséklet ingadozás figyelembe vétele is indokolt lehet. Ebben az esetben a művelés utáni CO₂ kibocsátást leíró függvénynek tartalmaznia kell az éves hőmérséklet ingadozást is jellemző szinuszos tagot. Így a kibocsátási modell a következőképpen írható le:

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)) \right) + \left(\frac{(Be^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + (C \sin(c_3 t)), \quad (4.6)$$

ahol:

W - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

A - az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-],

B - az emisszió minimumértékének kezdeti értékét megadó együttható [-],

C - az emisszió éves ingadozásának amplitúdóját megadó együttható [-],

t - a művelést követően eltelt idő [h],

c_0 - az emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható [-],

h - a műveletlen terület maximális kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

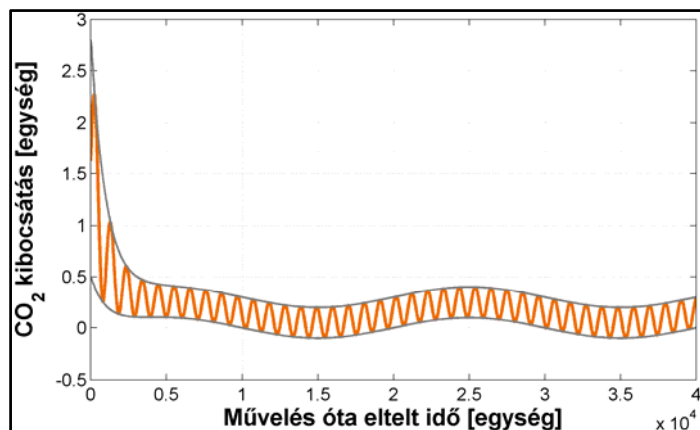
c_1 - a műveletlen terület CO₂ kibocsátásának periódusidejét megadó együttható [-],

c_2 - a kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható [-],

c_3 - a műveletlen terület CO₂ kibocsátásának éves periódusidejét megadó együttható [-],

j - a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$.

A (4.6) egyenlet szerinti modell a 4.25. ábrán koordináta rendszerben ábrázolt függvényt írja le.



4.25. ábra. A (4.6) egyenlet grafikus megoldásának jellegábrázolása

Az elvégzett közepes időtartamú mérések alapján, egy ilyen részletes kibocsátási modell együtthatói

nem határozhatók meg kellő pontossággal. Egyrészt a mérés időtartam miatt nem áll rendelkezésre információ a szezonális hatásokról. Másrészt a közepes időtartamú mérések időtartama, mérésenként csak egy éjszakai mérési pontot tett lehetővé, ezért a kibocsátási modell alsó burkológörbéjének lefutását meghatározó együtthatók rendkívül pontatlanul közelíthetők. Ennek figyelembe vételével, a közepes időtartamú mérésekre alkalmazható gyakorlatias modell a (4.6) egyenlet egyszerűsítésével a következő:

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)) \right) + \left(\frac{(Ae^{(t c_0)} + h)}{2} \right) + j, \quad (4.7)$$

ahol:

W - CO₂ kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

A - az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-],

t - a művelést követően eltelt idő [h],

c_0 - az emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható [-],

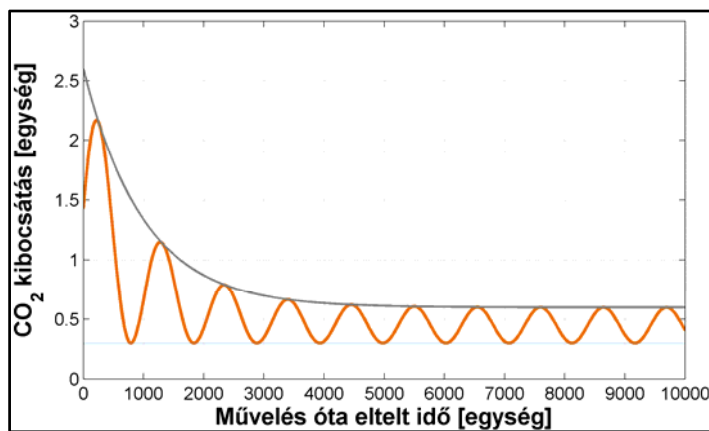
h - a műveletlen terület maximális kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

c_1 - a műveletlen terület CO₂ kibocsátásának periódusidejét megadó együttható [-],

c_2 - a kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható [-],

j - a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$.

Az így kapott, gyakorlati szempontból kedvezőbb, matematikailag is kezelhetőbb modellt fogom alkalmazni a közepes időtartamú mérések alapján vizsgált művelt területek CO₂ kibocsátásának modellezésére. A (4.7) egyenlet szerinti kibocsátási modellt koordináta-rendszerben ábrázolva a 4.26. ábra szerinti függvényképet kapjuk.



4.26. ábra. A (4.7) egyenlet grafikus megoldásának jellegábrázolása

Vagyis az elvégzett mérésekre alkalmazható, gyakorlati szempontok alapján kezelhető modell egy exponenciálisan csökkenő amplitúdójú, szinuszos periodicitással rendelkező függvény, amelynek alsó burkológörbéje a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke, a felső burkológörbéje exponenciális függvény, melynek aszimptotája a műveletlen terület kibocsátásának maximum értéke. A modellértékeit $T \rightarrow \infty$ helyeken alapvetően a műveletlen terület kibocsátási értékei határozzák meg. Ezért a regresszióanalízis során először a műveletlen területen mért értékekre kell illeszteni a modell szinuszos tagját, hogy az exponenciális tag aszimptotájának és alsó burkoló egyenesének együtthatói meghatározhatók legyenek.

A modell illesztésének algoritmusa

A kibocsátási modell együtthatóinak meghatározásához el kell végezni annak nemlineáris regresszióanalízisét. A regresszióanalízishez Matlab programot alkalmaztam, amellyel a következőkben leírtak

szerint végeztem el a kibocsátási modell illesztését.

A kibocsátási modell regresszió analízisét két fő részre osztottam. Ezek:

- a modell szinuszos és exponenciális tagjának illesztése a mért adatokra a teljes kibocsátási modell együtthatóinak regresszió analíziséhez szükséges kezdőértékek meghatározásához,
- a teljes kibocsátási modell illesztése a mért adatokra.

A kibocsátási modell regresszió analízise esetében az együtthatók viszonylag nagy száma miatt feltételezhető, hogy az együtthatók, a fizikai-kémiai alapoktól elrugaszkodó értéken több érték-kombinációban is hasonló illeszkedést eredményezhetnek, másrészt véletlenszerűen megválasztott kezdőértékek esetén, lokális minimumok is elképzelhetők, amelyeket minimumkeresés során, az együtthatók értékének iterációja nem tud átlépni. Így hiába lesz a függvény konvergencia, a globális minimumot nem sikerül elérnie. Ezért a kibocsátási modellek illesztése előtt el kell végezni az együtthatók kezdőértékeinek meghatározását, amelynek a mért adatok elemzésén kell alapulnia. Ennek értelmében a műveletlen terület kibocsátására illesztettem a kibocsátási modell szinuszos tagját, majd az exponenciális tag esetében is elvégeztem az illesztést a művelt terület interpolált mért értékeire. A modell két tagjának illesztése során először a mérési eredmények elemzésével meghatároztam az együtthatók várható értékét, majd ezeket kezdőértékként megadva elvégeztem a kibocsátási modell egyes tagjainak illesztését a legkisebb négyzetek módszere szerint. A regresszió analízis utolsó lépése a teljes modell illesztése volt az elemi numerikus integrálok különbségének minimalizálásával, a modell tagjainak illesztése alapján kapott együtthatókat kezdőértékként használva.

A regresszióanalízist végző Matlab program algorímusa a következő:

- *Az adatbehívás* Excel fájlból történik, amely tartalmazza a mellékletben szereplő mérési időpontokat és az ezekhez tartozó mért adatok átlagolt és $\text{g/m}^2/\text{h}$ -ba átszámolt értékeit.
- *Adatok interpolálása*: A mért adatok nem egyenletes eloszlásban helyezkednek el az időskálán, mivel a mérés ciklusidejét a kibocsátás intenzitása alapján határozom meg. Ezért az adatfeldolgozást megkönnyítésére, elvégeztem a mért adatok interpolálását, így az időskálán egyenletes eloszlású pontokkal végezhető el a függvényillesztés. Ez mellett az interpolált adatok használatával pontosabb lokális közelítés kapható. A Matlab programban ehhez:
 - o felosztom az időintervallumot 10000 egységre a (4.8) egyenlet szerint.

$$dt = \frac{t_{max} - t_{min}}{10000}, \quad (4.8)$$

ahol:

- dt - az időskála felbontása,
- t_{max} - az időintervallum maximum értéke,
- t_{min} - az időintervallum minimum értéke.

- o majd a finomított időskála szerint interpolálom a mért adatokat. Az értékek interpolálása az 3.6.2 fejezetben leírt alaktartó monoton szakaszos harmadfokú interpolációval történt.
- *Adatok extrapolálása*: a 9. mérés esetében hiányzó adat a műveletlen terület közvetlenül a művelés előtti CO_2 kibocsátása. Ezért a mért adatokat a művelés előtti időpillanatra extrapolálnom kell, mivel ellenkező esetben a hirtelen megnövekvő kibocsátás figyelmen kívül hagyása hibás modellillesztéshez vezethet. A kezdeti kibocsátás a műveletlen és a művelt terület esetében is megegyezik. A mért adatok extrapolációjánál figyelembe kell venni, hogy a nem mért érték valószínűleg megegyezik az azonos napszakban, hasonló hőmérséklet esetén mért értékkel. Ezért, a hiányzó értékeket a 24 órával későbbi műveletlen terület kibocsátásával helyettesítem. A 10. mérés adatsora esetében erre nincs szükség, mivel van mérési pont a műveléssel azonos időpontban.

- Az extrapolált mérési pont és az első mérési pont közötti értékek közötti szakaszra interpolációt végzek.

a) *A kibocsátási modell részmodelljeinek illesztése:* A regresszió analízis első főrésze a kibocsátási modell egyes tagjainak illesztése. A biokémiai hatásoknak megfelelően a műveletlen terület kibocsátását jellemzően inkább a napi hőmérsékletingadozás szinuszos jellege befolyásolja, míg a művelt terület esetében a kibocsátás exponenciális jellege a domináns.

1. *A modell szinuszos tagjának illesztése a műveletlen terület mért értékeire:*

A műveletlen terület hőmérsékletfüggő jellege mellett a modell szinuszos tagjának ezen mérési eredményekre történő illesztését indokolja az is, hogy a szinuszos tag maximuma határozza meg a kibocsátási modell exponenciális tagjának aszimptotáját, valamint minimuma a teljes modell alsó burkoló egyenesét. Ezen kívül a műveletlen területre illesztett szinuszos tag periódusideje is meghatározandó együttható, mivel a (3.8) egyenletben szereplő periódusidő a talaj esetében nem egyezik meg a felszíni hőmérséklet periódusidejével a talaj és a levegő eltérő hőtehetetlensége és fajhője miatt. Az illesztett célfüggvényt a kibocsátási modell szinuszos tagja alapján határoztam meg:

$$W_{ref} = b_1 + b_2 \sin\left(\frac{2\pi}{b_3} t - b_4\right), \quad (4.9)$$

ahol:

W_{ref} - a műveletlen terület kibocsátási intenzitása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 b_1 - az emisszió középértékét megadó együttható $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 b_2 - az emisszió amplitúdóját megadó együttható $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 b_3 - az emisszió periódusidejét megadó együttható [h],
 b_4 - az emisszió fáziseltolódását megadó együttható [h],
 t - idő [h].

- *Minimumérték kereséshez a kezdőértékek meghatározása:*

- o b_1 : szinusz függvény középértékének meghatározását az interpolált mért értékek középértékének számításával végezem a következők szerint:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}, \quad (4.10)$$

ahol:

b_1 - az emisszió középértékét megadó együttható $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 w_i - mért emisszió értékek $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 n - mért emisszió értékek száma [-].

Mivel a mérések nem azonos időközönként történtek, az interpolált mért értékek használatának előnye ennél a lépésnél, hogy az intenzívebb kibocsátás időtartományában sűrűbben lévő értékek jelentősen eltorzítanak a középérték számítását.

- o b_2 : szinusz függvény amplitúdójának meghatározását az interpolált mért értékek maximumának és minimumának különbségéből határozom meg:

$$b_2 = \max(W_{ref_{mért}}) - \min(W_{ref_{mért}}), \quad (4.11)$$

ahol:

b_2 - az emisszió amplitúdóját megadó együttható $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,

$W_{ref\ mért}$ - a referenciaterület mérésel meghatározott CO₂ kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$.

- b_3 : a periódusidő meghatározását több lépésben végzem:
 - első lépésben eltolom az interpolált függvényt a maximális és a minimális mért érték átlagával az abszcisszához a következők szerint:

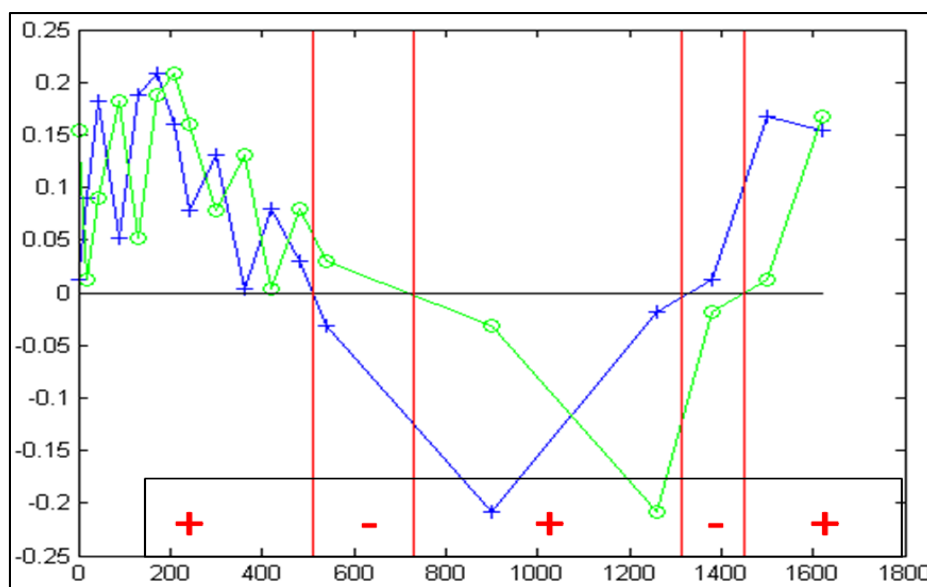
$$W_{mértelt} = W_{ref\ mért} - \max(W_{ref\ mért}) + \left(\frac{\max(W_{ref\ mért}) - \min(W_{ref\ mért})}{2}\right), \quad (4.12)$$

ahol:

$W_{mértelt}$ - az abszcisszához eltolt CO₂ kibocsátás függvény $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,

$W_{ref\ mért}$ - a referenciaterület mérésel meghatározott CO₂ kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$.

- második lépésben megkeresem azon interpolált mérési pontokat, ahol az eltolt függvény metszi az x tengelyt. Az eredeti függvényértékeket x+1 helyre veszem fel, és a léptetett és az eredeti függvény összeszorzásával vizsgálom, hogy a szorzat mikor vesz fel negatív vagy zérus értéket. Ez csak abban azokon a helyeken fordulhat elő, ahol az eredeti függvényértékek metszik az x tengelyt, mivel ebben az esetben a két függvény értékei ellentétes előjelűek, vagy az egyik érték nulla (4.13 egyenlet). Ezen lépést grafikus formában a 4.27. ábrán, a nem interpolált mért értékeken mutatom be.



4.27. ábra. A mért adatok periódusidejének meghatározásához szükséges eredeti és egy hellyel léptetett függvényértékek szorzatának előjelvizsgálata

$$Z = [\forall t | \{(W_{mértelt}(t) * W_{mértelt}(t + 1)) \leq 0\}], \quad (4.13)$$

ahol:

Z - $W_{mértelt}$ függvény zérushelyei,
 $W_{mértelt}$ - az abszcisszához eltolt CO₂ kibocsátás függvény $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$,
 t - idő [min].

- harmadik lépésben az előzőekben kapott metszéspontok alapján határozom meg a periódusidő kezdőértékét. A saját méréseimnél csak két metszéspont található, de a számítást hosszabb mérésekre is általánosítva adtam meg, így a metszéspontok különbségének átlaga adja a félperiódus értékét. Ennek kétszerese a periódusidő kezdőértéke.

$$b_3 = 2 \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i+1} - Z_i)}{n}, \quad (4.14)$$

ahol:

Z - $W_{mértelt}$ függvény zérushelyei,
 n - zérushelyek száma.

- b_4 : a fáziseltolás kezdőértékének meghatározása az abszcisszához eltolt függvény első zéruspontja és a számolt periódusidő alapján a következők szerint végzem:

$$b_4 = \frac{b_3 - 2Z_1}{b_3}, \quad (4.15)$$

ahol:

b_4 - az emisszió fáziseltolódását megadó együttható,
 b_3 - az emisszió periódusidejét megadó együttható,
 Z_1 - $W_{mértelt}$ függvény első zérushelye.

2. *A szinusz függvény illesztése*: az előzőekben meghatározott (b_1 , b_2 , b_3 , b_4) kezdőértékektől kezdődően a szinusz függvény illesztését az interpolált és a (4.9) egyenlet szerinti szinusz függvény értékeinek közelítésével a legkisebb négyzetek módszerének használatával a következők szerint végzem:

$$\min \left\{ \sum_{t_0}^{t_{end}} (W_{ref}(b_1, b_2, b_3, b_4) - W_{ref\ mért})^2 \right\}, \quad (4.16)$$

ahol:

W_{ref} - a referenciaterület a CO₂ kibocsátása,
 $W_{ref\ mért}$ - a referenciaterület méréssel meghatározott CO₂ kibocsátása,
 b_1, b_2, b_3, b_4 - a (4.9) egyenlet együtthatói.

A minimumérték keresését a Matlab programba beépített Nelder-Mead algoritmus (LAGARIAS *et al.*, 1998) alapján végzem, mivel az abban jól definiált változó-kapcsolatok megbontási korlátja biztosítja a keresendő együtthatók szükséges mértékű aránytartását, amely a biokémiai jelenség modelljének helyes meghatározásához elengedhetetlen.

3. *A modell exponenciális tagjának konstansaihoz kezdőértékek keresése*: a műveletlen terület interpolált mért értékeire illesztett szinuszos taghoz hasonlóan, az exponenciális tag művelt

terület kibocsátási adataira történő illesztésével határozhatók meg a teljes kibocsátási modell exponenciális tagjában lévő együtthatók kezdőértékei. A művelt terület adatainak extrapolálását és interpolálását a korábban leírtak szerint végeztem. A szinuszos tag illesztéséhez hasonlóan, az exponenciális tag illesztése is az interpolált mért eredmények, valamint a modelltől számított értékek eltérésének négyzetének minimalizálásán alapul. Az exponenciális tag alapján, az illesztett célfüggvény:

$$W_{exp} = d_1 e^{d_2 t}, \quad (4.17)$$

ahol:

W_{exp} - exponenciális kibocsátási függvény,
 d_1, d_2 - együtthatók,
 t - idő.

- *Együtthatók meghatározása a mért eredmények elemzésével:* A korábban említett lokális minimumok elkerülése érdekében a mért adatok elemzésével határozom meg a minimumérték keresés kezdőértékeit. Az exponenciális tag esetében a számított együtthatók keresése csak több lépésben pontosítható megbízhatóan, de kézenfekvő egy egyszerű elsőfokú polinom illesztése a mért adatokra, mivel az exponenciális tag és az elsőfokú polinom együtthatóinak esetlegesen eltérő aránya a kisszámú együttható miatt még nagyobb arány tévesztés esetén sem okoznak problémát a Nelder-Mead algoritmussal történő minimumkeresés során. Az illesztett elsőfokú polinom célfüggvénye:

$$p(x) = p_1 x + p_2. \quad (4.18)$$

- *Exponenciális tag regresszió analízise:* az elsőfokú polinom együtthatói megfeleltethetők az exponenciális tag illesztéséhez szükséges kezdőértékeknek.

$$p_2 = d_1 \text{ és } p_1 = d_2. \quad (4.19)$$

A korábban leírtaknak megfelelően az exponenciális tag illesztését a legkisebb négyzetek minimalizálásával, Nelder-Mead algoritmussal a következők szerint végzem:

$$\min \left\{ \sum_{t_0}^{t_{end}} (W_{exp}(d_1, d_2) - W_{mért})^2 \right\}, \quad (4.20)$$

ahol:

W_{exp} - exponenciális kibocsátási függvény,
 $W_{mért}$ - a művelt terület mérésel meghatározott CO₂ kibocsátása,
 d_1, d_2 - a (4.17) egyenlet együtthatói.

- b) *A kibocsátási modell illesztése a művelt terület mért értékeire:* Az együtthatók kezdőértékének meghatározása után a regresszió analízis második főrésze a teljes kibocsátási modell illesztése a művelt terület interpolált mérési eredményeire. Az illesztett célfüggvény a (4.7) egyenlet egyszerűsített alakja:

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)}) + h}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2) + 1) \right) + j, \quad (4.21)$$

ahol a jelölések megegyeznek a (4.7) egyenlet jelöléseivel.

1. *Az együtthatók behelyettesítése:* A kibocsátási modell periódusideje a modellemben megegyezik a műveletlen talajra illesztett szinuszos tag periódusidejével. A kibocsátási modell periódusidejét meghatározó együttható pontosítását nem tartottam indokoltnak, mivel a kibocsátás periódusidejét főként a talaj hőmérsékletváltozása befolyásolja, ez pedig főként a talaj hőtehetetlenségével van összefüggésben, amely nem változik jelentősen a művelés hatására. Ennek oka, hogy a művelés során megnőtt légfázis aránya nem befolyásolja jelentősen a hőtehetetlenséget, mivel egy rendszer hőtehetetlensége az egyes „rétegek” hőtehetetlenségi tényezőinek összege. A talajba zárt levegő hőtehetetlensége egy nagyságrenddel kisebb, mint a szilárd fázis hőtehetetlensége, emiatt, a talajművelést jellemző pórustérfogat változás csak kis mértékben befolyásolja a művelt talaj teljes hőtehetetlenségét (CRUSE *et al.*, 1980; KIMBALL *et al.*, 1976).

A periódusidővel ellentétben a szinuszos tag fáziseltolódása valószínűleg nincs összefüggésben a műveletlen talaj kibocsátásával, mivel a művelt terület kibocsátásának fáziseltolódására a művelés hatására bekövetkező intenzív kibocsátás is hatással lehet. Ezért ezt ismeretlen konstansnak tekintem, és a regresszióanalízis során határozom meg, azonban a lokális minimumok elkerülése érdekében a mért értékeket jellemző kezdőérték megadására szükség van, amelyet az interpolált mérési eredmények alapján végeztem az abszcisszához eltolt függvény első zéruspontja és a számolt periódusidő alapján, a műveletlen terület szinuszos közelítésénél használt eljárással.

2. A konstansok kezdeti értékének meghatározása után *a teljes kibocsátási modell illesztését* végzem el. A minimumérték keresés Nelder-Mead algoritmussal történt, azonban mivel a modell célja a kibocsátott CO₂ mennyiség kvantitatív leírása, a regresszióanalízist az elemi numerikus integrálok különbségének minimalizálásával, a következők szerint végzem:

$$\int_{t_0}^{t_{end}} |W_{mért} - W(c_0, c_2, A)| dt \rightarrow \min, \quad (4.22)$$

ahol:

W - talaj CO₂ kibocsátás függvénye,

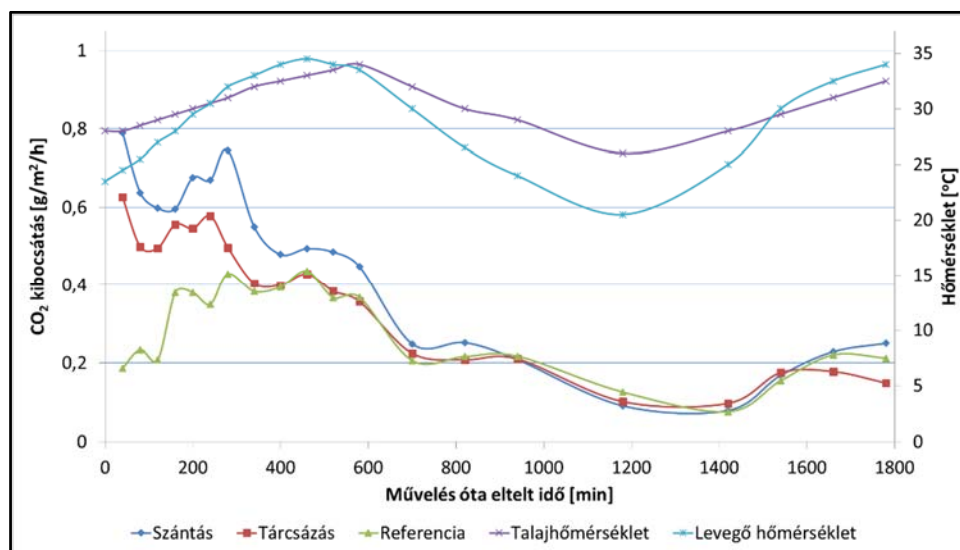
$W_{mért}$ - a művelt terület méréssel meghatározott CO₂ kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2 h} \right]$,

c_0, c_2, A - a (4.21) egyenlet együtthatói.

Az előzőekben leírt módszer szerint elvégeztem a közepes időtartamú mérések adatai alapján a kibocsátási modell regresszió analízisét. Az eredményeket a következő fejezetekben ismertetem.

4.3.2. Az enyingi közepes időtartamú mérés eredményei

Az enyingi közepes időtartamú mérés (3.2. táblázat, 9. mérés) mérési eredményei alapján számolt kibocsátási intenzitás értékeket a 4.28. ábrán mutatom be.



4.28. ábra. A mért kibocsátási és hőmérséklet adatok megjelenítése polinomális interpolációval (9. mérés)

Az adatok alapján jól látható, hogy a reakciókinetikai közelítésnek megfelelően, a művelés után közvetlenül a talajba kevert oxigéndús levegő hatására hullámzó jellegű, de intenzív kibocsátás tapasztalható, majd az intenzitás folyamatosan csökken a műveletlen talajhoz hasonló értékekre. Az intenzitásértékek trendjei alapján megfigyelhető, hogy a művelt terület kibocsátásának intenzitása az exponenciális csökkenés mellett, a hőmérsékletingadozásnak megfelelő jelleget mutat. A művelt és a műveletlen terület görbéinek együttfutása a 11-15. óra után tapasztalható. Ez megegyezik a szakirodalomban megtalálható megállapításokkal, mivel például a művelés hatásának lecsengését ELLERT és JANZEN (1999) közel ilyen időtartamban tapasztalta kanadai csernozsem talajon végzett vizsgálataik során.

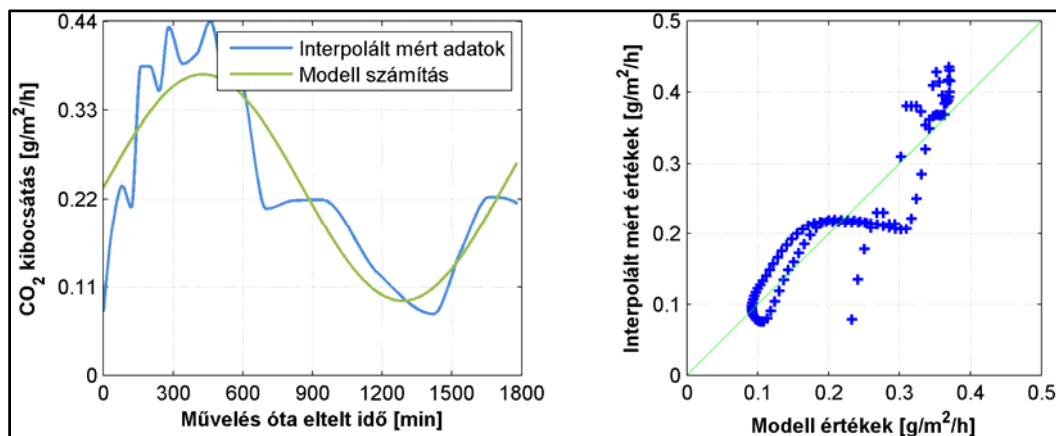
A referenciagörbe értékei alapján jól látható, hogy a műveletlen talaj esetében a reakciókinetikai modelltag elhagyása helyénvaló, mivel a kibocsátás a talajhőmérséklettől eltolt periódusú, de hasonló jellegű görbelefutást mutat. Megfigyelhető az is, hogy a műveletlen terület kibocsátásának maximuma nem a talajhőmérséklet, inkább a levegő hőmérséklet maximumával esik egybe.

A görbék lefutásában tapasztalható kisebb fluktuáció valószínűsíthetően a térbeli heterogenitás miatt jelentkezik. Ezt a megállapítást támasztja alá, hogy a korábbi méréseknél használt kumulált mérési eljárással mért eredmények simább lefutású görbéket eredményeztek. Az ürítéses mérési módszer szerint a mintavételi helyek nem azonosak, a mérési eredmények alapján pedig a térbeli heterogenitások reprezentálása is megvalósul, így a kibocsátási modell illesztésével a vizsgált területre jellemző, valós, átlagos kibocsátás határozható meg.

A kibocsátási modell regresszió analízisének eredményei

A mért értékek 4.3.1 fejezetben leírtak alapján elvégzett regresszió analízise során kapott eredményeket a következő ábrákon mutatom be. A regresszió analízis részeredményeit bemutató ábrák a mellékletben megtalálhatók.

A műveletlen terület esetében a szinuszos tag illeszkedését a 4.29. ábrán mutatom be, a regresszió analízis alapján, a (4.9) egyenletre meghatározott együtthatókat a 4.4. táblázatban foglaltam össze.

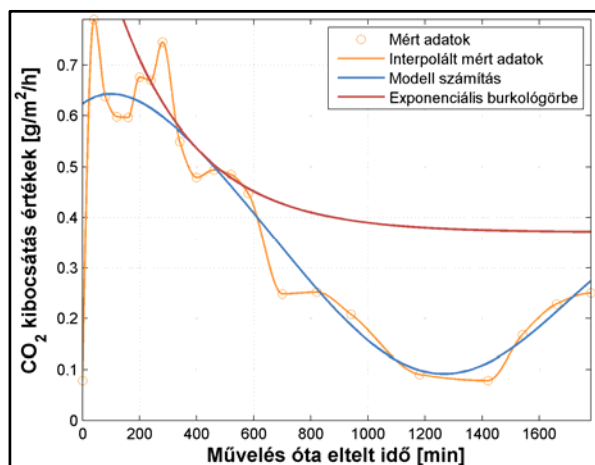


4.29. ábra. A kibocsátási modell szinuszos tagjának illeszkedése a 9. mérés műveletlen területen mért adataira

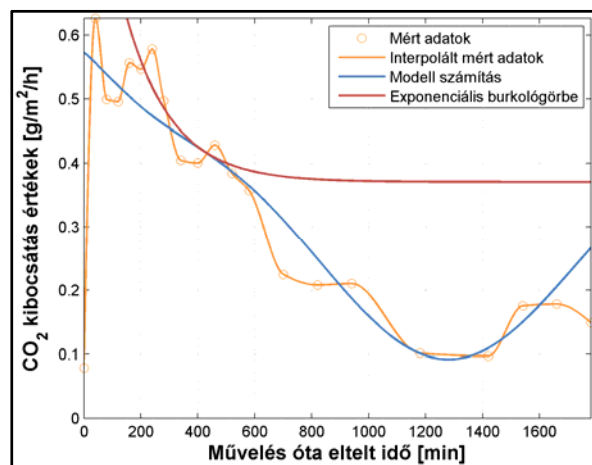
4.4. táblázat. A műveletlen terület mért adataira illesztett kibocsátási modell szinuszos tagjához tartozó együtthatók értéke

	Az emisszió középértéke b_1	Az emisszió amplitúdója b_2	Az emisszió periódusideje b_3	Az emisszió fáziseltolódása b_4
Műveletlen terület	0,2312	0,1395	1720	6,2920

A művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell illeszkedését és az exponenciális burkológörbéket a 4.30.-4.31. ábrákon jelenítettem meg. A művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell (4.21. egyenlet) együtthatóit a 4.5. táblázat tartalmazza.



4.30. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a 9. mérés szántott területen mért adataira



4.31. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a 9. mérés tárcsázott területen mért adataira

4.5. táblázat. Az illesztett kibocsátási modell együtthatóinak értéke a művelt területek esetében

	Az emisszió kezdeti értéke A	Az emisszió meredeksége c_0	Az emisszió periódusidejét megadó együttható c_1	Az emisszió fáziseltolódása c_2	A maximális kibocsátás aszimptotája h	Az emisszió minimum-értéke j
Szántott terület	0,6991	-0,0036	0,0037	-0,0870	0,2791	0,0917
Tárcsázott terület	0,6507	-0,0062		-0,0353		

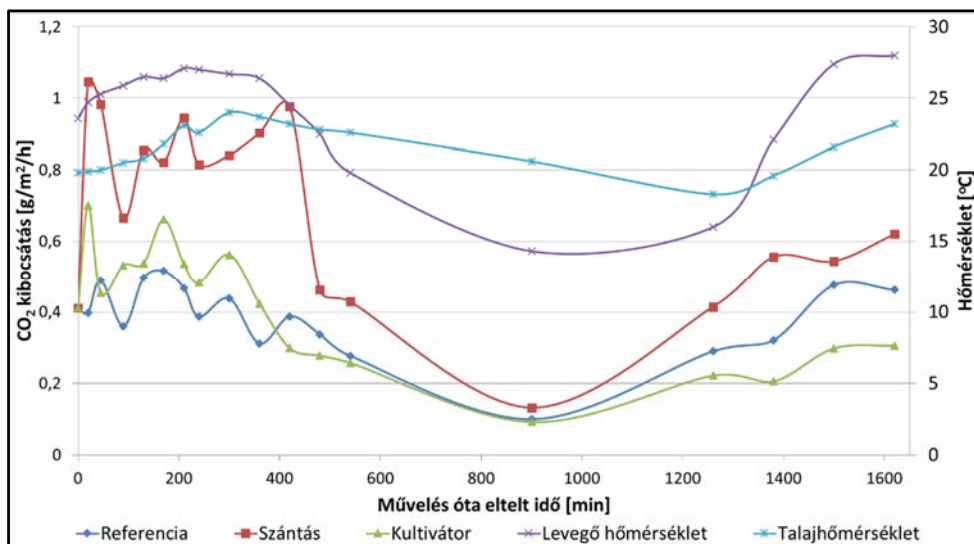
A kibocsátási modell illeszkedését, valamint a mért és számított adatok alapján meghatározott kibocsátási értékeket a 4.6. táblázatban mutatom be.

4.6. táblázat. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra és a kibocsátott CO₂ mennyisége

	Determinációs együttható (R ²) [%]	Az interpolált mért adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés ideje alatt [g/m ²]	A modell adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés ideje alatt [g/m ²]	A mérés ideje alatt kibocsátott CO ₂ mennyiségének eltérése a műveletlen területhez képest	
				[g/m ²]	[%]
Műveletlen terület	72,58	6,876	6,875	-	100
Szántott terület	93,26	9,380	9,267	2,392	134
Tárcsázott terület	88,86	8,162	7,883	1,008	114

4.3.3. A mesztegnyői közepes időtartamú mérés eredményei

A mesztegnyői közepes időtartamú mérés (3.2. táblázat, 10. mérés) mérési eredményeit a 4.32. ábrán mutatom be. Az adatok alapján a korábbi közepes időtartamú méréshez hasonlóan itt is megfigyelhető a művelés utáni intenzív kibocsátás, valamint az emisszió hőmérsékletfüggősége. A különböző mérőterületek kibocsátási értékének együttfutása nem határozható meg olyan egyértelműen, mint a korábbi mérésnél, mivel a korábban tapasztalt együttfutás időszaka az éjszakára esik, ahol a talajhőmérséklet jelentős csökkenése miatt jóval mérsékeltebb a kibocsátás.



4.32. ábra. A mért kibocsátási és hőmérséklet adatok megjelenítése polinomiális interpolációval (10. mérés)

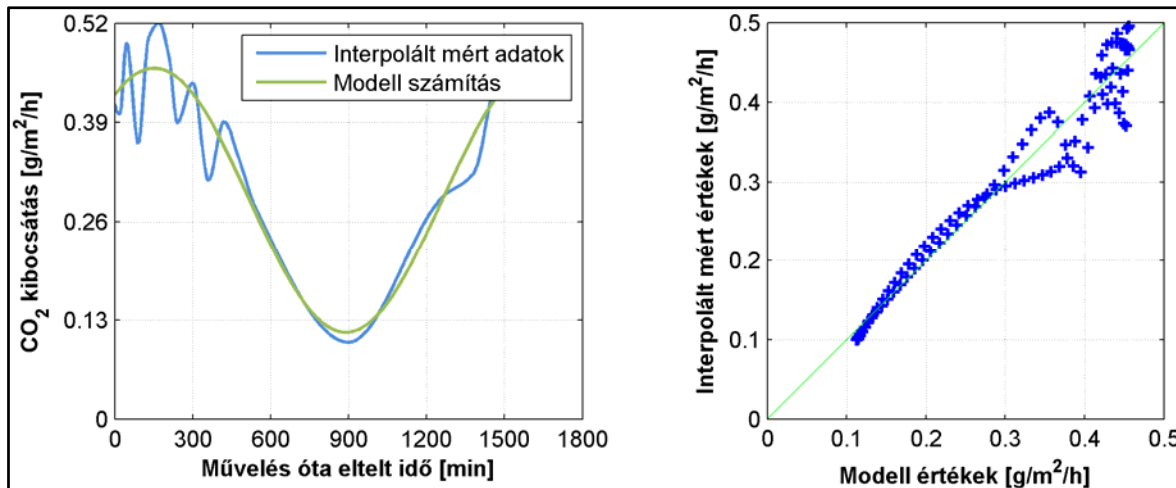
A művelt területek emissziója jelentősen eltér egymástól. A korábbi mérések alapján a kultivátor talajbolygató hatása miatt a szántott területhez hasonló kibocsátás volt várható, de ennél a mérésnél a kultivátorozott és a műveletlen terület értékei nem tértek el jelentősen. Ennek oka egyrészt az agyagos talaj valamely talajjellemzője lehet, másrészt pedig az, hogy míg az eke után nem volt tömörítő egység, addig a kultivátor nehéz tömörítő hengerrel volt felszerelve, így a szántott terület talajának nagyobb légátjárhatósága jelentősen kedvezett a nagyobb intenzitású enzimekreakcióknak. A mért adatok fluktuációja viszonylag nagy a korábbi méréshez képest. Ez arra enged következtetni, hogy a talajadottságok is szerepet játszhatnak ebben, amely lehet nagyobb térbeli heterogenitás, vagy az agyagos talaj sajátossága.

A műveletlen talaj esetében ennél a mérésnél is megállapítható, hogy a korábbi közepes időtartamú méréshez hasonlóan, a műveletlen terület kibocsátásának görbéje egyértelműen hőmérsékletfüggő. A mérés első időszakában a műveletlen terület kibocsátása inkább a léghőmérséklethez, míg a mérés második felében a talajhőmérséklethez hasonló görbe szerint változik.

A kibocsátási modell regresszió analízisének eredményei

A kibocsátási modell regresszió analízisét a 10. mérés mért adatainak elemzésekor a korábbi közepes időtartamú méréssel megegyező módszer szerint végeztem. Az illesztést végző algoritmus futtatásakor kapott részeredmények a mellékletben találhatóak.

A műveletlen terület interpolált mérési pontjaira illesztett szinuszos modelltag illeszkedését a 4.33. ábrán, a (4.9) egyenlet együtthatóinak értékét a 4.7. táblázatban mutatom be.

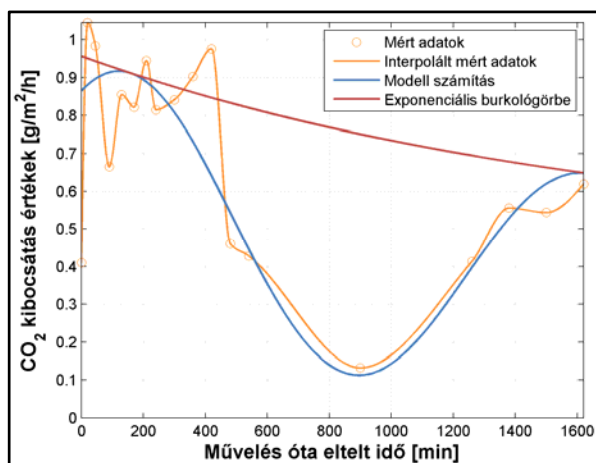


4.33. ábra. A kibocsátási modell szinuszos tagjának illeszkedése a 10. mérés műveletlen területen mért adataira

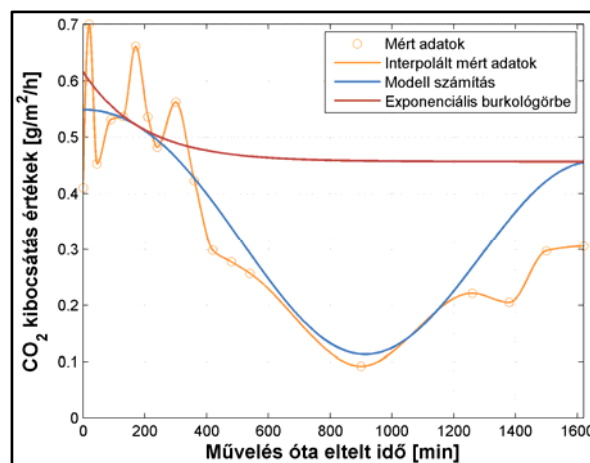
4.7. táblázat. A műveletlen terület mért adataira illesztett kibocsátási modell szinuszos tagjához tartozó együtthatók értéke

	Az emisszió középértéke b_1	Az emisszió amplitúdója b_2	Az emisszió periódusideje b_3	Az emisszió fáziseltolódása b_4
Műveletlen terület	0,2848	0,1721	1475,7	0,9258

A művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell illeszkedését és az exponenciális burkológörbét a 4.34.-4.35. ábrákon jelenítettem meg.



4.34. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a 10. mérés szántott területen mért adataira



4.35. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a 10. mérés tárcásított területen mért adataira

A művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell (4.21. egyenlet) együtthatóit a 4.8. táblázat tartalmazza.

4.8. táblázat. Az illesztett kibocsátási modell együtthatóinak értéke a művelt területek esetében

	Az emisszió kezdeti értéke A	Az emisszió meredeksége c₀	Az emisszió periódusidejét megadó együttható c₁	Az emisszió fázis-eltolódása c₂	A maximális kibocsátás aszimptotája h	Az emisszió minimum-értéke j
Szántott terület	0,4994	-0,000058	0,0043	-0,8985	0,3443	0,1127
Tárcsázott terület	0,1589	-0,0052		-0,8234		

A műveletlen terület mért értékeire illesztett szinuszos modellt, valamint a művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell illeszkedésének pontosságát, valamint a mért és számított adatok alapján meghatározott kibocsátási értékeket a 4.9. táblázatban mutatom be.

4.9. táblázat. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra és a kibocsátott CO₂ mennyisége

	Determinációs együttható (R ²)	Az interpolált mért adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés ideje alatt	A modell adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége a mérés ideje alatt	A mérés ideje alatt kibocsátott CO ₂ mennyiségének eltérése a műveletlen területhez képest	
	[%]	[g/m ²]	[g/m ²]	[g/m ²]	[%]
Műveletlen terület	81,10	8,074	8,074	-	100
Szántott terület	77,99	13,044	13,467	5,393	166
Kultivátorozott terület	88,86	8,509	7,603	-0,471	94

Az elvégzett regresszió analízis eredményei alapján elmondható, hogy a kidolgozott kibocsátási modell megfelelő pontossággal közelíti a mért értékeket.

4.4. A kibocsátási modell továbbfejlesztése

A mérések eredményeinek közelítésére általam használt kibocsátási modell szinuszos tagjában a hőmérsékletváltozás trigonometrikus jellege alapján vettem figyelembe a talaj CO₂ kibocsátásának napi hőmérsékletfüggőségét. A hőmérsékletváltozás ilyen jellegű reprezentálása a kibocsátási modellben a hőmérséklet-CO₂ kibocsátás kapcsolatának lineáris jellegű leírása. A művelést követően emittált CO₂ mennyiségnek meghatározására, ez az általam alkalmazott módszer, a modell kvantitatív jellege miatt kellő pontosságú eredményt ad, mivel a teljes modell regresszió analízisének alapja a lépésközlő numerikus integrálok minimalizálása. Ezzel a módszerrel, a klímaváltozás vonatkozásában legfontosabbnak tekinthető és a kutatás célkitűzésében is szereplő, emittált CO₂ mennyiségére kaphatunk jó közelítést egy viszonylag egyszerű algoritmus szerint elvégezhető regresszió analízissel.

Ugyanakkor lehetséges a kibocsátási modell módosítása abban az esetben, ha a kibocsátási függvény lefutásának a leírása a kitűzött cél. A kibocsátási modell kiegészíthető a szakirodalomban megtalálható (FANG és MONCRIEFF, 2001; LELLEI-KOVÁCS, 2011), a műveletlen talajokra alkalmazott hőmérséklet-CO₂ kibocsátás modellekkel. Ebben az esetben a modell korábban bemutatott szinuszos periodicitásának lefutása változik meg, amely a kibocsátás hőmérsékletfüggő jellegének pontosabb, módosított szinusz függvény szerinti leírását adhatja.

A modell ilyen jellegű teoretikus továbbfejlesztésnek főként a mérések referenciáját adó, műveletlen területek CO₂ kibocsátásának leírásakor lehet jelentősége, mivel a közepes időtartamú mérések eredményei (4.28. és 4.32. ábrák) azt mutatják, hogy a művelt területeken a kibocsátás lefutásában, főként az intenzív művelések esetén, az enzimkinetikai törvényszerűségek dominálnak.

A kvalitatív és kvantitatív megközelítés közötti eltérések feltárására összehasonlítottam az általam alkalmazott lineáris függvénykapcsolatot (4.23. egyenlet) és a LELLEI-KOVÁCS (2011) által legpontosabb közelítést adónak ítélt O'Connell modellt (4.24. egyenlet). Ennek a modellnek a leírása kevésbé adja vissza a biokémiai alapokat, azonban LELLEI-KOVÁCS (2011) megállapítása alapján,

hasonló vagy esetenként jobb közelítést ad, mint például az Arrhenius összefüggés alapján felírt Lloyd-Taylor modell, de matematikailag könnyebben kezelhető.

$$Y = a + bT, \quad (4.23)$$

ahol:

Y - CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2h}$],

T - hőmérséklet [°C],

a = -0,143 - modell paraméter szántóföldi talajokra [-],

b = 0,0164 - modell paraméter szántóföldi talajokra [-] (FANG és MONCRIEFF, 2001).

$$Y = ae^{(bT+cT^2)}, \quad (4.24)$$

ahol:

Y - CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2h}$],

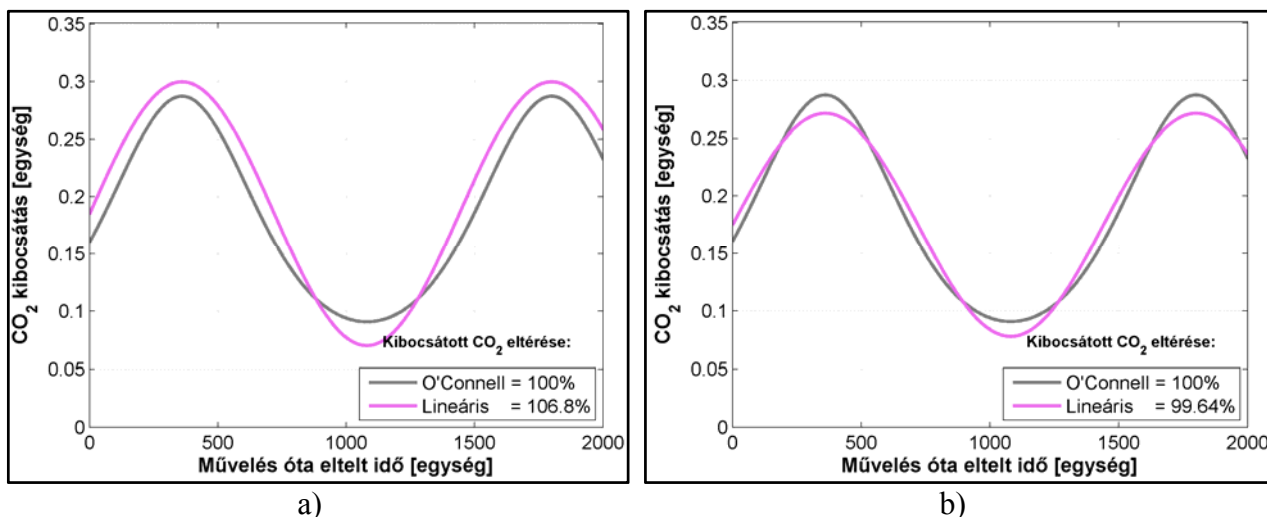
T - hőmérséklet [°C],

a = 0,03282 - modell paraméter szántóföldi talajokra [-],

b = 0,07640 - modell paraméter szántóföldi talajokra [-],

c = 1,485*10⁻⁴ - modell paraméter [-] (FANG és MONCRIEFF, 2001).

A 4.36. ábrán kívánom bemutatni az O'Connell és a lineáris modell eltérését. Az ábrán látható, hogy a FANG és MONCRIEFF (2001) által meghatározott együtthatók használatával a két görbe együttfutása nem kielégítő. A lineáris modell azért közelíti viszonylag rosszul az O'Connell modellt, mivel FANG és MONCRIEFF (2001) az általuk használt együtthatókat nem egy (egyenlőre nem létező) univerzális kapcsolati modellre történő illesztéssel, hanem mérési adatok közelítésével határozta meg. Ez indokolja a 4.36./a ábrán látható eltérést a megadott együtthatók használata esetén. Amennyiben a lineáris kapcsolati modell együtthatóinak meghatározása, az általam használt módszernek megfelelően, az O'Connell modell értékeinek regresszió analízisével történik, a modell alapján számítható emittált mennyiségben nincs jelentős eltérés, csak a görbék lefutása tér el kismértékben.



4.36. ábra. A lineáris és az O'Connell kibocsátási modellek jellegének ábrázolása és a modellek által leírt kibocsátás emittált mennyiségének eltérése

- a) Fang és Moncrieff (2001) által meghatározott együtthatók használatával
 b) A lineáris modell illesztésével meghatározott együtthatókkal

Ezek alapján, az általam felállított gyakorlatias modellben alkalmazott lineáris kapcsolat a hőmérsékletfüggvény és a kibocsátási függvény között nem jelent jelentős elhanyagolást vagy pontatlanságot, mivel a modell együtthatóit a mért pontok közelítésével határoztam meg és nem az irodalomban található együtthatókat használtam.

A művelt parcellák esetében bemutatott eltérés az enzimkinetikai hatás dominanciája miatt tovább veszt jelentőségéből, mivel a kibocsátás lefutását főként ez fogja meghatározni, amíg az exponenciális burkológörbe, a mérési pontosságnak megfelelő értékkel meg nem közelíti az asszimptotáját, vagyis a műveletlen terület maximumértékét.

A műveletlen referencia terület esetében a kibocsátást szinte kizárólag az enzimreakciók sebességének hőmérsékletfüggősége határozza meg. Ezért a referencia területen célszerű a hőmérséklet-emisszió kapcsolati modellek figyelembe vétele. Ennek értelmében a műveletlen terület mért adatainak O'Connell modell alapján történő közelítéséhez az O'Connell modellbe helyettesítettem be a (3.8) egyenlet szerinti napi hőmérséklet változás függvényét és a következő modell illeszkedését vizsgáltam a közepes időtartamú mérések mért adataira:

$$W_r = a e^{(b[k+l \sin(c_1 t)]+c[k+l \sin(c_1 t)]^2)}, \quad (4.25)$$

ahol:

W_r - CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2 h}$],

$a = 0,03282$ - modell paraméter [-](FANG és MONCRIEFF, 2001),

$b = 0,07640$ - modell paraméter [-](FANG és MONCRIEFF, 2001),

$c = 1,485 \cdot 10^{-4}$ - modell paraméter [-](FANG és MONCRIEFF, 2001),

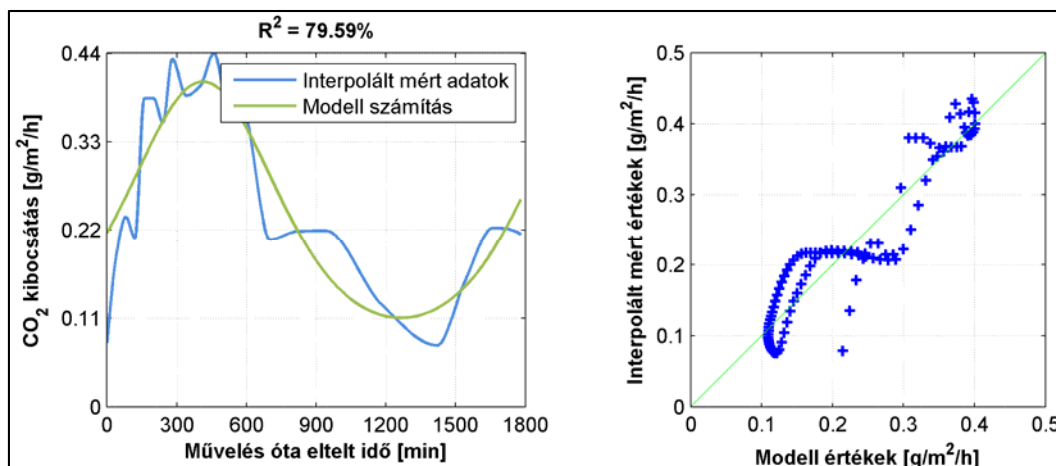
k - középhőmérséklet együttható [-],

l - hőmérséklet amplitúdó együttható [-],

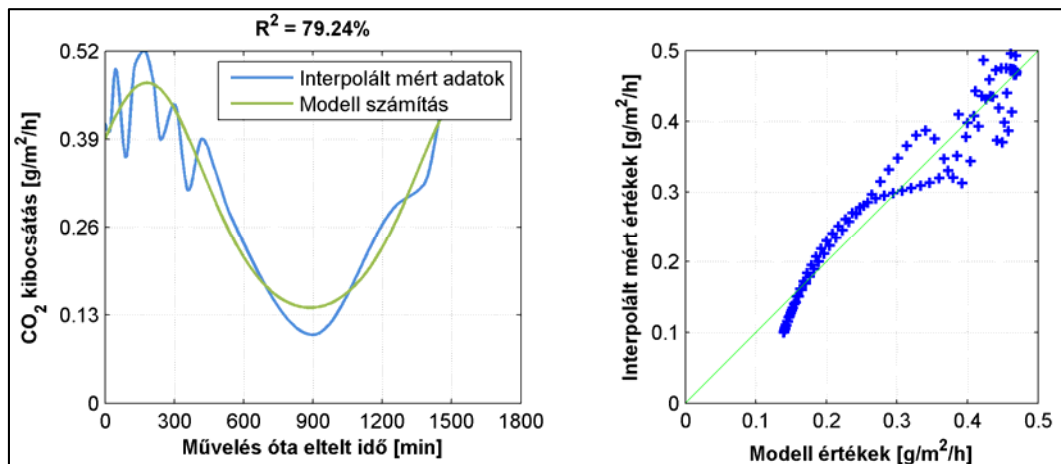
c_1 - kibocsátás periódusideje [-],

t - idő [min].

A modell illesztését a 4.3.1 fejezetben leírtak szerint végeztem, az illesztés eredményeit a 4.37. és 4.38. ábrákon mutatom be.



4.37. ábra. A kibocsátási modell O'Connell modellel kiegészített szinuszos tagjának illeszkedése a műveletlen terület interpolált mért adataira (9. mérés)



4.38. ábra. A kibocsátási modell O'Connell modellel kiegészített szinuszos tagjának illeszkedése a műveletlen terület interpolált mért adataira (10. mérés)

Az ábrák alapján, láthatóan az O'Connell modellel kiegészített kibocsátási modell jobb illeszkedést biztosít, mivel a 9. mérés esetében a determinációs együttható értéke magasabb. Ugyanakkor a 10. mérés esetében, ezzel ellentétes eredményt kaptam, vagyis a determinációs együttható értéke, bár jóval kisebb mértékben, de csökkent.

Fontos megjegyezni, hogy a vizsgált referencia területeken a mérés ideje alatt kibocsátott CO₂ mennyisége a korábban használt és az O'Connell kapcsolati modellel kiegészített kibocsátási modell használata esetén elenyésző mértékben tért el egymástól (4.10. táblázat.). A referenciaterrületek esetében a kibocsátási függvény lefutásának jobb bemutatása érdekében, valamint a szakirodalomban található adatokkal történő összehasonlítás miatt, a referencia területek esetében célszerű az O'Connell, vagy más talajhőmérséklet–CO₂ kibocsátás kapcsolatát leíró modellek használata.

4.10. táblázat. A különböző kapcsolati modelleket alkalmazó kibocsátási modellek illeszkedése a referencia területek mért adataira és a mérés alatt kibocsátott CO₂ mennyisége

	Műveletlen terület (9. mérés)	Műveletlen terület (10. mérés)
Determinációs együttható (R²) [%]	79,59	79,24
Az interpolált mért adatok alapján kibocsátott CO₂ mennyisége a mérés ideje alatt [g/m²]	6,876	8,074
A lineáris kapcsolati modell alapján kibocsátott CO₂ mennyisége a mérés ideje alatt [g/m²]	6,875	8,074
A O'Connell kapcsolati modell alapján kibocsátott CO₂ mennyisége a mérés ideje alatt [g/m²]	6,859	8,096
Az O'Connell kapcsolati modellt tartalmazó kibocsátási modell és a lineáris modell alapján számolt kibocsátott CO₂ mennyiségének eltérése a mérés ideje alatt [%]	99,76	100,2

Ezért a korábban bemutatott általános kibocsátási modellel is kiegészítettem az O'Connell modellel. Így az általános kibocsátási modell a következőképpen írható le:

$$\begin{aligned}
 W_A = & \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)}) + h}{2} \right) \left[a e^{(b(A \sin(c_1 t - c_2)) + c(A \sin(c_1 t - c_2))^2)} \right] \right) \\
 & + \left(\frac{(Be^{(t c_0)}) + h}{2} \right) + \left[a e^{(b(C \sin(c_3 t)) + c(C \sin(c_3 t))^2)} \right] \\
 & * (C \sin(c_3 t)).
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

A (4.26) egyenletben leírt modell, amelynek együtthatói és változói megegyeznek korábbi egyenletekben használtakkal, a talajhőmérséklet–CO₂ kibocsátást leíró kapcsolati modellel tag miatt, megítélésem szerint indokolatlanul bonyolult leírása a művelés utáni talaj CO₂ emisszió

folyamatának, amelynek gyakorlati használata nem indokolt. A fenti kibocsátási modellbe természetesen bármely ismert kapcsolati modell behelyettesíthető, ha a görbe lefutásának pontosítása a cél, de a korábban bemutatott okok miatt, a művelt területek jellemzésére, a lineáris modell is megfelelő közelítést ad. A (4.26) egyenletben leírt modellnek az együtthatói csak hosszas mérésorozattal és az általam bemutatottnál jelentősen bonyolultabb regresszió analízissel határozhatók meg, így inkább további elméleti kutatások kiindulópontja lehet. A művelés után, a talajból emittált CO₂ mennyiségének meghatározására az általam elvégzett mérésekre illesztett gyakorlatias szemléletű, míg a referencia területek jellemzésére a (4.25) egyenletben leírt, kiegészített kibocsátási modell használatát tartom megfelelőnek.

4.5. Új tudományos eredmények

1. Új eljárást dolgoztam ki a különböző talajművelési eljárások talaj-emissziós hatásainak mérésére, amelynek fő elemei a következők:
 - A mérések pontosságának biztosításához, az inkubációs kamrák talaj feletti részének, a környezeti levegőtől izoláltnak kell lennie, mert a mérések tapasztalatai alapján jelentős hibát eredményez a nem megfelelő környezeti illesztés.
 - A kibocsátási folyamatának pontos leírásához a mérési ciklusidőket minimalizálni kell. Ennek alapja a mérőműszer mérési ideje, a mérőkamrák és a mintavételi területek száma.
 - A talaj heterogenitásának reprezentálására, a mérőkamrákat minden mérési ciklusban más mérőpontban kell elhelyezni. A mérések között a mérőkamrákat szellőztetni kell.
 - A méréseket a mérőkamra izolációjának a talaj mikroklímájára gyakorolt kedvezőtlen hatása miatt, az inkubációs idő minimalizálásával kell végezni.
 - Az optimális inkubációs idő a mérőkamra mérete és a mérőműszer mérési és leolvasási pontossága függvényében határozható meg.
2. Talaj szén-dioxid kibocsátási modellt dolgoztam ki, amely a talajművelés felületi emisszió intenzitásának változásait, a művelés által a talajba kevert levegő katalizáló hatása alapján, az elsődrendű reakciókinetikai törvényeknek megfelelően, valamint a biokémiai folyamatok hőmérséklet függősége miatt, a talaj hőmérsékletváltozás jellege és a talajhőmérséklet-szén-dioxid kibocsátás kapcsolata alapján veszi figyelembe.

Bizonyítottam, hogy a művelés utáni szén-dioxid kibocsátás összességében exponenciálisan csökkenő amplitúdójú, szinuszos periodicitással változó függvénnyel írható le, amelynek a vizsgált feltételek mellett a felső burkológörbéje exponenciális függvénnyel közelíthető, míg alsó burkolója a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke alapján konstans függvény.

Megállapítottam, hogy általános esetben a modell alsó és felső burkológörbéje is szinuszos periodicitású exponenciálisan csökkenő függvény.

3. A megalkotott kibocsátási modell alapján, a talajművelés utáni szén-dioxid emisszió változásának jellemzésére, a következő új összefüggést állítottam fel:

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t c_0)}) + h}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2) + 1) \right) + j.$$

Bizonyítottam, hogy az új összefüggést használva, a talajművelés utáni, talaj szén-dioxid emisszió a kibocsátás kezdeti értéke (A), a burkológörbe meredeksége (c_0), a maximális (h) és minimális (j) referencia kibocsátás, a kibocsátás periódusideje (c_1) és fáziseltolása (c_2) valamint a művelést követően eltelt idő (t) alapján, addig az időpontig határozható meg, amíg az exponenciális burkológörbe, a megadott mérési pontosságnak megfelelő értékkel megközelíti az aszimptotáját.

Megállapítottam, hogy az így bevezetett függvénynek alacsony szervesanyag tartalmú homoktalajon, a definiált feltételek mellett végzett vizsgálatok esetén, az emissziós együtthatói a következők:

	A	c ₀	c ₁	c ₂	h	j
Szántott terület	0,6991	-0,0036	0,0037	-0,0870	0,2791	0,0917
Tárcsázott terület	0,6507	-0,0062		-0,0353		

Megállapítottam, hogy az így bevezetett függvénynek alacsony szervesanyag tartalmú, erősen agyagos vályogtalajon, a definiált feltételek mellett végzett vizsgálatok esetén, az emissziós együtthatói a következők:

	A	c ₀	c ₁	c ₂	h	j
Szántott terület	0,4994	-0,000058	0,0043	-0,8985	0,3443	0,1127
Tárcsázott terület	0,1589	-0,0052		-0,8234		

4. Az általam megalkotott kibocsátási modell $T \rightarrow \infty$ esetén, a bolygatatlan talajra vonatkozóan szinuszos összefüggést mutat. A művelés katalizáló hatásának lecsengése utáni időszakra, a kibocsátás jellegének pontosabb leírására a következő összefüggést állítottam fel:

$$W_r = a e^{(b[k+l \sin(c_1 t)] + c[k+l \sin(c_1 t)]^2)}$$

Ez az összefüggés a szakirodalom alapján figyelembe veszi a talajhőmérséklet-szén-dioxid kibocsátás kapcsolati modelljeit és alkalmazásával a kibocsátás intenzitása, az a , b , c , modellparaméterek, a középhőmérséklet együttható (k), hőmérséklet amplitúdó együttható (l), a kibocsátás periódusideje (c_1) valamint a művelést követően eltelt idő (t) alapján számítható.

5. Új algoritmust dolgoztam ki a különböző talajművelő gépek emissziós hatásának vizsgálatára, amely alapján a különböző művelések utáni szén-dioxid kibocsátási modell illeszthető, együtthatói meghatározhatók. Az algoritmus első lépése a szántóföldi mérés végrehajtása különböző művelésű és művelés nélküli területen, második lépése a műveletlen területre vonatkozó modelltalag illesztése a maximális és minimális referencia kibocsátás, valamint a periódusidő meghatározásához, harmadik lépése a teljes kibocsátási modell illesztése, a kibocsátás kezdeti értékét, a burkológörbe meredekségét, a kibocsátás fáziseltolását megadó együtthatók meghatározásához.
6. Szántás, tárcsázás, kultivátorozás esetében meghatároztam az emittált szén-dioxid mennyiségét, amely alapján megállapítottam, hogy a szántott területek kibocsátásának van a legkedvezőtlenebb hatása a klímaváltozásra.

Megállapítottam, hogy a 2-5 óra időtartamú mérések alkalmasak a különböző művelési eljárások rangsorolására, de a kibocsátott szén-dioxid mennyiségének meghatározására nem használhatók.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A klímaváltozás következtében a Földet terhelő kedvezőtlen antropogén hatások ma már olyan mértékűek, hogy a megszokott életminőség fenntartásához az élet minden területét meghatározó folyamatot, a klímaváltozás megállításának, majd visszafordításának alárendelt szemlélet alapján kell átgondolnunk. A mezőgazdasági tevékenységek alapozzák meg a Földünkön élő humán populáció ételtermelését. A káros hatások mérséklése nem csökkentheti a termelést, mivel ez beláthatóan katasztrofális következményekkel járna. A kutatások feladata a megtermelt ételtermelés-alapanyag mennyiségének fenntartása mellett, a klímaváltozást elősegítő hatások mérséklése.

A mezőgazdasági talajhasználat alapja a talajművelés, amelynek egyik klímára káros hatása a talajok intenzív művelése során megnövekedett szén-dioxid kibocsátás. A kibocsátás intenzitása az ipari tevékenységek pontszerű jellegéhez képest jelentősen alacsonyabb, de a felületszerű kibocsátás miatt összességében jelentős. A szakirodalom áttekintése és a hazai és külföldi kutatókkal folytatott szakmai beszélgetések megerősítették, hogy a mezőgazdasági művelésbe vont talajok, művelést követő szén-dioxid emissziójának pontos leírására nem létezik megfelelő, modell szemléletű eljárás.

A különböző művelési eljárások hatáselemzéséhez szántóföldi mérések szükségesek. A korábbi kutatások eredményeként megfogalmazott közelítő modellek, a kibocsátási görbe lefolyásának pontatlan leírását adták. Megítélésem szerint ennek egyik fő oka, hogy a szántóföldi mérések során bonyolult, nagy beruházást és jelentős logisztikát igénylő eljárásokat használtak. Ezért a mintavétel ciklusideje viszonylag nagy volt, így nem nyílt lehetőség a kibocsátási görbék lefutásának pontosabb elemzésére. Az általam kidolgozott és validált mérési eljárással, amely nem tér el jelentősen a hazai kutatók által alkalmazott eljárásoktól, a mérési tapasztalatok alapján megfogalmazott kritikus feltételek betartása mellett, a különböző művelési eljárások szén-dioxid kibocsátásának szántóföldi vizsgálata, a pontos modellezéshez szükséges ciklusidővel és pontossággal elvégezhető.

Megfelelő mért értékek esetén, az eredményekben leírt eljárással a kibocsátási modell illeszthető, és a további művelési eljárások szén-dioxid kibocsátásának kvantitatív meghatározására nyílik lehetőség. Ez alapján új, alacsony kibocsátású eljárások és gépek fejleszthetők ki, amelyek hatása mérhetővé, alkalmazásuk támogathatóvá válik.

Az általam ismertetett eredményekből levonható legfontosabb következtetés, hogy a művelt talajok szén-dioxid kibocsátásának modellezése, a kibocsátási jelenség alapját jelentő fizikai-biokémiai hatások figyelembe vételével megvalósítható. A kibocsátás mértéke, főként a különböző talajművelési eljárások összevetésének tekintetében, az elvárható mértékű pontossággal, számszerűen meghatározható.

A kidolgozott kibocsátási modell, valamint az ennek illesztéséhez szükséges regresszió analízis algoritmusa lehetőséget ad arra, hogy az általam vizsgáltakon felül, a gyakorlati alkalmazásban lévő, akár összes művelési eljárás emissziós hatása modellezhető legyen. Ugyanakkor figyelembe kell venni azt is, hogy az elvégzett regresszió analízis alapját képező mérések különböző körülmények között történtek, azonban ezek nem nevezhetők a talaj állapotát tekintve szélsőértéknek. Vagyis indokolt a modell statisztikai megbízhatóságának vizsgálata kedvezőtlen talajviszonyok között is. Ezen felül, további mérések alapján történő modellillesztés elvégzésével lehetőség nyílik az egyes talaj-, és művelési paraméterek hatásának vizsgálatára. Megfelelő számú és változatosságú mérési adat esetén, faktoranalízis segítségével meghatározható az egyes modellfüggetlen paraméterek (talajtípus, nedvességtartalom, hőmérséklet, stb.) közvetlen hatása a talajművelés utáni szén-dioxid emisszióra. Ezen felül megfelelő számú mérési adat esetén lehetőség nyílik az egyes paraméterek kereszt hatásainak feltárására is.

Az általam kidolgozott kibocsátási modell alkalmazhatóságának legfőbb korlátja a környezeti paraméterek gyors változásának hatása. Ezért további kutatásoknak kell kitérniük a hirtelen hőmérséklet, légnyomás, szélsébség és csapadékváltozásokra is. A modell korlátlan alkalmazhatóságához, ezen jelenségek közvetlen hatásainak vizsgálata is szükséges.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

TALAJMŰVELŐ GÉPEK ÉS ELJÁRÁSOK HATÁSA A TALAJ CO₂ KIBOCSÁTÁSÁRA

Az elmúlt 150 év ipari tevékenysége a légkör üvegházhatású gáz koncentrációjának olyan mértékű növekedését idézte elő, amelyek hatására az éves középhőmérséklet folyamatosan gyorsuló ütemben emelkedik. Ennek hosszú távú hatásai jelenlegi ismereteink alapján nem kiszámíthatóak. A megnövekedett üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának emelkedéséért elsősorban az energia előállítás, az ipar, az intenzív mezőgazdaság és az erdőgazdálkodás felelős. A klímaváltozás mérsékléséhez és visszafordításához, az intenzív kibocsátók mellett a talajművelésnek is hozzá kell járulnia. A művelt talajok szén-dioxid kibocsátásának mérséklése, a klímaváltozásra gyakorolt elsődleges hatás részeként, a talajok szénkészletének védelmét és szervesanyag tartalmának növekedését is szolgálja, amely hosszú távon a talajok minőségének javulását eredményezi.

A mezőgazdasági talajok szén-dioxid kibocsátásának abszolút értéke jól megbecsülhető, de hiányosak azok az ismeretek, amelyek segítségével a művelési eljárások szén-dioxid kibocsátásának modellezése lehetővé válik és pontosan meghatározható, hogy a különböző művelési eljárások és talajművelési rendszerek használata milyen irányban és mértékben befolyásolja a talaj szén-dioxid kibocsátását.

Kutatási célkitűzéseim a talajművelési eljárások szén-dioxid kibocsátásának számszerűsítését lehetővé tevő mérési eljárás kidolgozása, a művelés után a talaj megváltozott szén-dioxid kibocsátásának méréssel történő meghatározása, valamint a mérési eredmények alapján, a művelt területek, művelés utáni emissziójának matematikai modellel történő leírása, és a modell általánosítása voltak.

A célkitűzések megvalósításához áttekintettem a szakirodalomban megtalálható, korábban használt mérési eljárásokat, és egy a gyakorlatban is használható, egyszerű mérési elvű vizsgálati módszert dolgoztam ki. A mérési eljárás kidolgozását és validálását szántóföldi mérésekkel végeztem.

A kidolgozott mérési eljárással, több kísérleti területen, műveletlen, és különböző talajművelő gépekkel művelt területen, rövid és közepes időtartamú szántóföldi méréseket végeztem, amelyek segítségével meghatároztam a talaj, művelés utáni szén-dioxid kibocsátását.

A frissen művelt talaj szén-dioxid emisszióját meghatározó környezeti és biokémiai törvényszerűségek segítségével kidolgoztam mérésekre alkalmazható és általánosított kibocsátási modellt, valamint a modell illesztéséhez szükséges algoritmust. A kidolgozott algoritmus szerint, regresszió analízis segítségével, az általam mért adatok alapján, elvégeztem a kibocsátási modell validálását, majd meghatároztam a kibocsátási modell együtthatóit és a kibocsátott szén-dioxid mennyiségét.

Az elvégzett kutatás eredményeként új tudományos eredményeket fogalmaztam meg, amelyek figyelembe vételével a különböző talajművelési eljárások és gépek hatása, a talaj szén-dioxid kibocsátására meghatározható.

7. SUMMARY

EFFECT OF TILLAGE MACHINES AND PROCESSES ON SOIL CO₂ EMISSION

The industrial activity of the last 150 years caused accelerated rise of the yearly mean temperature by the increased greenhouse gas concentration of the atmosphere. The long term effects of this change cannot be forecasted exactly using our current knowledge. Only questionable climate projections can be made. The most important emitters of greenhouse gases are the energy production, industrial activity, intensive agriculture and forestry. Besides of the intensive emitters, tillage has also contribute to climate change mitigation and reversal. As part of the primary effects on climate change, reducing carbon dioxide emissions of soil, protects the carbon stock and increases the organic matter content which results the long-term improvement in the quality of soil.

The absolute value of carbon-dioxide emission of the agricultural soils can be estimated well, although further researches are necessary in this field to establish adequate description, through mathematical models, of carbon dioxide emission from soil after different cultivation methods and tillage systems.

Three research aims were initially made under my work. First, the development of a suitable measurement procedure which is able to exactly determine the carbon-dioxide emission of soils after tillage. Second, measure the initial and altered emission of soils after tillage by different tillage machines. Third, use the measured data to accurately determine the mathematical description of emission process and extend the model approach to a general scale.

Executing research objectives, literature was reviewed to get information about the previously used measurement techniques. A simple, practice-based measurement method was developed and validated by field tests.

Short- and medium-term field experiments were made using the developed measurement technique to determine the carbon dioxide emissions of soils after tillage using different tillage machines on several experimental fields.

Generalized emission model and fitting algorithm was developed by defining environmental and biochemical laws of soil carbon dioxide emissions after tillage.

Validation of the developed emission model and the amount of emitted carbon dioxide were determined by assigning values to model coefficients, based on regression analysis of the measured data.

As the result of my research I have defined new scientific results which enable to describe and to quantify the effect of different tillage methods on carbon-dioxide emission of soil.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

- AGREN G.I., MCMURTRIE R.E., PARTON W.J., PASTOR J., SHUGART H.H. (1991): State-of-the-Art of Models of Production-Decomposition Linkages in Conifer and Grassland Ecosystems. *Ecological Applications*, 1 (2) pp. 118–138.
- ALVAREZ R., ALVAREZ C.R., LORENZO G. (2001): Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *European Journal of Soil Biology*, 37 (3) pp. 161–166.
- ANDERSON J.P.E. (1982): Soil respiration. In: PAGE, A.L., MILLER, R.H., KEENEY, D.R. (Szerk.): *Methods of soil analysis Part 2., Chemical and Microbiological Properties*, Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, pp. 831–871.
- ÁNGYÁN J. (2003): A környezet- és tájgazdálkodás agroökológiai, földhasználati alapozása, MTA Doktori értekezés, Gödöllő: Szent István Egyetem, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, p. 163.
- ÁNGYÁN J., MENYHÉRT Z. (1997): *Alkalmazkodó növénytermesztés, ésszerű környezetgazdálkodás*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó.
- ARRHENIUS S. (1889): Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 4 pp. 226–248.
- ARRHENIUS S. (1896): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine Series 5*, 41 (251) pp. 237–276.
- ARRUE J.L. (1997): Effect of conservation tillage in the CO₂ sink effect of the soil. In: GACÍA-TORRES, L., GANZÁLEZ-FERNÁNDEZ, P. (Szerk.): *Conservation agriculture: agronomic, environmental and economic bases*, Córdoba, España: Asociación Española Agricultura de Conservación (AEAC/ SV), pp. 189–200.
- ASLAM T., CHOUDHARY M.A., SAGGAR S. (2000): Influence of land-use management on CO₂ emissions from a silt loam soil in New Zealand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 77 (3) pp. 257–262.
- BAKER A.C., GLYNN P.W., RIEGL B. (2008): Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80 (4) pp. 435–471.
- BAKER J.M., GRIFFIS T.J. (2005): Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128 (3-4) pp. 163–177.
- BALDOCCHI D.D., MEYERS T.P. (1991): Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest: 1. Evaporation and CO₂ efflux. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 96 (D4) pp. 7271–7285.
- BALDOCCHI D.D., VERMA S.B., MATT D.R., ANDERSON D.E. (1986): Eddy-Correlation Measurements of Carbon Dioxide Efflux from the Floor of a Deciduous Forest. *The Journal of Applied Ecology*, 23 (3) p. 967.
- BALL B.C., SCOTT A., PARKER J.P. (1999): Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 53 (1) pp. 29–39.
- BAVIN T.K., GRIFFIS T.J., BAKER J.M., VENTEREA R.T. (2009): Impact of reduced tillage and cover cropping on the greenhouse gas budget of a maize/soybean rotation ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134 (3-4) pp. 234–242.
- BEER C., REICHSTEIN M., TOMELLERI E., CIAIS P., JUNG M., CARVALHAIS N., RODENBECK C., ARAIN M.A., BALDOCCHI D., BONAN G.B., BONDEAU A., CESCATTI A., LASSLOP G., LINDROTH A., LOMAS M., LUYSSAERT S., MARGOLIS

- H., OLESON K.W., ROUPSARD O., VEENENDAAL E., VIOVY N., WILLIAMS C., WOODWARD F.I., PAPALE D. (2010): Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329 (5993) pp. 834–838.
- BHATTACHARYYA P., NEOGI S., ROY K.S., RAO K.S. (2013): Gross primary production, ecosystem respiration and net ecosystem exchange in Asian rice paddy: an eddy covariance-based approach. *Current Science(Bangalore)*, 104 (1) pp. 67–75.
- BIRKÁS M. (1993): Talajművelés., pp. 96–195. In: NYÍRI L. (Szerk.): *Földműveléstan*, Budapest: Mezőgazda Kiadó. 483. p.
- BIRKÁS M. (2001): *Talajművelés a fenntartható gazdálkodásban*. Gödöllő: Szent István Egyetem, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar, Növénytermesztési Intézet Földműveléstani Tanszék. 292 p.
- BIRKÁS M. (Szerk.) (2006): *Földművelés és földhasználat*.
- BIRKÁS M. (2009): A klasszikus talajművelési elvárások és a klímakár csökkentés kényszere. *Növénytermelés*, 58 (2) pp. 123–134.
- BOLIN B., JÄGER J., DÖÖS B.R. (1985): The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems: A Synthesis of Present Knowledge. In: *SCOPE 29 - The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* [online], Presented at the UNEP/WMO/ICSU Conference on the assessment of the role of carbon dioxide and of other greenhouse gases in climate variations and associated impacts, Villach, Austria. URL: <http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope29/chapter01.html>.
- BORKEN W., DAVIDSON E.A., SAVAGE K., GAUDINSKI J., TRUMBORE S.E. (2003): Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (6) pp. 1888–1896.
- BOZÓ L., HORVÁTH L., LÁNG I., VÁRI A. (Szerk.) (2010): *Környezeti jövőkép - Környezet- és klímabiztonság*. Budapest: Magyar Tudományos Akadémia. p. 63.
- BUNNELL F.L., TAIT D.E.N., FLANAGAN P.W. (1977a): Microbial respiration and substrate weight loss—II. *Soil Biology and Biochemistry*, 9 (1) pp. 41–47.
- BUNNELL F.L., TAIT D.E.N., FLANAGAN P.W., VAN CLEVER K. (1977b): Microbial respiration and substrate weight loss—I. *Soil Biology and Biochemistry*, 9 (1) pp. 33–40.
- BUSINGER J.A. (1986): Evaluation of the Accuracy with Which Dry Deposition Can Be Measured with Current Micrometeorological Techniques. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25 (8) pp. 1100–1124.
- CAMPBELL C.A., SOUSTER W. (1982): Loss of organic matter and potentially mineralizable nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. *Canadian Journal of Soil Science*, 62 (4) pp. 651–656.
- CHEN X., TANG J., JIANG L., LI B., CHEN J., FANG C. (2010): Evaluating the impacts of incubation procedures on estimated Q₁₀ values of soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (12) pp. 2282–2288.
- COLE C.V., DUXBURY J., FRENEY J., HEINEMEYER O., MINAMI K., MOSIER A., PAUSTIAN K., ROSENBERG N., SAMPSON N., SAUERBECK D. (1997): Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49 (1-3) pp. 221–228.
- COLE V. (1996): Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: *Climate Change 1995*, New York: Cambridge Univ. Press, pp. 745–771.
- COX P.M., BETTS R.A., JONES C.D., SPALL S.A., TOTTERDELL I.J. (2000): Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408 (6809) pp. 184–187.
- CRILL P.M. (1991): Seasonal patterns of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 5 (4) pp. 319–334.
- CRUSE R.M., LINDEN D.R., RADKE J.K., LARSON W.E., LARNTZ K. (1980): A model to predict tillage effects on soil temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (2) pp. 378–383.

- DAI A. (2011): Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2 (1) pp. 45–65.
- DAO T.H. (1998): Tillage and Crop Residue Effects on Carbon Dioxide Evolution and Carbon Storage in a Paleustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 62 (1) p. 250.
- DAVIDSON E.A., SAVAGE K., VERCHOT L.V., NAVARRO R. (2002): Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113 (1) pp. 21–37.
- DAVIDSON E.A., TRUMBORE S.E. (1995): Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. *Tellus B*, 47 (5) pp. 550–565.
- DERPSCH R., FRANZLUEBBERS A.J., DUIKER S.W., REICOSKY D.C., KOELLER K., FRIEDRICH T., STURNY W.G., SÁ J.C.M., WEISS K. (2014): Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil and Tillage Research*, 137 pp. 16–22.
- DESJARDINS R.L. (1985): Carbon dioxide budget of maize. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36 (1) pp. 29–41.
- DICKINSON R.E., CICERONE R.J. (1986): Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature*, 319 (6049) pp. 109–115.
- DORAN J.W., JONES A.J. (1996): Field and laboratory tests of soil respiration. *Methods for assessing soil quality*, pp. 231–245.
- DUNNE J.A., HARTE J. (2001): Greenhouse effect. *Encyclopedia of Biodiversity*, 3 pp. 277–293.
- EDENHOFER O., PICHS-MADRUGA R., SOKONA Y., FARAHANI E., KADNER S., SEYBOTH K., ADLER A., BAUM I., BRUNNER S., EICKEMEIER P., KRIEMANN B., SAVOLAINEN J., SCHÖMER S., VON STECHOW C., ZWICKEL T., MINX J.C. (Szerk.) (2013a): IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 383–464.
- EDENHOFER O., PICHS-MADRUGA R., SOKONA Y., KADNER S., MINX J.C., BRUNNER S. (Szerk.) (2013b): IPCC, 2014: Technical Summary. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- EDWARDS N.T. (1974): A moving chamber design for measuring soil respiration rates. *Oikos*, 25 (1) pp. 97–101.
- EDWARDS N.T., RIGGS J.S. (2003): Automated Monitoring of Soil Respiration. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (4) pp. 1266–1271.
- ELLERT B.H., BETTANY J.R. (1992): Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 56 (4) pp. 1133–1141.
- ELLERT B.H., JANZEN H.H. (1999): Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies. *Soil and Tillage Research*, 50 (1) pp. 21–32.
- FALGE E., RETH S., BRÜGGEMANN N., BUTTERBACH-BAHL K., GOLDBERG V., OLTCHEV A., SCHAAF S., SPINDLER G., STILLER B., QUECK R., KÖSTNER B., BERNHOFER C. (2005): Comparison of surface energy exchange models with eddy flux data in forest and grassland ecosystems of Germany. *Ecological Modelling*, 188 (2-4) pp. 174–216.
- FANG C., MONCRIEFF J.B. (1996): An improved dynamic chamber technique for measuring CO₂ efflux from the surface of soil. *Functional Ecology*, 10 (2) pp. 297–305.
- FANG C., MONCRIEFF J.B. (1998a): Simple and fast technique to measure CO₂ profiles in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (14) pp. 2107–2112.
- FANG C., MONCRIEFF J.B. (1998b): An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO₂ efflux measurement. *Functional Ecology*, 12 (2) pp. 319–325.
- FANG C., MONCRIEFF J.B. (1999): A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95 (4) pp. 225–236.
- FANG C., MONCRIEFF J.B. (2001): The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology*

and *Biochemistry*, 33 (2) pp. 155–165.

- FARKAS C., GIORGIO A., BALOGH J., BARCZA Z., BIRKÁS M., CZÓBEL S., DAVIS K.J., FÜHRER E., GELYBÓ G., GROSZ B., KLJUN N., KOÓS S., MACHON A., MARJANOVIC H., NAGY Z., PERESSOTTI A., PINTÉR K., TÓTH E., HORVÁTH L. (2011): Methodologies. In: HASZPRA, L. (Szerk.): *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* [online], Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 65–90. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-9950-1>.
- FENYVESI L., MÁTYÁS L., PAZSICZKI I. (2004): *Technologies of pig husbandry*. Gödöllő: Hungarian Institute of Agricultural Engineering (MGI). p. 108.
- FIELD C.B., BARROS V.R., MASTRANDREA M.D. (Szerk.) (2014): IPCC, 2014: Summary for Policy Makers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 1–32.
- FIGUEROA J.D., FOUT T., PLASYNSKI S., MCILVRIED H., SRIVASTAVA R.D. (2008): Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2 (1) pp. 9–20.
- FLECHARD C.R., NEFTEL A., JOCHER M., AMMANN C., LEIFELD J., FUHRER J. (2007): Temporal changes in soil pore space CO₂ concentration and storage under permanent grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142 (1) pp. 66–84.
- FODOR L., PEINE F. (2014): A kibocsátási egységek kereskedelme: Európa-jogi alapok – a német és a magyar nemzeti szabályozás 2004–2012 között. *Agrár- és Környezetjog*, 14 pp. 3–52.
- FOGARASSY C., LUKÁCS Á. (2009): *Karbonszállás - avagy a tervszerű üvegházgáz csökkentés és emissziómenedzsment gyakorlati kérdései*. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó.
- FORTIN M.-C., ROCHETTE P., PATTEY E. (1996): Soil Carbon Dioxide Fluxes from Conventional and No-Tillage Small-Grain Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 60 (5) p. 1541.
- FRANZLUEBBERS A.J., HONS F.M., ZUBERER D.A. (1995a): Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density. *Applied Soil Ecology*, 2 (2) pp. 95–109.
- FRANZLUEBBERS A.J., HONS F.M., ZUBERER D.A. (1995b): Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil and Tillage Research*, 34 (1) pp. 41–60.
- FRITSCH F.N., CARLSON R.E. (1980): Monotone Piecewise Cubic Interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17 (2) pp. 238–246.
- FUGLESTVEDT J.S., BERNTSEN T.K., GODAL O., SAUSEN R., SHINE K.P., SKODVIN T. (2003): Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. *Climatic Change*, 58 (3) pp. 267–331.
- GEHRIG-FASEL J., GUISAN A., ZIMMERMANN N.E. (2008): Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model. *Ecological Modelling*, 213 (3-4) pp. 345–355.
- GYURICZA C., UJJ A., MIKÓ P., NAGY L., FENYVESI L. (2007): Long-term soil tillage effects on selected physical and biological parameters. *Cereal Research Communications*, 35 (2) pp. 433–436.
- HANSEN J., FUNG I., LACIS A., RIND D., LEBEDEFF S., RUEDY R., RUSSELL G., STONE P. (1988): Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. *Journal of Geophysical Research*, 93 (D8) pp. 9341–9364.
- HANSEN J., SATO M., RUEDY R., LO K., LEA D.W., MEDINA-ELIZADE M. (2006): Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (39) pp. 14288–14293.
- HEALY R.W., STRIEGL R.G., RUSSELL T.F., HUTCHINSON G.L., LIVINGSTON G.P. (1996): Numerical Evaluation of Static-Chamber Measurements of Soil—Atmosphere Gas Exchange:

- Identification of Physical Processes. *Soil Science Society of America Journal*, 60 (3) pp. 740–747.
- HENDRIX P., HAN C., GROFFMAN P. (1988): Soil respiration in conventional and no-tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations. *Soil and Tillage Research*, 12 (2) pp. 135–148.
- HIBBARD K.A., LAW B.E., RYAN M.G., TAKLE E.S. (2004): Issues and recent advances in soil respiration. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85 (22) pp. 220–220.
- HIRANO T. (2003): Long-term half-hourly measurement of soil CO₂ concentration and soil respiration in a temperate deciduous forest. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D20) pp. 4631–4643.
- HIRSCH A.I., TRUMBORE S.E., GOULDEN M.L. (2004): The surface CO₂ gradient and pore-space storage flux in a high-porosity litter layer. *Tellus B*, 56 (4) pp. 312–321.
- HOLLINGER S.E., BERNACCHI C.J., MEYERS T.P. (2005): Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130 (1-2) pp. 59–69.
- HOLMES G., KEITH D.W. (2012): An air-liquid contactor for large-scale capture of CO₂ from air. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370 (1974) pp. 4380–4403.
- HOLTHAUSEN R.S., CALDWELL M.M. (1980): Seasonal dynamics of root system respiration in *Atriplex confertifolia*. *Plant and Soil*, 55 (2) pp. 307–317.
- HORWATH W. (2007): Carbon cycling and formation of soil organic matter. In: CHESWORTH, W. (Szerk.): *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, Springer, pp. 303–339.
- HOUGHTON R.A., HOUSE J.I., PONGRATZ J., VAN DER WERF G.R., DEFRIES R.S., HANSEN M.C., LE QUÉRÉ C., RAMANKUTTY N. (2012): Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9 (12) pp. 5125–5142.
- HOYOS C.D. (2006): Deconvolution of the Factors Contributing to the Increase in Global Hurricane Intensity. *Science*, 312 (5770) pp. 94–97.
- HUANG C., BARNETT A.G., WANG X., VANECKOVA P., FITZGERALD G., TONG S. (2011): Projecting Future Heat-Related Mortality under Climate Change Scenarios: A Systematic Review. *Environmental Health Perspectives*, 119 (12) pp. 1681–1690.
- HUDOBA Z., KOCSIS L., FENYVESI L. (2010): The energetic comparative examination of tillage technologies for oil seed rape. In: *International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010: towards environmental technologies, Clermont-Ferrand, France, 6-8 September 2010, (Paper 389)* [online]. URL: http://static.cemagref.fr/publis_ageng.zip.
- JANSSENS I.A., KOWALSKI A.S., LONGDOZ B., CEULEMANS R. (2000): Assessing forest soil CO₂ efflux: an in situ comparison of four techniques. *Tree Physiology*, 20 (1) pp. 23–32.
- JASSAL R.S., BLACK T.A., DREWITT G.B., NOVAK M.D., GAUMONT-GUAY D., NESIC Z. (2004): A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (3-4) pp. 219–236.
- JENKINSON D.S., ANDREW S.P.S., LYNCH J.M., GOSS M.J., TINKER P.B. (1990): The Turnover of Organic Carbon and Nitrogen in Soil [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 329 (1255) pp. 361–368.
- JENSEN L.S., MUELLER T., TATE K.R., ROSS D.J., MAGID J., NIELSEN N.E. (1996): Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (10) pp. 1297–1306.
- JOLÁNKAI M., BIRKÁS M. (2005): Carbon Sequestration of Crops Influenced by Nitrogen Fertilization. In: *Proceedings. 43rd Croatian and 3rd International Symposium on Agriculture. Opatija. Croatia* [online], pp. 540–543. URL: http://sa.agr.hr/pdf/2008/sa2008_0503.pdf?origin=publication_detail.
- JORDAN A., O'RIORDAN T. (2003): Institutions for global environmental change. *Global Environmental Change*, 13 (3) p. 223.

- JÓRI I.J. (2004): Tillage Intensity and Tillage-Induced CO₂ Loss. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 1 (1) pp. 31–45.
- JÓRI J.I. (2013): *A talajművelőgépek választás és üzemeltetés kézikönyve (Kutatási-kísérleti eredmények, üzemeltetési tapasztalatok)*. Szekszárd: Agroforum.
- JÓRI J.I., RÁDICS J.P., PAZSICZKI I., SZABÓ I., GYURICZA C. (2004): Talajművelési eljárások hatása a talaj CO₂ kibocsátására. In: *MTA – AMB K+F Tanácskozás, 1. kötet*, FVM Műszaki Intézet, pp. 214–219.
- JÓRI J.I., RÁDICS J.P., SZABÓ I. (2006): Long term effect of tillage on soil CO₂ emission. In: *Book of Abstracts, XVI. CIGR World Congress: Agricultural Engineering, for a Better World*, p. CD + 150–152. p.
- KANEMASU E.T., POWERS W.L., SIJ J.W. (1974): Field chamber measurements of CO₂ flux from soil surface. *Soil Science*, 118 (4) pp. 233–237.
- KARLEN D.L., WOLLENHAUPT N.C., ERBACH D.C., BERRY E.C., SWAN J.B., EASH N.S., JORDAHL J.L. (1994): Long-term tillage effects on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 32 (4) pp. 313–327.
- KAVANAU J.L. (1950): Enzyme kinetics and the rate of biological processes. *The Journal of general physiology*, 34 (2) pp. 193–209.
- KEITH D.W., HEIDEL K., CHERRY R. (2010): Capturing CO₂ from the atmosphere: Rationale and Process Design Considerations. In: LAUNDER, B., THOMPSON, M. (Szerk.): *Geo-Engineering Climate Change: Environmental necessity or Pandora's box?*, Cambridge University Press, pp. 107–126.
- KESSAVALOU A., MOSIER A.R., DORAN J.W., DRIJBER R.A., LYON D.J., HEINEMEYER O. (1998): Fluxes of Carbon Dioxide, Nitrous Oxide, and Methane in Grass Sod and Winter Wheat-Fallow Tillage Management. *Journal of Environment Quality*, 27 (5) pp. 1094–1104.
- KICKLIGHTER D.W., MELILLO J.M., PETERJOHN W.T., RASTETTER E.B., MCGUIRE A.D., STEUDLER P.A., ABER J.D. (1994): Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils. *Journal of Geophysical Research*, 99 (D1) pp. 1303–1315.
- KIMBALL B.A., JACKSON R.D., REGINATO R.J., NAKAYAMA F.S., IDSO S.B. (1976): Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 40 (1) pp. 18–25.
- KIMBALL B.A., LEMON E.R. (1971): Air Turbulence Effects upon Soil Gas Exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 35 (1) pp. 16–21.
- KIM J., VERMA S.B. (1990): Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteorology*, 52 (1-2) pp. 135–149.
- KING J.A., HARRISON R. (2002): Measuring soil respiration in the field: an automated closed chamber system compared with portable IRGA and alkali absorption methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33 (3-4) pp. 403–423.
- KIRSCHBAUM M.U.F. (1995): The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 27 (6) pp. 753–760.
- KIRSCHBAUM M.U.F. (2013): Assessing the Relative Climate Change Impacts of Methane and Nitrous Oxide by Using Climate Change Impact Potentials. In: CURRIE, L.D., CHRISTENSEN, C.L. *Accurate and efficient use of nutrients on farms* [online], Palmerston North, New Zealand: Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, p. 15. URL: <http://flrc.massey.ac.nz/publications.html>.
- KNOEPP J.D., VOSE J.M., OTHERS (2002): Quantitative comparison of in situ soil CO₂ flux measurement methods, p. 16.
- KOVÁCS G., ZSEMBELI J., SZÖLLŐSI N., JUHÁSZ C. (2008): Effect of reduced cultivation systems on the CO₂-emission of the soil. *Cereal Research Communications*, 36 pp. 1247–1250.
- KUMP L.R. (2002): Reducing uncertainty about carbon dioxide as a climate driver. *Nature*, 419

(6903) pp. 188–190.

- LAGARIAS J.C., REEDS J.A., WRIGHT M.H., WRIGHT P.E. (1998): Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9 (1) pp. 112–147.
- LAL R. (1997): Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43 (1-2) pp. 81–107.
- LAL R. (Szerk.) (1998): *The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Chelsea, MI: Ann Arbor Press. 128 p.
- LAL R. (2004): Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123 (1-2) pp. 1–22.
- LAL R., KIMBLE J., FOLLETT R., STEWARD B.A. (Szerk.) (1998a): *Management of Carbon sequestration in soil*. Boca Raton, FL: CRC Press. 457. p.
- LAL R., KIMBLE J., FOLLETT R., STEWARD B.A. (Szerk.) (1998b): *Soil processes and the C cycle*. Boca Raton, FL: CRC Press. 609. p.
- LAL R., KIMBLE J., LEVINE I., STEWARD B.A. (Szerk.) (1995a): *Soils and global change*. Boca Raton: CRC/Lewis Publishers. 440. p.
- LAL R., KIMBLE J., LEVINE I., STEWARD B.A. (Szerk.) (1995b): *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton: CRC/Lewis Publishers. 385. p.
- LAL R., KIMBLE J.M. (1997): Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49 (1-3) pp. 243–253.
- LAL R., REICOSKY D.C., HANSON J.D. (2007): Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, 93 (1) pp. 1–12.
- LÁNG I., CSETE L., JOLÁNKAI M. (Szerk.) (2007): *A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok*. Budapest: Szaktudás Kiadó Ház. 220. p.
- LASCALA JR. N., LOPES A., PANOSSO A.R., CAMARA F.T., PEREIRA G.T. (2005): Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. *Soil and Tillage Research*, 84 (2) pp. 222–225.
- LASCALA JR. N., LOPES A., SPOKAS K., ARCHER D.W., REICOSKY D. (2009): First-order decay models to describe soil C-CO₂ loss after rotary tillage. *Sci. Agric.(Piracicaba, Braz.)*, 66 (5) pp. 650–657.
- LASCALA JR. N., LOPES A., SPOKAS K., BOLONHEZI D., ARCHER D., REICOSKY D. (2008): Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. *Soil and Tillage Research*, 99 (1) pp. 108–118.
- LASCALA N., BOLONHEZI D., PEREIRA G.T. (2006): Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 91 (1-2) pp. 244–248.
- LASCALA N., MARQUES J., PEREIRA G.T., CORA J.E. (2000): Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (10) pp. 1459–1462.
- LASHOF D.A., AHUJA D.R. (1990): Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 344 (6266) pp. 529–531.
- LEDANTEC V., EPRON D., DUFRENE E. (1999): Soil CO₂ efflux in a beech forest: comparison of two closed dynamic systems. *Plant and Soil*, 214 (1-2) pp. 125–132.
- LELLEI-KOVÁCS E. (2008): Főbb kérdések és megoldások a talajlégzés vizsgálatának témakörében. In: KRÖEL-DULAY, G., KALAPOSI, T., MOJZES, A. (Szerk.): *Talaj-vegetáció-klíma kölcsönhatások. Köszöntjük a 70 éves Láng Editet*, Vácrátót: MTA Ökológiai és Botanikai Kutatóintézete, pp. 135–146.
- LELLEI-KOVÁCS E. (2011): Talajlégzés vizsgálata a kiskunsági homoki erdősztyepp ökoszisztémában, Doktori (PhD) értekezés, Vácrátót: ELTE Természettudományi Kar, Biológiai Intézet, Biológia Doktori Iskola, p. 94.
- LELLEI-KOVÁCS E., KOVÁCS-LÁNG E., BOTTA-DUKÁT Z., KALAPOSI T., EMMETT B., BEIER C. (2011): Thresholds and interactive effects of soil moisture on the temperature response of soil respiration. *European Journal of Soil Biology*, 47 (4) pp. 247–255.

- LIU Z., FU B., ZHENG X., LIU G. (2010): Plant biomass, soil water content and soil N:P ratio regulating soil microbial functional diversity in a temperate steppe: A regional scale study. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (3) pp. 445–450.
- LIVINGSTON G.P., HUTCHINSON G.L. (1995): Enclosure-based measurement of trace gas exchange: Applications and sources of error. In: MATSON, P.A., HARRISS, R.C. *Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*, Oxford, England ; Cambridge, Mass., USA: Blackwell Science, pp. 14–51.
- LLOYD J., TAYLOR J.A. (1994): On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8 (3) pp. 315–323.
- LOPEZ-GARRIDO R., MADEJÓN E., MORENO F., MURILLO J.M. (2014): Conservation Tillage Influence on Carbon Dynamics Under Mediterranean Conditions. *Pedosphere*, 24 (1) pp. 65–75.
- LUND C.P., RILEY W.J., PIERCE L.L., FIELD C.B. (1999): The effects of chamber pressurization on soil-surface CO₂ flux and the implications for NEE measurements under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 5 (3) pp. 269–281.
- LUO Z., WANG E., SUN O.J., SMITH C.J., PROBERT M.E. (2011): Modeling long-term soil carbon dynamics and sequestration potential in semi-arid agro-ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12) pp. 1529–1544.
- MACDONALD N.W., ZAK D.R., PREGITZER K.S. (1995): Temperature Effects on Kinetics of Microbial Respiration and Net Nitrogen and Sulfur Mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 59 (1) pp. 233–240.
- MAIER M., SCHACK-KIRCHNER H., HILDEBRAND E.E., HOLST J. (2010): Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. *European Journal of Soil Science*, 61 (6) pp. 877–887.
- MAIER M., SCHACK-KIRCHNER H., HILDEBRAND E.E., SCHINDLER D. (2011): Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: Implications for flux models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12) pp. 1723–1730.
- MANNING M., REISINGER A. (2011): Broader perspectives for comparing different greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (1943) pp. 1891–1905.
- MANN, L.K. (2004): Changes in Soil Carbon Storage After Cultivation. *Soil Science*, 142 (5) pp. 279–288.
- MASSMAN W.J., SOMMERFELD R.A., MOSIER A.R., ZELLER K.F., HEHN T.J., ROCHELLE S.G. (1997): A model investigation of turbulence-driven pressure-pumping effects on the rate of diffusion of CO₂, N₂O, and CH₄ through layered snowpacks. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D15) pp. 18851–18863.
- MASSON-DELMOTTE V., SCHULZ M. (Szerk.) (2013): Information from Paleoclimate Archives. In: *IPCC Climate change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 383–464.
- MATTHIAS A.D., BLACKMER A.M., BREMNER J.M. (1980): A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils. *Journal of Environment Quality*, 9 (2) pp. 251–256.
- METZ B., DAVIDSON O., CONICK H., LOOS M., MEYER L. (Szerk.) (2005): *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge, NY, USA: Cambridge University Press.
- MEYER W.S., REICOSKY D.C., SHELL G.S.. (1987): *Technical Report No. 5*. Griffith, Australia: Centre for Irrigation and Freshwater Research. 79. p.
- MOLER C.B. (2004): Interpolation. In: *Numerical Computing with Matlab* [online], Society for Industrial and Applied Mathematics, p. 27. URL: <http://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898717952>.
- MONTEITH J.L., SZEICZ G., YABUKI K. (1964): Crop photosynthesis and the flux of carbon dioxide below the canopy. *The Journal of Applied Ecology*, 1 (2) pp. 321–337.
- MOSIER A.R. (1990): Gas flux measurement techniques with special reference to techniques suitable for measurements over large ecologically uniform areas. In: BOUWMAN, A.F. (Szerk.): *Soils*

and the greenhouse effect, Chichester; New York: Wiley, pp. 289–301.

- NAGANAWA T., KYUMA K. (1991): Concentration dependence of CO₂ evolution from soil in chamber with low CO₂ concentration (below 2,000 ppm), and CO₂ diffusion/absorption model in soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 37 (3) pp. 381–386.
- NAGANAWA T., KYUMA K., YAMAMOTO H., YAMAMOTO Y., YOKOI H., TATSUYAMA K. (1989): Measurement of soil respiration in the field: influence of temperature, moisture level, and application of sewage sludge compost and agro-chemicals. *Soil Science and Plant Nutrition*, 35 (4) pp. 509–516.
- NAIK V., JAIN A.K., PATTEN K.O., WUEBBLES D.J. (2000): Consistent sets of atmospheric lifetimes and radiative forcings on climate for CFC replacements: HCFCs and HFCs. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D5) pp. 6903–6914.
- NAKAYAMA F.S. (1990): Soil respiration. *Remote Sensing Reviews*, 5 (1) pp. 311–321.
- NAY S.M., MATTSO K.G., BORMANN B.T. (1994): Biases of Chamber Methods for Measuring Soil CO₂ Efflux Demonstrated with a Laboratory Apparatus. *Ecology*, 75 (8) pp. 2460–2463.
- NICHOLLS N. (2004): The changing nature of Australian droughts. *Climatic Change*, 63 (3) pp. 323–336.
- NORMAN J.M., GARCIA R., VERMA S.B. (1992): Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D17) pp. 18845–18853.
- NORMAN J.M., KUCHARIK C.J., GOWER S.T., BALDOCCHI D.D., CRILL P.M., RAYMENT M., SAVAGE K., STRIEGL R.G. (1997): A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24) pp. 28771–28777.
- NYESTE L. (1988): Biológiai rendszerek kinetikája. In: *Biomérnöki műveletek és alapfolyamatok*, Budapest: Tankönyvkiadó, p. 274.
- O'CONNELL A.M. (1990): Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of South-Western Australia: An empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (2) pp. 153–160.
- OENEMA O., VELTHOF G., KUIKMAN P. (2001): Technical and policy aspects of strategies to decrease greenhouse gas emissions from agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60 (1-3) pp. 301–315.
- OORTS K., MERCKX R., GRÉHAN E., LABREUCHE J., NICOLARDOT B. (2007): Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil and Tillage Research*, 95 (1-2) pp. 133–148.
- PACALA S. (2004): Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, 305 (5686) pp. 968–972.
- PALÁNCZ B. (2011): *Mesterséges Intelligencia Építőmérnököknek (Jegyzet)* [online]. Budapest: BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék. URL: http://www.fmt.bme.hu/fmt/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOFTMKT2.
- PARKINSON K.J. (1981): An improved method for measuring soil respiration in the field. *Journal of Applied Ecology*, 18 (1) pp. 221–228.
- PARKIN T.B. (1996): Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W., FRANCO-VIZCAÍNO, E. (Szerk.): *Methods for assessing soil quality*, Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, pp. 231–245.
- PARKIN T.B., VENTEREA R.T. (2010): Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. *Sampling Protocols. USDA-ARS, Fort Collins, CO*, pp. 1–39.
- PARTON W.J., WOOPER P.L., MARTIN A. (1994): Modeling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. In: WOOPER, P.L., SWIFT, M.J. (Szerk.): *The biological management of tropical soil fertility*, Chichester; New York: Sayce Publishing, Tropical Soil Biology and Fertility Programme, pp. 171–188.
- PAUSTIAN K., ANDRÉN O., JANZEN H.H., LAL R., SMITH P., TIAN G., TIESSEN H., NOORDWIJK M., WOOPER P.L. (1997): Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 13 (s4) pp. 230–244.
- PAUSTIAN K., COLE C.V., SAUERBECK D., SAMPSON N. (1998): CO₂ Mitigation by

- Agriculture: An Overview. *Climatic Change*, 40 (1) pp. 135–162.
- PETIT J.R., JOUZEL J., RAYNAUD D., BARKOV N.I., BARNOLA J.-M., BASILE I., BENDER M., CHAPPELLAZ J., DAVIS M., DELAYGUE G., DELMOTTE M., KOTLYAKOV V.M., LEGRAND M., LIPENKOV V.Y., LORIUS C., PEPIN L., RITZ C., SALTZMAN E., STIEVENARD M. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399 (6735) pp. 429–436.
- PHILLIPS R.E., PHILLIPS S.H. (1984): *No-tillage agriculture, principles and practices*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- POPP M., NALLEY L., FORTIN C., SMITH A., BRYE K. (2011): Estimating Net Carbon Emissions and Agricultural Response to Potential Carbon Offset Policies. *Agronomy Journal*, 103 (4) pp. 1132–1143.
- POST W.M., PENG T., EMANUEL W.R., KING A.W., DALE V.H., DEANGELIS D.L. (1990): The global carbon cycle. *American Scientist*, Volume 78 (July-August) pp. 310–326.
- PUMPANEN J., KOLARI P., ILVESNIEMI H., MINKKINEN K., VESALA T., NIINISTÖ S., LOHILA A., LARMOLA T., MORERO M., PIHLATIE M., JANSSENS I., YUSTE J.C., GRÜNZWEIG J.M., RETH S., SUBKE J.-A., SAVAGE K., KUTSCH W., ØSTRENG G., ZIEGLER W., ANTHONI P., LINDROTH A., HARI P. (2004): Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123 (3-4) pp. 159–176.
- RÁDICS J.P., JÓRI J.I. (2011): Sampling method development for measuring tillage induced CO₂ flux. *Hungarian Agricultural Engineering*, 23 pp. 109–112.
- RÁDICS J.P., JÓRI J.I. (2012): State of the art in the hungarian field research: the effect of tillage on CO₂ emission. *Hungarian Agricultural Engineering*, 24 pp. 43–48.
- RAICH J.W., POTTER C.S. (1995): Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9 (1) pp. 23–36.
- RAICH J.W., SCHLESINGER W.H. (1992): The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44 (2) pp. 81–99.
- RAMANATHAN V., FENG Y. (2009): Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43 (1) pp. 37–50.
- RANJAN M., HERZOG H.J. (2011): Feasibility of air capture. *Energy Procedia*, 4 pp. 2869–2876.
- RANNIK Ü., KOLARI P., VESALA T., HARI P. (2006): Uncertainties in measurement and modelling of net ecosystem exchange of a forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138 (1-4) pp. 244–257.
- RASTOGI M., SINGH S., PATHAK H. (2002): Emission of carbon dioxide from soil. *Currenzt Science*, 82 (5) pp. 510–517.
- RAYMENT M.B., JARVIS P.G. (1997): An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24) pp. 28779–28784.
- REICH P.B. (2010): The Carbon Dioxide Exchange. *Science*, 329 (5993) pp. 774–775.
- REICHSTEIN M., BEDNORZ F., BROLL G., KÄTTERER T. (2000): Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (7) pp. 947–958.
- REICOSKY D. (2002): Long-Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage-Induced CO₂ Loss. In: KIMBLE, J.M., LAL, R., FOLLETT, R.F. (Szerk.): *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: Lewis Publishers, pp. 87–97.
- REICOSKY D.C. (1990): Canopy gas exchange in the field: Closed chambers. *Remote Sensing Reviews*, 5 (1) pp. 163–177.
- REICOSKY D.C. (1995): Soil Variability and Carbon Dioxide Loss After Moldboard Plowing. In: ROBERT, P.C., RUST, R.H., LARSON, W.E. (Szerk.): *Site Specific Management for Agricultural Systems, Proceedings Second International Conference*, Minneapolis, MN, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, pp. 847–865.

- REICOSKY D.C. (1998a): Tillage and short-term CO₂ emissions from soils in the laboratory. Kézirat. (Hozzáférhető a BME Gép- és Terméktervezés Tanszéken).
- REICOSKY D.C. (1998b): Strip tillage methods: Impact on soil and air quality. In: *Proceedings Australian Society of Soil Science Inc. National Soils Conference*, Brisbane, Australia, pp. 56–60.
- REICOSKY D.C., ARCHER D.W. (2007): Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*, 94 (1) pp. 109–121.
- REICOSKY D.C., DUGAS W.A., TORBERT H.A. (1997): Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 41 (1-2) pp. 105–118.
- REICOSKY D.C., LINDSTROM M.J. (1993): Fall tillage method: Effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal*, 85 (6) pp. 1237–1243.
- REY G., JOUGLA E., FOUILLET A., PAVILLON G., BESSEMOULIN P., FRAYSSINET P., CLAVEL J., HÉMON D. (2007): The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80 (7) pp. 615–626.
- RIGBY M., PRINN R.G., O'DOHERTY S., MILLER B.R., IVY D., MÜHLE J., HARTH C.M., SALAMEH P.K., ARNOLD T., WEISS R.F., KRUMMEL P.B., STEELE L.P., FRASER P.J., YOUNG D., SIMMONDS P.G. (2014): Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 41 (7) pp. 2623–2630.
- ROCHETTE P., ANGERS D.A. (1999): Soil Surface Carbon Dioxide Fluxes Induced by Spring, Summer, and Fall Moldboard Plowing in a Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, 63 (3) pp. 621–628.
- ROCHETTE P., DESJARDINS R.L., PATTEY E. (1991): Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Canadian Journal of Soil Science*, 71 (2) pp. 189–196.
- ROCHETTE P., ELLERT B., GREGORICH E.G., DESJARDINS R.L., PATTEY E., LESSARD R., JOHNSON B.G. (1997): Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques. *Canadian Journal of Soil Science*, 77 (2) pp. 195–203.
- SCHLENTNER R.E., CLEVE K.V. (1985): Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 15 (1) pp. 97–106.
- SCHLESER G.H. (1982): The Response of CO₂ Evolution from Soils to Global Temperature Changes. *Zeitschrift Naturforschung Teil A*, 37 pp. 287–291.
- SCHLESINGER W.H. (1977): Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8 (1) pp. 51–81.
- SCHLESINGER W.H. (1999): Carbon and agriculture: carbon sequestration in soils. *Science*, 284 (5423) pp. 2095–2106.
- SCHLESINGER W.H. (2000): Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82 (1-3) pp. 121–127.
- SCHWARTZKOPF S.H. (1978): An open chamber technique for the measurement of carbon dioxide evolution from soils. *Ecology*, 59 (5) pp. 1062–1068.
- SCOTT A., CRICHTON I., BALL B.C. (1999): Long-term monitoring of soil gas fluxes with closed chambers using automated and manual systems. *Journal of Environment Quality*, 28 (5) pp. 1637–1643.
- SERRANO R.E. (2008): Humus formation and C-fixation depending on soil management. In: *II International conference on soil and compost eco-biology, Puerto de la Cruz, Tenerife, November 26th-29th, 2008*, Madrid: SoilACE, pp. 129–137.
- SEVELLA B. (2011): *Biomérnöki műveletek és folyamatok*. Budapest: BME Vegyész-mérnöki és Biomérnöki Kar Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék. 420. p.
- SHINE K.P., FUGLESTVEDT J.S., HAILEMARIAM K., STUBER N. (2005): Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change*, 68 (3) pp. 281–302.

- SILVA-OLAYA A.M., CERRI C.E.P., LA SCALA JR N., DIAS C.T.S., CERRI C.C. (2013): Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, 8 (1) p. 8.
- SINGH J.S., GUPTA S.R. (1977): Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*, 43 (4) pp. 449–528.
- SITKEI G. (1997): *Gyakorlati áramlástan*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. 504. p.
- SMITH P., POWLSON D., GLENDINING M., SMITH J. (1997): Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology*, 3 (1) pp. 67–79.
- SMITH P., POWLSON D.S., GLENDINING M.J., SMITH J.U. (1997): Opportunities and Limitations for C sequestration in European Agricultural Soils through Changes in Management. In: *Management of Carbon sequestration in soil*, Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 143–152.
- SMITH P., POWLSON D.S., GLENDINING M.J., SMITH J.U. (1998): Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology*, 4 (6) pp. 679–685.
- SMITH P., POWLSON D.S., SMITH J.U., FALLOON P., COLEMAN K. (2000): Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*, 6 (5) pp. 525–539.
- SOEGAARD H. (2003): Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114 (3-4) pp. 153–173.
- SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERY K.B., TIGNOR M., MILLER H.L. (Szerk.) (2007): *IPCC Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 499–587. pp.
- STEFANOVITS P., FILEP G., FÜLEKY G. (Szerk.) (1999): *Talajtan*. Budapest: Mezőgazda Kiadó. 472. p.
- STOCKER T.F., DAHE Q., PLATTNER G. (Szerk.) (2013a): Technical Summary. In: *IPCC Climate change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 33–118.
- STOCKER T.F., DAHE Q., PLATTNER G. (Szerk.) (2013b): Summary for Policy Makers. In: *IPCC Climate change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 3–32.
- STOCKER T.F., QIN D., PLATTNER G. (Szerk.) (2013): *IPCC Climate change 2013: The Physical Science Basis*. New York: Cambridge University Press.
- SWINBANK W.C. (1951): The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 8 (3) pp. 135–145.
- TAKLE E.S., MASSMAN W.J., BRANDLE J.R., SCHMIDT R.A., ZHOU X., LITVINA I.V., GARCIA R., DOYLE G., RICE C.W. (2004): Influence of high-frequency ambient pressure pumping on carbon dioxide efflux from soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (3-4) pp. 193–206.
- TANG J., MISSON L., GERSHENSON A., CHENG W., GOLDSTEIN A.H. (2005): Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (3-4) pp. 212–227.
- TEIXEIRA L.G., LOPES A., LA SCALA JR N. (2010): Temporal variability of soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. *Engenharia Agrícola*, 30 (2) pp. 224–231.
- THIERRON V., LAUDELOUT H. (1996): Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 26 (7) pp. 1142–1148.
- TORRES L.G. (Szerk.) (1999): *Conservation Agriculture in Europe: Environmental, Economic and EU Policy Perspectives*. European Conservation Agriculture Federation (ECAAF). 23. p.
- TÓTH E. (2011): Talaj szén-dioxid emissziójának mérése eltérő talajhasználati rendszerekben,

- Doktori (PhD) értekezés, Gödöllő: BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM, p. 135.
- TÓTH E., BARCZA Z., BIRKÁS M., GELYBÓ G., ZSEMBELI J., BOTTLIK L., DAVIS K.J., HASZPRA L., KERN A., KLJUN N., KOÓS S., KOVÁCS G., STINGLI A., FARKAS C. (2011): Arable lands. In: HASZPRA, L. (Szerk.): *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* [online], Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 157–197. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-9950-1>.
- TÓTH E., FARKAS C. (2010): A rendszeres talajbolygatás hatása a talaj szén-dioxidkibocsátására barackültetvényben. „*Klíma-21*” füzetek *Klíma-változás – Hatások – Válaszok*, 62 pp. 29–38.
- TUBIELLO F.N., SALVATORE M., ROSSI S., FERRARA A., FITTON N., SMITH P. (2013): The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 8 (1) p. 10.
- UNITED NATIONS (1998): *Kyoto Protocol to the United Nations Framework convention on climate* [online]. United Nations. URL: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php.
- UNITED NATIONS (2012): *Doha amendment to the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change* [online]. United Nations Framework Convention. URL: http://unfccc.int/kyoto_protocol/doha_amendment/items/7362.php.
- VAN'T HOFF J.H. (1899): *Lectures on theoretical and physical chemistry*. London.: Edward Arnold.
- VARGAS R., CARBONE M.S., REICHSTEIN M., BALDOCCHI D.D. (2011): Frontiers and challenges in soil respiration research: from measurements to model-data integration. *Biogeochemistry*, 102 (1-3) pp. 1–13.
- VAN VEEN J.A., LILJEROTH E., LEKKERKERK L.J.A., VAN DE GEIJN S.C. (1991): Carbon Fluxes in Plant-Soil Systems at Elevated Atmospheric CO₂ Levels. *Ecological Applications*, 1 (2) pp. 175–181.
- VERMA S.B., DOBERMANN A., CASSMAN K.G., WALTERS D.T., KNOPS J.M., ARKEBAUER T.J., SUYKER A.E., BURBA G.G., AMOS B., YANG H., GINTING D., HUBBARD K.G., GITELSON A.A., WALTER-SHEA E.A. (2005): Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131 (1-2) pp. 77–96.
- VINTEN A.J.A., BALL B.C., O'SULLIVAN M.F., HENSHALL J.K. (2002): The effects of cultivation method, fertilizer input and previous sward type on organic C and N storage and gaseous losses under spring and winter barley following long-term leys. *The Journal of Agricultural Science*, 139 (03) pp. 231–243.
- VÖLGYESI L. (1982): A föld hőjelenségei. In: *Geofizika* [online], Budapest: Tankönyvkiadó, p. 346. URL: <http://sci.fgt.bme.hu/volgyesi/geofiz/geofiz.htm>.
- WANG W.C., YUNG Y.L., LACIS A.A., MO T. a, HANSEN J.E. (1976): Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases. *Science*, 194 (4266) pp. 685–690.
- WEBSTER P.J. (2005): Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309 (5742) pp. 1844–1846.
- WELLES J., DEMETRIADES-SHAH T., MCDERMITT D.. (2001): Considerations for measuring ground CO₂ effluxes with chambers. *Chemical Geology*, 177 (1-2) pp. 3–13.
- WEST T.O., POST W.M. (2002): Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (6) pp. 1930–1946.
- WIDÉN B., LINDROTH A. (2003): A calibration system for soil carbon dioxide-efflux measurement chambers. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (1) pp. 327–334.
- WILDUNG R.E., GARLAND T.R., BUSCHBOM R.L. (1975): The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 7 (6) pp. 373–378.
- WINKLER J.P., CHERRY R.S., SCHLESINGER W.H. (1996): The Q10 relationship of microbial respiration in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (8) pp. 1067–1072.
- XU L., FURTAW M.D., MADSEN R.A., GARCIA R.L., ANDERSON D.J., MCDERMITT D.K. (2006): On maintaining pressure equilibrium between a soil CO₂ flux chamber and the ambient air. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 111 (D8) p. 20.

ZSEMBELI J., TUBA G., JUHÁSZ C., NAGY I. (2005): CO₂-measurements in a soil tillage experiment. *Cereal Research Communications*, 33 (1) pp. 137–140.

M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk**Lektorált cikk idegen nyelven:**

- Jóri, J.I., **Rádics, J.P.**, Szabó, I., Pazsiczki, I., Gyuricza Cs. (2004): Field research for investigation of tillage-induced CO₂ loss. Hungarian Agricultural Engineering, Vol. 17. pp. 12–14. ISSN 0864-7410
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I. (2010): Development of 3E tillage system and machinery to challenge climate change impacts. Periodica Politechnica, Mechanical Engineering, 54 (1) pp. 49–56. ISSN 0324-6051
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I. (2011): Sampling method development for measuring tillage induced CO₂ flux. Hungarian Agricultural Engineering, Vol. 23. pp. 109–112. ISSN 0864-7410
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I. (2012): State of the art in the hungarian field research: the effect of tillage on CO₂ emission. Hungarian Agricultural Engineering, Vol. 24. pp. 43–48. ISSN 0864-7410
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I., Fenyvesi, L. (2014): Short-term study of tillage induced soil CO₂ loss. International Journal of Innovative Research In Advanced Engineering, Vol. 1. (12) pp. 48–52. ISSN 2349-2163
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I., Fenyvesi, L. (2014): Soil CO₂ emission induced by tillage machines. International Journal of Applied Science and Technology, Vol. 4. (7) pp. 37-44. ISSN 2221-0997
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I., Fenyvesi, L. (2014): Field study of soil CO₂ emission to investigate environment-friendly effect of different tillage practices. The Experiment – International Journal of Science and Technology, Vol. 28. (3) pp. 1915-1922. ISSN 2319-2119
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I., Fenyvesi, L. (2015): Intelligent tillage machines development to mitigate climate change effects. Journal of International Scientific Publications Agriculture & Food, Vol. 3. (1) pp. 1-11. ISSN 1314-8591

Lektorált cikk magyar nyelven:

- Rádics J.P.**, Jóri J.I. (2008): Intelligens talajművelőgépek fejlesztésének követelményrendszere. GÉP, LIX. évf. (4) 38–42. o. ISSN 0016-8572
- Rádics J.P.**, Jóri J.I., Fenyvesi L. (2015): Talaj CO₂ kibocsátási modell validálása nemlineáris regresszió analízissel. GÉP, LXVI. évf. (1) 5-9. o. ISSN 0016-8572
- Rádics J.P.**, Jóri J.I., Fenyvesi L. (2015): Talajművelő gépek hatása a talaj szén-dioxid kibocsátására. Mezőgazdasági Technika, LVI. évf. (2.) 2-5. o. ISSN 0026 1890

Nemzetközi konferencia kiadvány:

- Jóri, J.I., **Rádics, J.P.**, Szabó, I., Pazsiczki, I., Gyuricza, Cs. (2004): Tillage induced CO₂ loss. Proceedings of EurAgEng Conference, International Conference on Agricultural Engineering, 2004. September 12-16., Leuven, Belgium, pp. 48–49. CD p. 8. ISBN 90-76019-258
- Rádics, J.P.**, Jóri, J.I. (2006): Long term effect of tillage on CO₂ emission. Book of Abstracts, XVI. CIGR World Congress: Agricultural Engineering for a Better World, 2006. szeptember 3-7., Bonn, Németország: VDI-Verlag GmbH, pp. 150–152. CD p. 8. ISBN 3-18-091958-2

Rádics, J.P., Jóri, J.I. (2008): Requirements of intelligent tillage machine design. Proceedings Book, Sixth Conference on Mechanical Engineering, 2008. május 29-30., Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Paper K02. pp. 1–9. ISBN 978-963-420-947-8

Jóri, J.I., **Rádics, J.P.**, Farkas, P., Oláh, M. (2009): The 3E (Environment-oriented) Tillage System. Proceedings Book, 18th Triennial Conference of ISTRO, 2009. június 15-19., Izmir, Törökország, Paper T1, p. 13. ISBN 978-975F-483-823-7

Jóri, J.I., **Rádics, J.P.**, Farkas, Zs., Farkas, P., Oláh, M. (2010): Climate change impacts on tillage system and machinery. Book of Abstracts, AgEng 2010 International Conference on Agricultural Engineering, 2010. szeptember 6-8., Clermont-Ferrand, Franciaország, pp. 258. CD p. 10. ISBN 2-85362-684-9

Magyar nyelvű konferencia kiadvány:

Jóri J.I., **Rádics J.P.**, Szabó I., Pazsiczki I., Gyuricza Cs. (2004): Talajművelési eljárások hatása a talaj CO₂ kibocsátására, XXVIII. MTA AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, 2004., Gödöllő: Szent István Egyetem – FVM Műszaki Intézet, 214–219 o.

Jóri J.I., **Rádics J.P.**, Szabó I. (2005): A talaj CO₂ kibocsátása a különböző talajművelési eljárások és az idő függvényében, XXIX. MTA AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, 2005., Gödöllő: Szent István Egyetem – FVM Műszaki Intézet, 23–26 o.

Magyar nyelvű abstract:

Rádics J.P., Jóri J.I. (2010): A 3E talajművelési rendszer géprendszerének kifejlesztése (Implement development for the 3E tillage system), XXXIV. MTA AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, 2010. február 2., Gödöllő: Szent István Egyetem – FVM Műszaki Intézet, 8. o. ISBN 978-963-269-165-7.

Egyéb:

Rádics J.P., Jóri J.I. (2007): A precíziós talajművelés agrotechnikai műszaki alapjai. Agrofórum, IXX. (6/M5) 5–16 o. ISSN 1215-4911.

M3: Mérési adatok**1. Méréssorozat mérési adatai (2003.07.15.)**

TESTO műszerrel mért értékek:

CO ₂ emisszió Komondor mulcskultivátor [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra	3. Mérőkamra	4. Mérőkamra
0	356	356	356	356
15	387	571	789	612
35	1185	951	1436	1069
105	1658	1438	1983	1832

CO ₂ emisszió Kverneland CLE középmezlyazító (a gerinclemezek vonalában mérve) [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra	3. Mérőkamra	4. Mérőkamra
0	356	356	356	356
15	824	468	429	752
35	1201	1686	964	1586
95	2561	2263	1429	3086

CO ₂ emisszió IH770 tárcsás borona [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra	3. Mérőkamra	4. Mérőkamra
0	356	356	356	356
15	425	821	1296	518
35	869	1387	2135	1794
85	1563	2117	2878	3103

INNOVA műszerrel mért értékek átlaga:

Az INNOVA műszer esetében művelésenként csak a mérési eredmények átlaga került rögzítése.

Idő [perc]	CO ₂ emisszió [ppm]		
	Komondor mulcskultivátor	Kverneland CLE középmélylazító (a gerinclemezek vonalában mérve)	IH770 tárcsás borona
0	356,0	356,0	356,0
7,5	474,0	486,4	559,4
20	607,3	562,7	569,3
60	-	-	639,0
70	-	601,5	-
80	630,8	-	-

2. Méréssorozat 1. mérésiének adatai 2003.09.23.

CO ₂ emisszió Referencia mérés [ppm]		
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra
0	349	349
30	677	603
60	712	670
120	691	575
180	731	749

CO ₂ emisszió Kverneland CLE középmélylazító [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra (gerinclemez vonalában)	2. Mérőkamra (gerinclemez vonalában)	3. Mérőkamra (gerinclemezek között)	4. Mérőkamra (gerinclemezek között)
0	349	349	349	349
30	1706	1134	614	782
90	2986	1728	764	876
150	3496	2586	854	912

CO ₂ emisszió IH770 tárcsás borona [ppm]			
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra	3. Mérőkamra
0	349	349	349
30	494	780	629
90	1293	1202	1472
150	1413	1610	1734

CO ₂ emisszió Kvemeland BB115 ágyeke [ppm]			
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra	2. Mérőkamra	3. Mérőkamra
0	349	349	349
30	2289	1783	2725
90	2118	1750	2625
185	2277	2180	3321

2. Méréssorozat 2. mérésének mérési adatai 2003.10.16.

CO ₂ emisszió Referencia mérés [ppm]			
Mérés ideje [perc]	Referencia 1.	Mérés ideje [perc]	Referencia 2.
0	534	0	490
20	854	30	894
55	1022	90	1105

CO ₂ emisszió Komondor mulcskultivátor [ppm]					
Mérés ideje [perc]	Mulcs-kultivátor 1.	Mulcs-kultivátor 2.	Mérés ideje [perc]	Mulcs-kultivátor 3.	Mulcs-kultivátor 4.
0	534	534	0	490	490
20	912	866	30	1112	924
55	770	714	90	1268	905

3. Méréssorozat mérési adatai 2007.06.06.

CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	390	390	390	390
15	570	580	580	530
30	730	803	690	650
45	861	980	877	832
65	1186	1309	995	970
90	1412	1560	1085	1042
120	1515	1583	1308	1279

CO2 emisszió Symba tárcsás borona [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	390	390	390	390
15	780	890	880	910
30	1280	1181	950	1040
45	1704	1537	980	1150
65	2082	1812	1150	1315
90	2396	2057	1257	1478
120	2545	2185	1341	1530

Környezeti adatok			
Mérés ideje [perc]	Levegő CO2 tartalom [ppm]	Talajhőmérséklet [oC]	Talajhőmérséklet [oC]
0	390	28	29
15	398	28	28,5
30	398	27,5	28,5
45	400	27,5	28
65	430	26,5	28
90	429	26,5	28
120	456	26	27,5

4. Méréssorozat mérési adatai 2007.06.07.

CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	510	510	510	510
15	1299	1361	1123	1483
45	1866	1631	1211	1454
75	1903	1810	1550	1553
105	2088	1895	2119	1985
120	2777	2250	1870	2075

CO2 emisszió Szántóföldi kultivátor [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	510	510	510	510
15	1835	1584	1472	1982
30	3000	2115	1519	1763
55	3576	2512	1395	1515
85	4190	2908	1990	2066
115	4377	3014	1918	1939
155	4675	3085	2183	2241

CO2 emisszió Szántóföldi kultivátor + Forgóborona [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	510	510	510	510
15	1911	1680	2116	1966
45	4627	4138	3471	3754
80	5547	5220	3245	3934
110	5795	5595	2772	3360
150	6170	6072	3260	3760

5.

6. Méréssorozat mérési adatai 2007.07.14.

CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]					
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra Ü	Mérés ideje [perc]	3. Mérőkamra NÜ	4. Mérőkamra Ü
0	450		0	430	430
15	1005	1178	20	944	825
35	1202	1022	45	1084	987
50	1429	1147	65	1101	992
75	1605	1312	85	1136	909
105	1578	1233			
135	1556	1488			

CO2 emisszió Középmélylazító [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ Gerinclemez vonalában	2. Mérőkamra NÜ Gerinclemezek között	3. Mérőkamra Ü Gerinclemez vonalában	4. Mérőkamra Ü Gerinclemezek között
0	450	450		
15	1916	1860	2493	1410
35	2768	2072	1810	1320
50	2983	2170	1961	1630
80	3308	2218	2707	1680
110	3096	2333	2592	1197
140	3210	2525	3005	1962

CO2 emisszió Szántóföldi kultivátor [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	430	430	430	430
25	1772	1983	1987	1629
45	1882	1959	1835	1433
65	2202	2353	1915	1691
85	2176	2155	1487	1449
105	2232	2223	1748	1730

CO2 emisszió Szántóföldi kultivátor + Forgóborona [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ü	4. Mérőkamra Ü
0	430	430	430	430
13	1866	2147	2453	2283
35	2515	2564	1773	1773
55	2742	2796	1391	1353
75	2707	2764	1678	1624
95		2833	1502	1352

7. Méréssorozat mérési adatai 2007.07.15.

CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ű	4. Mérőkamra Ű
0	455	455	455	455
15	709	644	718	855
35	815	756	943	760
55	672	662	1074	875
75	682	708	1131	925
95	763	743	906	950
115	957	818	894	977

CO2 emisszió Symba tárcsás borona [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra NÜ	2. Mérőkamra NÜ	3. Mérőkamra Ű	4. Mérőkamra Ű
0	455	455	455	455
15	1255	1634	923	1630
35	1318	1915	1072	1565
55	1526	2034	1048	1457
75	1763	2093	1245	1630
95	1798	1897	1072	1370
115	1992	2077	1333	1754

8. Méréssorozat mérési adatai 2011.08.09.

CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]		
Mérés ideje [perc]	1. CO2 kamra Kumulált	2. CO2 kamra Ürítéses
0	450	450
20	1564	1950
40	2223	1425
60	2730	1190
80	2991	1325
100	2625	1350
120	2420	1320
140	2200	1340
160	2550	1120
180	2220	1080
200	1850	1015
220	2154	1230

CO2 emisszió Középmélylazító [ppm]							
Mérés ideje [perc]	1. C03 kamra Kumulált	2. C02 kamra Kumulált	3. C02 kamra Ürítéses	4. C02 kamra Ürítéses, légk.	5. C03 kamra Ürítéses	6. C02 kamra Ürítéses	7. C03 kamra Ürítéses
0	450	450	450	450	450	450	450
20	1875	1938	3431	5873	2550	4093	1977
40	2830	2603	1235	1385	1123	8885	1503
60	3540	3963	1281	1311	983	5230	1104
80	4197	4473	1458	1493	1130	6230	1630
100	4880	6180	1995	1809	1335	1920	1660
120	5447	6330	2045	1560	1670	2170	2030
140	6120	5820	3301	2290	1350	2042	1820
160	6670	7350	1974	1420	1460	1220	950
180	7307	8340	1572	1650	1180	1385	920
200	7570	7480	1730	1610	1320	1250	1370
220	8054	7553	1550	1357	1170	1365	987

9. Méréssorozat mérési adatai 2011.09.17.

CO2 emisszió Szántóföldi kultivátor [ppm]						
Mérés ideje [perc]	1. C03 kamra Ürítéses	2. C03 kamra Ürítéses	3. C03 kamra Kumulált	4. C02 kamra Ürítéses, légkev.	5. C02 kamra Ürítéses, légkev.	6. C02 kamra Kumulált
0	451	451	451	451	451	451
15	680	780	926	1260	1268	1056
30	720	864	1210	1320	1210	1235
45	655	1025	1465	736	897	1383
60	975	1110	1630	795	1453	1430
75	815	1286	1858	916	1365	1493
90	793	1420	1972	1120	1225	1525
105	693	1436	2124	1824	956	1545
120	712	1330	2240	1740	910	1576
135	772	1024	2327	1178	863	1658
150	693	965	2434	1059	878	1717
165	806	887	2543	825	989	1753
180	983	767	2625	914	1226	1784
195	1180	926	2688	888	1356	1810
210	1210	970	2761	880	1398	1812
225	1161	1014	2843	862	1323	1820

10. Méréssorozat mérési adatai 2004.07.15.

CO ₂ emisszió Rába IH770 tárcsás borona [ppm]								
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra (kumulált)	2. Mérőkamra (kumulált)	3. Mérőkamra (kumulált)	4. Mérőkamra (kumulált)	5. Mérőkamra (ürítéses)	6. Mérőkamra (ürítéses)	7. Mérőkamra (ürítéses)	8. Mérőkamra (ürítéses)
0	441	441	441	441	441	441	441	441
40	1228	1541	1672	1187	2176	1512	2568	2390
80	1521	2092	2246	1340	1991	1653	1815	1920
120	1748	2420	2700	1427	1864	1690	1987	1722
160	1930	2745	3019	1471	2086	1801	1779	1251
200	2146	3020	3273	1304	2188	2140	2002	1380
240	2361	2748	3488	1362	2248	1973	2248	1258
280	2234	3176	3620	1467	2328	2241	2244	1763
340	2688	3304	4246	1677	2648	2344	2643	1832
400	3158	3623	4336	1304	2133	2530	2668	898
460	2650	3390	4168	1182	1953	2340	2499	1690
520	2923	3318	3991	1194	1917	1979	2312	2028
580	2809	3072	3824	1240	1992	2082	2108	1607
700	2515	2717	3360	1502	2199	2139	2088	1936
820	2297	2360	3029	1535	2179	2156	1936	2058
940	2190	2360	2941	1164	1701	1810	1935	1460
1180	2064	2128	2677	1180	1557	1365	1435	1748
1420	2351	2227	2918	1101	1294	1151	1152	1846
1540	2812	2676	3159	1176	1469	1510	1779	1453
1660	2915	2646	3507	798	2015	2147	1680	1895
1780	3068	2934	3860	810	2189	1872	2367	2061

CO ₂ emisszió Kverneland BB115 ágyeke [ppm]								
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra (kumulált)	2. Mérőkamra (kumulált)	3. Mérőkamra (kumulált)	4. Mérőkamra (kumulált)	5. Mérőkamra (ürítéses)	6. Mérőkamra (ürítéses)	7. Mérőkamra (ürítéses)	8. Mérőkamra (ürítéses)
0	441	441	441	441	441	441	441	441
40	2725	2290	1422	2642	1924	2676	1304	1324
80	2807	2225	1854	2197	1825	1890	967	1494
120	2535	2330	1930	2920	1740	1726	1510	1394
160	2500	2215	1527	3154	1938	2020	1208	1402
200	2843	2480	1597	2351	1822	1957	1540	1247
240	3036	2443	1618	2258	1775	1901	1412	1829
280	3146	2517	1623	2470	1959	1754	1533	1125
340	3388	2488	1460	2837	2198	1860	1820	1645
400	3242	3059	1354	2279	2605	1876	1690	1002
460	3587	2999	1430	2301	2706	2307	1280	1305

520	3422	2875	1857	2081	2315	1893	1594	1073
580	2923	3112	1787	2520	1620	1466	1900	1588
700	2561	2955	1790	3255	2297	1686	2224	1516
820	2157	2173	1736	3286	1688	1549	2239	1703
940	1929	2029	1230	2005	2041	1520	1829	1564
1180	1594	2283	745	2297	2283	1410	1663	1298
1420	1542	2248	483	2421	1948	1693	1441	1313
1540	1571	2155	518	2151	2227	2284	1161	726
1660	2068	1812	480	2256	1815	2426	1686	459
1780	1850	1929	1470	1690	1800	2413	1115	441

CO ₂ emisszió Referencia mérés [ppm]				
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra (kumulált)	2. Mérőkamra (kumulált)	3. Mérőkamra (ürítéses)	4. Mérőkamra (ürítéses)
0	441	441	441	441
40	885	906	818	890
80	1092	844	752	1185
120	1073	813	637	1290
160	1076	829	1125	1388
200	1084	716	1202	1351
240	1028	734	1229	1224
280	1061	848	1348	1536
340	1130	913	1755	1868
400	942	865	1787	1766
460	847	1011	1837	2014
520	944	1105	1675	1652
580	1014	1130	1696	1664
700	1137	1073	1809	1808
820	1160	1159	1946	1750
940	903	1082	1896	1670
1180	877	724	2028	1924
1420	716	437	1893	748
1540	728	457	1980	946
1660	562	540	1576	2183
1780	491	470	1887	1850

Környezeti adatok			
Mérés ideje [perc]	Levegő CO ₂ tartalom [ppm]	Talajhőmérséklet	Levegő hőmérséklet
0	441	28	23,5
40	451	28	24,5
80	460	28,5	25,5
120	510	29	27
160	423	29,5	28
200	439	30	29,5
240	453	30,5	30,5
280	490	31	32
340	530	32	33
400	452	32,5	34
460	462	33	34,5
520	433	33,5	34
580	449	34	33,5
700	446	32	30
820	435	30	26,5
940	376	29	24
1180	365	26	20,5
1420	339	28	25
1540	441	29,5	30
1660	410	31	32,5
1780	445	32,5	34

11. Méréssorozat mérési adatai 2014.08.18.

Mérés ideje [perc]	CO2 emisszió Referencia mérés [ppm]		
	1. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	2. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	3. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses
0	673	652	616
20	617	687	630
45	661	640	776
90	612	652	649
130	711	672	739
170	739	773	643
210	671	738	692
240	697	668	629
300	716	652	715
360	683	625	608
420	683	646	633
480	606	634	657
540	639	617	559
900	516	568	526
1260	610	642	657
1380	663	583	677
1500	693	743	675
1620	742	687	674

Mérés ideje [perc]	CO2 emisszió Eke [ppm]		
	1. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	2. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	3. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses
0			
20	1004	992	839
45	996	877	891
90	739	683	917
130	748	706	1167
170	657	989	935
210	673	998	1097
240	822	943	831
300	809	868	968
360	827	997	917
420	981	961	837
480	658	735	675
540	662	742	619
900	527	543	582
1260	736	643	698
1380	872	692	684
1500	739	743	725
1620	804	646	874

CO2 emisszió Kultivátor [ppm]			
Mérés ideje [perc]	1. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	2. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses	3. Mérőkamra CO3 kamra Ürítéses
0	458	458	458
20	614	660	782
45	678	718	629
90	675	797	683
130	714	819	646
170	732	772	853
210	715	811	669
240	759	640	732
300	642	728	887
360	702	728	642
420	604	627	609
480	657	594	563
540	548	614	627
900	547	538	515
1260	582	628	607
1380	539	576	650
1500	632	674	557
1620	694	510	679

Környezeti adatok			
Mérés ideje [perc]	Levegő CO2 tartalom [ppm]	Levegő hőmérséklet	Talajhőmérséklet
0	458	23,6	19,8
20	461	24,7	19,9
45	465	25,3	20,0
90	471	25,9	20,5
130	476	26,5	20,8
170	478	26,4	21,8
210	482	27,1	23,1
240	485	27,0	22,6
300	490	26,7	24,0
360	494	26,4	23,7
420	475	24,5	23,2
480	477	22,5	22,8
540	479	19,8	22,6
900	492	14,3	20,6
1260	506	16,0	18,3
1380	494	22,1	19,6
1500	482	27,4	21,6
1620	485	28,0	23,2

M4: Az alkalmazott Matlab fájlok

Légkeveréses és légkeverés nélküli mérőkamrák mért adatainak összehasonlítása:

```

clear
clc
Data=xlsread('legkeveres.xlsx','2'); % behívja az excel első munkalapját
x1 = Data(:,1); % Mérés időpontjának értékei
x = x1/60; % Abszcissa skálájának átalakítása óra léptékre
%% LINEÁRIS REGRESSZIÓ A REFERENCIA ÉRTÉKEKRE
x0 = Data(2:end,1); % Mérés időpontjának értékei létező referenciértékekhez
R0 = Data(2:end,4); % Referencia mérés értékei
s = polyfit(x0,R0,1); % lineáris regresszió konstansainak számítása
ylr = s(:,1)*x+s(:,2); % lineáris regresszió függvényértékeinek kiszámítása
Data(1,2:3) = s(:,2); % regressziós egyenes zérusértékének hozzáadása a mért adatsor nulla
időpontjához
%%
y4 = Data(:,2); % Légkeverés nélküli mérőkamra adatai
y5 = Data(:,3); % Légkeveréses mérőkamra adatai
Xstr=min(x);
Xend=max(x);
T=linspace(Xstr,Xend,10000);
y4i = interp1(x,y4,T,'pchip'); % Légkeverés nélküli mérőkamra mért adatainak interpolálása
y5i = interp1(x,y5,T,'pchip'); % Légkeveréses mérőkamra mért adatainak interpolálása
Area4 = trapz (T,y4i); % Légkeverés nélküli mérőkamra interpolált adatainak numerikus integrálása
Area5 = trapz (T,y5i); % Légkeveréses mérőkamra interpolált adatainak numerikus integrálása
elteres = (Area5/Area4)*100; % A számított adatok %-os eltérése
figure('name','Legkeveres_adatok','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial','position',[100,
100, 1000, 500])
xlabel('Művelés óta eltelt idő [óra]','fontweight','bold','fontsize',12)
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/óra]','fontweight','bold','fontsize',12)
hold on
plot(T,y4i,'-',...
'Linewidth',2.25,...
'Color',[0.309,0.505,0.741])
plot(T,y5i,'-',...
'Linewidth',2.25,...
'Color',[1,0.6,0])
plot(x,y4,'d',...
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor',[0.309,0.505,0.741])
plot(x,y5,'s',...
'MarkerEdgeColor','k',...
'MarkerFaceColor',[1,0.6,0])
legend('Légkeverés nélküli mérőkamra','Légkeveréses mérőkamra')
title('Legkeveréses CO_2 kamra adatok')
grid on
set(gca,'GridLineStyle','-')
set(findall(gcf,'type','text'),'fontname','Calibri')
hold off

```

A C02 és C03 mérőkamrák mérési pontosságának összehasonlítása:

```

clear
clc
Data=xlsread('C02_C03_Arva.xlsx','1'); % behívja az excel első munkalapját
C030 = Data(:,2:3); % C03 kamra mérési adatok
C020 = Data(:,4:5); % C02 kamra mérési adatok
C03 = mean(C030,2); % C03 mérőkamrák átlaga
C02 = mean(C020,2); % C02 mérőkamrák átlaga
%% SZÓRÁSOK KISZÁMÍTÁSA
C03s = std(C030',1,1);
C02s = std(C020',1,1);
C03ss = C03s';
C02ss = C02s';
x1 = Data(:,1); % Mérés időpontjának értékei
x = x1/60; % Abszcissa skálájának átalakítása óra léptékre
% LINEÁRIS REGRESSZIÓ A REFERENCIA ÉRTÉKEKRE
x0 = Data(2:end,1); % Mérés időpontjának értékei létező referenciértékekhez
R0 = Data(2:end,6); % Referencia mérés értékei
s = polyfit(x0,R0,1); % lineáris regresszió konstansainak számítása
ylr = s(:,1)*x+s(:,2); % lineáris regresszió függvényértékeinek kiszámítása
C03(1,1) = s(:,2); % regressziós egyenes zérusértékének hozzáadása a mért adatsor nulla időpontjához
C02(1,1) = s(:,2);
Xstr=min(x);
Xend=max(x);
T=linspace(Xstr,Xend,10000);
C03i = interp1(x,C03,T,'pchip'); % Légkeverés nélküli mérőkamra adatainak interpolálása
C02i = interp1(x,C02,T,'pchip'); % Légkeveréses mérőkamra adatainak interpolálása
AreaC03 = trapz (T,C03i); % Légkeverés nélküli mérőkamra interpolált adatainak numerikus integrálása
AreaC02 = trapz (T,C02i); % Légkeveréses mérőkamra interpolált adatainak numerikus integrálása
elteres = (AreaC02/AreaC03)*100; % A számított adatok %-os eltérése
figure('name','C02 C03 összehasonlítás','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial','position',[100,100,1000,500])
xlabel('Művelés óta eltelt idő [óra]','fontweight','bold','fontsize',12)
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/óra]','fontweight','bold','fontsize',12)
axis([0,4,0,5.2])
hold on
plot(T,C03i,'-',...
      'Linewidth',2.25,...
      'Color',[0.309,0.505,0.741])
plot(T,C02i,'-',...
      'Linewidth',2.25,...
      'Color',[1,0.6,0])
errorbar(x,C03,C03ss,'d',...
          'Color',[0.309,0.505,0.741],...
          'Linewidth',1.25,...
          'MarkerEdgeColor','k',...
          'MarkerFaceColor',[0.309,0.505,0.741])
errorbar(x,C02,C02ss,'s',...
          'Color',[1,0.6,0],...
          'Linewidth',1.25,...
          'MarkerEdgeColor','k',...
          'MarkerFaceColor',[1,0.6,0])
legend('C03 mérőkamra','C02 mérőkamra')
title('C02 és C03 mérőkamrák összehasonlítása')
grid on
set(gca,'GridLineStyle','-')
set(findall(gcf,'type','text'),'fontname','Calibri')

```

A kibocsátási modell illesztése (endfunction.m):

```

clear% Workspace változók törlése
clc % képernyő törlése
tic % számítási időt mérő óra indítása
clearvars -global
global data_30 x1 y1 env2 c1 env3
fid=xlsread('meresek.xlsx','20040715'); % behívja az excel első munkalapját
% fid=xlsread('meresek.xlsx','20140818'); % behívja az excel első munkalapját
data_30=fid.'; % mátrix transzponálás
x1 = data_30(1,:); % x tengely adatkijelölés
ry1 = data_30(2,:); % y tengely adatkijelölés (referencia)
xmax = max(x1);
xmin = min(x1);
x = linspace(xmin,xmax,10000);
ry = interp1(x1,ry1,x,'pchip');
%% Beméleti adat finomítás vege %%
ymax_ref = max(ry1);
ymin_ref = min(ry1);

```

```

ytart_ref = (ymax_ref-ymin_ref); % y értéktartománya
kk_ref = mean(ry); % amplitúdó kezdőérték számítása
yelt = ry-ymax_ref+(ytart_ref/2); % eltérések az értéktartomány középpértékétől
zx = x(yelt .* circshift(yelt,[0 1]) <= 0); % zérushelyek keresése a periódusidő meghatározásához
per = 2*mean(diff(zx)); % periódusidő kezdőértékének számítása
ym_ref = (zx(:,1)-per)/per; % amplitúdó kezdőérték számítása
rfit = @(b,x) b(1)+b(2)*sin ( ( 2*pi/b(3)).*x)+b(4) ); % illesztett függvény
rfcn = @(b) sum(rfit(b,x) - ry).^2); % Legkisebb négyzetek függvény
rs = fminsearch(rfcn, [kk_ref; ytart_ref; per; ym_ref]); %Legkisebb négyzetek minimalizálása
xp =x; % valós modell-mért adat összefüggések meghatározásához
%% Numerikus integrálás
Area_mert_ref = trapz (x,ry);
Area_kozelites_ref = trapz (x,rfit(rs,xp));
elteres_ref = (Area_kozelites_ref/Area_mert_ref)*100; % A számított adatok %-os eltérése
%% R^2 és r^2 számítása Kendrick függvényekkel
data_ref = ry;
model_ref = rfit(rs,xp);
modelelex_ref = rfit(rs,x1);
R2_Ref = calccod(modelex_ref,ry1);
r2_ref = 100 * calccorrelation(modelex_ref,ry1)^2;
%% R^2 (determinációs együttható) kirajzolása
f1=figure('name','Műveletlen terület modelljének
illeszkedése','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial');
setfigurepos([100 100 600 220]);
clf;
subplot(1,2,1);
hold on;
h1_ref = plot(xp,data_ref,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.333,.556,.835]);
axis([0,1800,0,+inf]); %axis normal;
numberOfYTicks = 5;
ymax_refmod = ymax_ref-.000001
set(gca,'Ytick',linspace(0,ymax_refmod,numberOfYTicks))
curticks = get(gca, 'YTick');
set( gca, 'YTickLabel', cellstr( num2str(curticks(:), '%.2g') ) );
numberOfXTicks = 7;
xData = get(h1_ref,'XData');
set(gca,'Xtick',linspace(0,1800,numberOfXTicks))
h2_ref = plot(xp,model_ref,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.607,.733,.349]);
grid
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc'],'fontweight','bold');
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/óra'],'fontweight','bold');
box on
legend([h1_ref h2_ref],{'Interpolált mért adatok' 'Modell számítás'},'Location','NorthEast');
title(sprintf('R^2 = %.4g%%',R2_Ref),'fontweight','bold');
subplot(1,2,2);
hold on;
h3 = scatter(model_ref(1:100:end),data_ref(1:100:end),'+');
hChildren = get(h3, 'Children');
set(hChildren, 'Markersize', 5,'Linewidth',1.5);
grid
axis square; axis([0 .5 0 .5]); axissquarify; axis([0 .5 0 .5]);
xlabel('Modell értékek [g/m^2/óra'],'fontweight','bold');
ylabel('Interpolált mért értékek [g/m^2/óra'],'fontweight','bold');
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f1, 'Műveletlen terület modelljének illeszkedése.png', myStyle, 'Format', 'png');
saveas(f1,'Műveletlen terület modelljének illeszkedése','fig')
%% Mérési adatok és eredményfüggvény kirajzolása
f2 = figure('name','Műveletlen terület: Mérési adatok és eredményfüggvény
kirajzolása','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial')
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc'],'fontweight','bold','fontsize',12)
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/óra'],'fontweight','bold','fontsize',12)
hold on
plot (x1,ry1,'o')
hold on
plot(x,ry,'-',...
'Linewidth',2.25,...
'Color',[.333,.556,.835])
hold on
plot(xp,rfit(rs,xp),'-',...
'Linewidth',2.25,...
'Color',[.607,.733,.349])
hold on

```

```

legend('Mért adatok','Interpolált mért adatok','Modell számítás','Location','SouthWest')
grid
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f2, 'Műveletlen terület Mérési adatok és eredményfüggvény kirajzolása.png', myStyle,
'Format', 'png');
saveas(f2, 'Műveletlen terület Mérési adatok és eredményfüggvény kirajzolása','fig')
%% Múvelt terület modellillesztése
env2 = min(model_ref);
env3 = ((rs(2,:)).*2);
y1 = data_30(4,:); % y tengely adatkijelölés
y = interp1(x1,y1,x,'pchip');
%% Bemeneti adat finomítás vege %%
% c1=2*pi/24/60;
c1=2*pi/rs(3,:);
se = polyfit(x1(:,2:end),y1(:,2:end),1); % lineáris regresszió konstansainak számítása
ylr = se(:,1)*x+se(:,2); % lineáris regresszió függvényértékeinek kiszámítása
% yexp = se(:,2).*exp(se(:,1).*x); % lineáris közelítő függvény együtthatóival az
exponenciális értékek számítása
ymax = max(y1);
ymin = min(y1);
ytart = (ymax-ymin); % y értéktartománya
ym = mean(y); % amplitúdó kezdőérték számítása
kk = mean([ymax ymin]); % Szinusztól eltérés kezdőértékének számítása
% fit = @(b,x) ((b(1).*exp(b(2).*x))/2)+(env3+env2); % illesztett függvény
fit = @(b,x) (b(1).*exp(b(2).*x)); % illesztett függvény
% fit = @(b,x) (sin((2*pi/24/60)*x-b(1))); % illesztett függvény
fcu = @(b) sum((fit(b,x) - y).^2); % Legkisebb négyzetek függvény
s = fminsearch(fcu, [se(2); se(1)]); % Legkisebb négyzetek minimalizálása
% s = fminsearch(fcu, [.2]);
% xp =x; % valós modell-mért adat összefüggések meghatározásához
%% Numerikus integrálás
Area_mert = trapz (x,y);
Area_kozelites = trapz (x,fit(s,xp));
elteres = (Area_kozelites/Area_mert)*100; % A számított adatok %-os eltérése
%% R^2 és r^2 számítása Kendrick-féle függvényekkel
data = y;
model = fit(s,xp);
R2 = calccod(model,data);
r2 = 100 * calccorrelation(model,data)^2;
%% R^2 (determinációs együttható) kirajzolása
f3 = figure('name','Exponenciális tag illeszkedése','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial');
setfigurepos([100 100 600 220]); clf;
subplot(1,2,1); hold on;
h1 = plot(xp,data,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.498,.498,.498]);
h2 = plot(xp,model,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.894,.423,.039]);
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc'],'fontweight','bold');
ylabel('CO_2 kibocsátás értékek [g/m^2/óra'],'fontweight','bold');
axis([0,1800,0,+inf]); %axis normal;
numberOfYTicks2 = 5;
ymax_mod = ymax-.000001
set(gca,'Ytick',linspace(0,ymax_mod,numberOfYTicks2))
curticks2 = get(gca, 'YTick');
set(gca, 'YTickLabel', cellstr( num2str(curticks2(:), '%.2g') ) );
numberOfXTicks2 = 7;
xData = get(h1,'XData');
set(gca,'Xtick',linspace(0,1800,numberOfXTicks2))
box on
grid
legend([h1 h2],{'Interpolált mért adatok' 'Modell számítás'},'Location','NorthEast');
title(sprintf('R^2 = %.4g%%',R2),'fontweight','bold');
subplot(1,2,2); hold on;
h3 = scatter(model(1:100:end),data(1:100:end),'+');
hChildren = get(h3, 'Children');
set(hChildren, 'Markersize', 5, 'Linewidth', 1.5);
axis square; axis square; axis([0 .8 0 .8]);
xlabel('Modell értékek','fontweight','bold');
ylabel('Interpolált mért értékek','fontweight','bold');
grid
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;

```

```

hgexport(f3, 'Exponenciális tag illeszkedése.png', myStyle, 'Format', 'png');
saveas(f3, 'Exponenciális tag illeszkedése', 'fig')
%% Mérési adatok és eredményfüggvény kirajzolása
f4 = figure('name', 'A mért adatok és az exponenciális tag
kirajzolása', 'Color', [1,1,1], 'DefaultTextFontname', 'Arial')
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc]', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12)
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/óra]', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12)
hold on
plot(x1, y1, 'o', 'Color', [.498, .498, .498])
plot(x, y, '-', ...
      'Linewidth', 1.5, ...
      'Color', [.498, .498, .498])
plot(xp, fit(s, xp), '-', ...
      'Linewidth', 1.5, ...
      'Color', [.894, .423, .039])
hold on
plot(x, ylr, '-', ...
      'Linewidth', 1.25, ...
      'Color', [.501, .392, .635])
legend('Mért adatok', 'Interpolált mért adatok', 'Modell számítás', 'Lineáris
közelítés', 'Location', 'SouthWest')
hold on
grid;
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f4, 'A mért adatok és az exponenciális tag kirajzolása.png', myStyle, 'Format', 'png');
saveas(f4, 'A mért adatok és az exponenciális tag kirajzolása', 'fig')
%% Teljes függvény optimalizálás az előző exponenciális függvény adatokkal
v=[s(2), pi/2, s(1)]; % [c0,c2,A] minimum keresés kezdeti értékeinek megadása az előzőek alapján
a=fminsearch(@r_v02, v); % minimumkeresés v változókkal a r_v02 függvényben
c0=a(1);
c2=a(2);
A=a(3);
w=fun1(c0, c2, A, 10000, x1(1, end));
t=w(2, :);
env00=((A.*exp(c0.*t)+env3)+env2);
toc % számítási idő mérő óra megállítása, eredmény kiírása
%% Numerikus integrálás
fx = interp1(x1(1,:), y1(1,:), w(2,:), 'pchip');
Area_mert = trapz(w(2,:), w(1,:));
Area_kozelites = trapz(w(2,:), fx);
Area_elteres = (Area_kozelites/Area_mert)*100; % A számított adatok %-os eltérése
%% eredmény kirajzolása
f5 = figure('name', 'Közelítő függvény és az interpolált mérési adatok
megjelenítése', 'Color', [1,1,1], 'DefaultTextFontname', 'Arial');
axis([0 xmax 0 ymax]);
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc]', 'fontweight', 'bold');
ylabel('CO_2 kibocsátás értékek [g/m^2/óra]', 'fontweight', 'bold');
hold on
plot(x1(1,:), y1(1,:), 'o', 'Color', [.968, .588, .247])
plot(x(1,:), y(1,:), '-', ...
      'Linewidth', 1.3, ...
      'Color', [.968, .588, .247])
plot(t, w(1,:), '-', ...
      'Linewidth', 1.5, ...
      'Color', [.309, .505, .741])
plot(t, env00, '-', ...
      'Linewidth', 1.5, ...
      'Color', [.752, .314, .301])

legend('Mért adatok', 'Interpolált mért adatok', 'Modell számítás', 'Exponenciális
burkológörbe', 'Location', 'NorthEast')
grid on
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f5, 'Közelítő függvény és az interpolált mérési adatok megjelenítése.png', myStyle,
'Format', 'png');
saveas(f5, 'Közelítő függvény és az interpolált mérési adatok megjelenítése', 'fig')
%% Változók fájlba írása, figure mentése képként
T = table(A, c0, c2);
filename = 'data_30-7';
filename = [filename '.txt'];
writetable(T, filename);
%% R^2
% R^2 számítása és kirajzolása

```

```

data_end = interp1(x1(1,:),y1(1,:),t,'pchip');
model_end = w(1,:);
R2_end = calccod(model_end,data_end);
r2_end = 100 * calccorrelation(model_end,data_end)^2;
f6 = figure('name','Közelítő függvény korrelációja az interpolált
adatokhoz','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial');
setfigurepos([100 100 600 220]); clf;
subplot(1,2,1); hold on;
h1_end = plot(xp,data_end,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.968,.588,.247]);
h2_end = plot(xp,model_end,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.309,.505,.741]);
xlabel('Művelés óta eltelt idő [perc'],'fontweight','bold');
ylabel('CO_2 kibocsátás értékek [g/m^2/óra'],'fontweight','bold');
legend([h1_end h2_end],{'Interpolált mért adatok' 'Modell számítás'},'Location','NorthEast');
title(sprintf('R^2 = %.4g%%',R2_end),'fontweight','bold');
axis([0,1800,0,+inf]); %axis normal;
numberOfYTicks3 = 5;
ymax_mod_2 = ymax-.000001
set(gca,'Ytick',linspace(0,ymax_mod_2,numberOfYTicks3))
curticks3 = get(gca, 'YTick');
set(gca, 'YTickLabel', cellstr( num2str(curticks3(:), '%.2g') ) );
numberOfXTicks3 = 7;
xData = get(h1_end,'XData');
set(gca, 'Xtick',linspace(0,1800,numberOfXTicks3))
box on
grid
subplot(1,2,2); hold on;
h3 = scatter(model_end(1:100:end),data_end(1:100:end),'+');
hChildren = get(h3, 'Children');
set(hChildren, 'Markersize', 5,'Linewidth',1.5);
% axis square; axis([0 8 0 8]); axissquarify; axis([0 8 0 8]);
axis square; axis([0 .5 0 .5]); axissquarify; axis([0 .5 0 .5]);
xlabel('Modell értékek','fontweight','bold');
ylabel('Interpolált mért értékek','fontweight','bold');
grid
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f6, 'Közelítő függvény korrelációja az interpolált adatokhoz.png', myStyle, 'Format',
'png');
saveas(f6,'Közelítő függvény korrelációja az interpolált adatokhoz','fig')
save('workspace');

```

A kibocsátási modell illesztése (r_v02.m):

```

function error=r_v02(v) % függvény megnevezése bemeneti paraméterek megnevezése
global x1 y1 c1 % globális változó deklarálás (változók helyének megadása), hogy ugyanazok az adatok
legyenek használva, mint az ezt meghívó rutinnak
c0=v(1); % változók a bemeneti adatokhoz rendelése
c2=v(2); % változók a bemeneti adatokhoz rendelése
A=v(3); % változók a bemeneti adatokhoz rendelése
w=fun1(c0,c2,A,10000,x1(1,end));
t=w(2,:); % a lefutott függvény adatainak behívása
wm=[]; % üres vektor létrehozása
%% eredeti adatok interpolálása (alapból lineáris) és a t helyeken az értékek meghatározása és
kiírása wm vektorba
for i=1:length(t)
wm(i)=interp1(x1(1:end),y1(1:end),t(i),'pchip'); % Adatok interpolálása
end
%% az interpolált és a fun függvény közötti különbség számítása
dt=diff(t); % a területszámításhoz használ t szélesség meghatározása
error=sum(abs(w(1,:)-wm)*dt(1)); % a közelítő függvény hibájának számítása, a mely a minimalizálás
alapja (trapézterület alapú numerikus integrálás, felbontás a teljes időskálára nézve t/10000)

```

A kibocsátási modell illesztése (fun1.m):

```

function w=fun1(c0,c2,A,tres,tend) % függvény megnevezése bemeneti paraméterek megnevezése
t=linspace(0,tend,tres); % felbontás meghatározása
global y1 env2 env3 c1 % globális változó deklarálás (változók helyének megadása), hogy ugyanazok az
adatok legyenek használva, mint az ezt meghívó rutinnak
env1=A*exp(c0*t); % függvény első tagja
env2=(env1+env3)/2.*(sin(c1*t-c2)+1)+env2; % az illesztett függvény
w=[env;t;env1];

```


Az O'Connell modellel kiegészített kibocsátási modell illesztése a műveletlen terület adataira:

```

clear % Workspace változók törlése
clc % képernyő törlése
tic % számítási időt mérő óra indítása
clearvars -global
global data_30 x1 y1 env2 c1 env3
% fid=xlsread('meresek.xlsx','20040715'); % behívja az excel első munkalapját
fid=xlsread('meresek.xlsx','20140818'); % behívja az excel első munkalapját
data_30=fid.'; % mátrix transzponálás
x1 = data_30(1,:); % x tengely adatkijelölés
ry1 = data_30(2,:); % y tengely adatkijelölés (referencia)
xmax = max(x1);
xmin = min(x1);
x = linspace(xmin,xmax,10000);
ry = interp1(x1,ry1,x,'pchip');
ymax_ref = max(ry1);
ymin_ref = min(ry1);
ybart_ref = (ymax_ref-ymin_ref); % y értéktartománya
kk_ref = mean(ry); % amplitúdó kezdőérték számítása
yelt = ry-ymax_ref+(ybart_ref/2); % eltérések az értéktartomány középtértékétől
zx = x(yelt .* circshift(yelt,[0 1]) <= 0); % zérushelyek keresése a periódusidő meghatározásához
per = 2*mean(diff(zx)); % periódusidő kezdőértékének számítása
ym_ref = (zx(:,1)-per)/per; % amplitúdó kezdőérték számítása
a333=.03282;
b333=.07640;
c333=.0001465;
rfit = @(b,x) a333.*exp(b333.*(b(1)+b(2)*sin( ( 2*pi/b(3)).*x)+b(4) ))+c333.*(b(1)+b(2)*sin( (
(2*pi/b(3)).*x)+b(4) )).^2;
rfcn = @(b) sum((rfit(b,x) - ry).^2); % Legkisebb négyzetek függvény
rs = fminsearch(rfcn, [kk_ref; ybart_ref; per; ym_ref]); % Legkisebb négyzetek minimalizálása

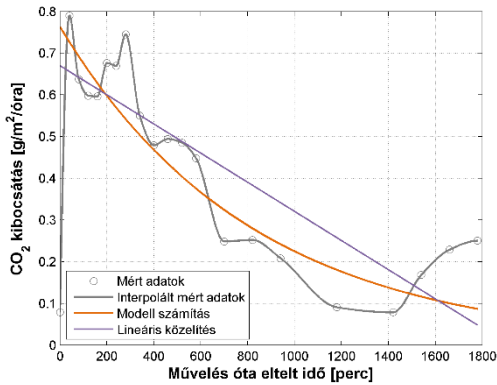
xp = x; % valós modell-mért adat összefüggések meghatározásához
%% Numerikus integrálás
Area_mert_ref = trapz(x,ry);
Area_kozelites_ref = trapz(x,rfit(rs,xp));
elteres_ref = (Area_kozelites_ref/Area_mert_ref)*100; % A számított adatok %-os eltérése
%% R^2 és r^2 számítása Kendrick függvényekkel
data_ref = ry;
model_ref = rfit(rs,xp);
modelex_ref = rfit(rs,x1);
R2_Ref = calccod(modelex_ref,ry1);
%% R^2 (determinációs együttható) és r^2 (négyzetes korrelációs együttható) kirajzolása
f1=figure('name','Műveletlen terület modelljének
illeszkedése','Color',[1,1,1],'DefaultTextFontname','Arial');
setfigurepos([100 100 600 220]);
clf;
subplot(1,2,1);
hold on;
h1_ref = plot(xp,data_ref,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.333,.556,.835]);
axis([0,1800,0,+inf]); %axis normal;
numberOfYTicks = 5;
ymax_refmod = ymax_ref-.000001
set(gca,'Ytick',linspace(0,ymax_refmod,numberOfYTicks))
curticks = get(gca, 'YTick');
set( gca, 'YTickLabel', cellstr( num2str(curticks(:), '%.2g') ) );
numberOfXTicks = 7;
xData = get(h1_ref,'XData');
set(gca,'Xtick',linspace(0,1800,numberOfXTicks))
h2_ref = plot(xp,model_ref,'-',...
'Linewidth',1.5,...
'Color',[.607,.733,.349]);
grid
xlabel('Művelés óta eltelt idő [min]','fontweight','bold');
ylabel('CO_2 kibocsátás [g/m^2/h]','fontweight','bold');
box on
legend([h1_ref h2_ref],{'Interpolált mért adatok' 'Modell számítás'},'Location','NorthEast');
title(sprintf('R^2 = %.4g%%',R2_Ref),'fontweight','bold');
subplot(1,2,2);
hold on;
h3 = scatter(model_ref(1:100:end),data_ref(1:100:end),'+');
hChildren = get(h3, 'Children');

```

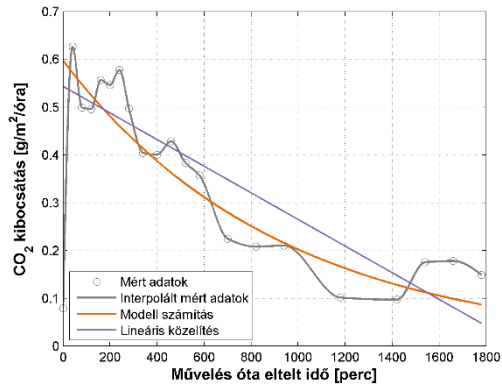
```
set(hChildren, 'Markersize', 5, 'Linewidth', 1.5);
grid
% h3_ref = scatter(modelex_ref, ry1, 'b. ');
axis square; axis([0 .5 0 .5]); axissquarify; axis([0 .5 0 .5]);
xlabel('Modell értékek [g/m^2/h]', 'fontweight', 'bold');
ylabel('Interpolált mért értékek [g/m^2/h]', 'fontweight', 'bold');
box on
myStyle = hgexport('factorystyle');
myStyle.Format = 'png';
myStyle.Resolution = 300;
hgexport(f1, 'Műveletlen terület modelljének illeszkedése.png', myStyle, 'Format', 'png');
saveas(f1, 'Műveletlen terület modelljének illeszkedése', 'fig')
```

M5: A kibocsátási modell illesztésének részeredményei

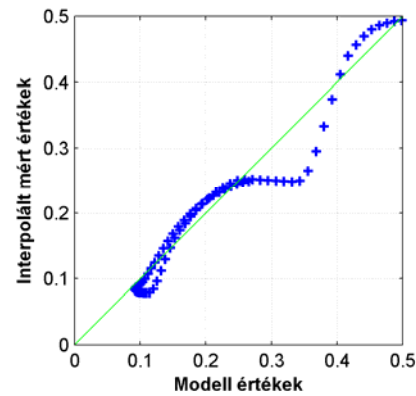
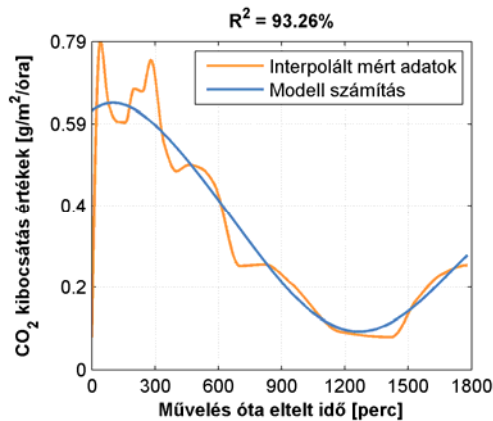
A 9. számú, enyingi területen végzett, közepes időtartamú mérés részeredményei:



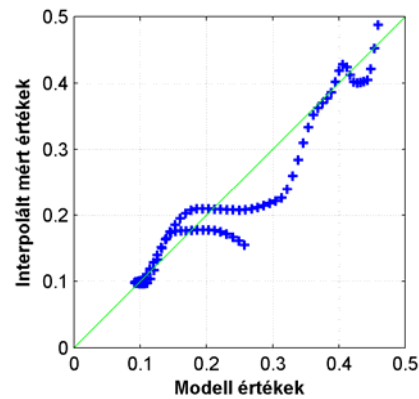
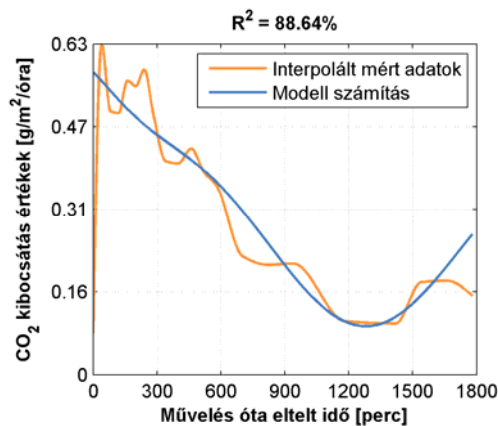
8.1. ábra. Az elsőfokú polinom és az exponenciális tag illeszkedése a mért adatokra a szántott területen



8.2. ábra. Az elsőfokú polinom és az exponenciális tag illeszkedése a mért adatokra a tárcsázott területen

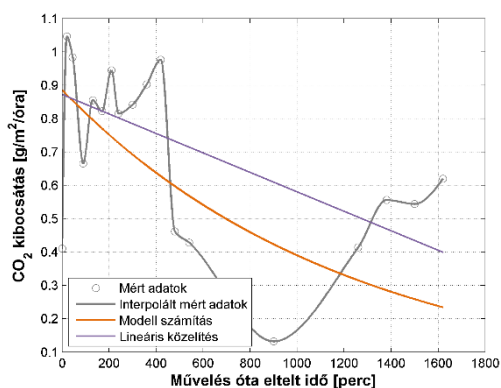


8.3. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra, valamint a mért és számított adatok korrelációja a szántott terület esetében

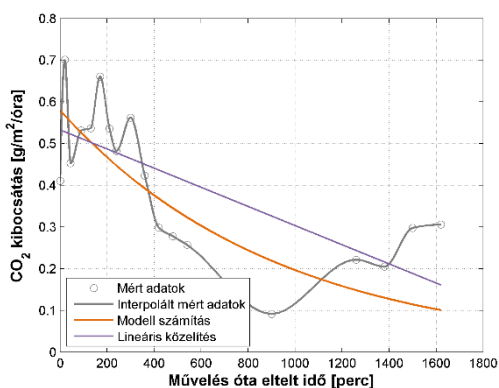


8.4. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra, valamint a mért és számított adatok korrelációja a tárcsázott terület esetében

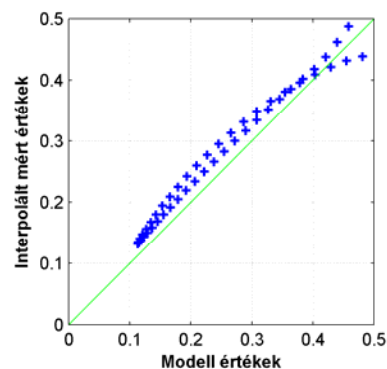
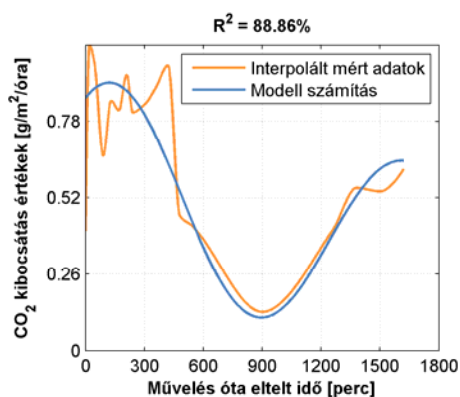
A 10. számú, mesztegyői területen végzett, közepes időtartamú mérés részeredményei:



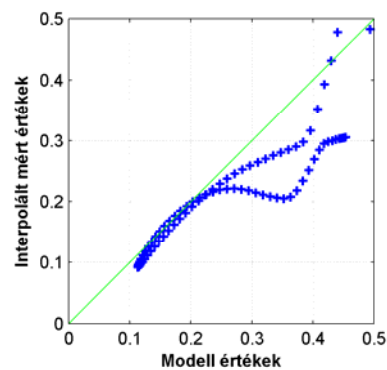
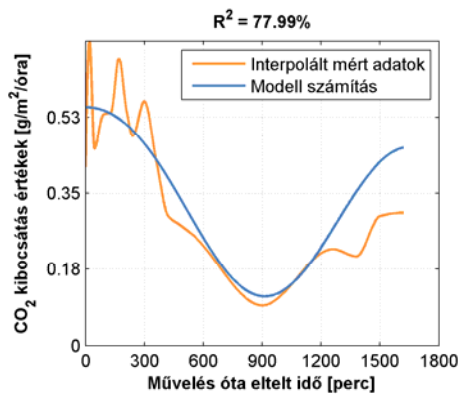
8.5. ábra. Az elsőfokú polinom és az exponenciális tag illeszkedése a mért adatokra a szántott területen



8.6. ábra. Az elsőfokú polinom és az exponenciális tag illeszkedése a mért adatokra a kultivátorozott területen



8.7. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra, valamint a mért és számított adatok korrelációja a szántott terület esetében



8.8. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra, valamint a mért és számított adatok korrelációja a kultivátorozott terület esetében

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom konzulenseimnek:

Prof. Dr. Jóri J. Istvánnak, aki kutatásaim kezdeti lépéseitől fogva atyai, jóbaráti szeretettel, szakmai útmutatással egyengeti egyetemi és tudományos pályámat, és emberi példájával folyamatosan megerősíti hitemet és kitartásomat;

Prof. Dr. Fenyvesi Lászlónak, aki új irány felé terelte kutatásaimat és hasznos tanácsaival, folyamatos iránymutatásával, támogató hozzáállásával segítette munkám befejezését és tudományos szemléletem kibővítését.

Szeretném köszönetemet kifejezni:

NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézetnek a mérések lehetőségének megteremtéséért és a használt eszközök és infrastruktúra biztosításáért;

Szabó Istvánnak a VM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet korábbi munkatársának a mérések kivitelezéséhez nyújtott segítségét;

testvéremnek, Rádics Baláznak a szántóföldi kísérletekhez nyújtott kísérleti parcellák és munkagépek biztosításáért;

Bendefy András kollégámnak, a Matlab program elsajátításához nyújtott segítségéért;

SZIE, Műszaki Tudományi Doktori Iskolát vezető Prof. Dr. Farkas Istvánnak, aki lehetőséget biztosított, hogy agrár-műszaki tudományterületen nyújtsam be ezt a disszertációt.

Külön megköszönöm:

feleségemnek, a támogatást és biztatást, valamint gyermekeimnek a türelmet és azt az önzetlen áldozatot, amellyel végigkísérték munkámat.

