

A talajművelés hatása a talaj CO₂ kibocsátására

¹RÁDICS JÁNOS PÉTER, ¹JÓRI J. ISTVÁN, ²FENYVESI LÁSZLÓ

¹BME, Gép- és Terméktervezés Tanszék, radics.janos@gt3.bme.hu

²NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet

Bevezetés

A globális klímaváltozás az emberiség eddigi legnagyobb kihívása (JOLÁNKAI & BIRKÁS, 2005). Bolygónk klímájának megváltozását elsősorban a földi légkör természetes üvegházhatását szabályzó, üvegházhatású gázok (GHG) koncentrációjának emelkedése okozza, amely megváltoztatja légkörünk természetes, termikus struktúráját. Ez a folyamat egyidős az emberiség növekvő igényeit kielégíteni kívánó iparosodási folyamatokkal. A hőmérséklet folyamatos emelkedése, az egyre gyakrabban tapasztalható időjárási szélsőségek egyre nyilvánvalóbbá teszik, hogy intenzív globális összefogásra és intézkedésekre van szükség, amelyeknek egyrészt a hatások mérséklésére, másrészt pedig a változás sebességének csökkentésére, megállítására, vagy visszafordítására kell koncentrálniuk. 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, viszont 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. Főként az Egyesült Államokban tekintélyes mennyiségű kutatási információ gyűlt össze a művelt talajok CO₂ kibocsátásának csökkentésére (LAL et al., 1998a, 1998b), mivel az ipari folyamatokhoz képest az egységnyi területre jutó kibocsátás intenzitása elenyésző ugyan, de a kibocsátást adó terület mérete miatt, a növénytermesztés és a talajművelés területén, jelentős potenciált jelent. 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 biomassa elégetése és a földhasználatban előidézett egyéb változások további 14%-ot tesznek ki (COLE, 1996; SMITH et al., 1997).

A hagyományos művelési rendszerek, a talaj levegőztetése, a növényi maradványok bekeverése és az aggregátumok aprítása által fokozza a szerves anyagok lebomlását. Ez a talaj szén készletének jelentős csökkenését, és ezzel együtt a művelési eljárásból adódó magasabb szén-dioxid kibocsátását eredményezi. A talajvédő művelési rendszerek segítségével, a művelés ezen káros hatása visszafordítható (KASSAM et al., 2012). A művelt talajok szén körforgásának pontos megértéséhez az egyes ok-okozati összefüggéseket külön kell vizsgálni, hogy megvalósítható legyen a folyamat pontos modellezése. A környezeti változók ismeretében részletes matematikai modellekkel leírható, az

erdő- és szántóföldi talajok CO₂ körforgásának abszolút értéke (GONZALES-SÁNCHEZ et al., 2012). Hiányosak azonban azok az ismeretek, amelyek segítségével a művelési eljárások CO₂ kibocsátása modellezhető. Ezek ismeretében lehetőség nyílna annak meghatározására, hogy a különböző művelési eljárások és talajművelési rendszerek használata milyen irányban és mértékben befolyásolja a talaj CO₂ kibocsátását, ezzel együtt szénkészletének változását.

A talaj pórusterének a nedvesség által el nem foglalt részét levegő tölti ki. Átnedvesedéskor a pórusok egy részéből a víz kiszorítja a levegőt, a száradó talajban pedig fokozatosan nő a gázfázis térfogata. A talajok felső rétegében nagy jelentősége van a levegőztetésnek (STEFANOVITS et al., 1999). A talajlégzés során keletkező szén-dioxidot, 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 (SINGH & GUPTA, 1977). A talajlégzésből adódó szén-dioxid kibocsátás vizsgálatára elméleti megközelítések (FANG & MONCRIEFF, 1999; JASSAL et al., 2004) valamint laboratóriumi és „in situ” vizsgálatok is rendelkezésre állnak (ANDERSON, 1982; PARKIN, 1996; FARKAS et al., 2011). A talaj szén-dioxid kibocsátásának közvetlen szántóföldi körülmények között történő vizsgálatára 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 szén-dioxid mennyisége a kamrakoncentráció változása alapján meghatározható (SINGH & GUPTA, 1977).

Az egységes validációs rendszer hiánya miatt, az optimális mérőkamra kialakítás több kutatás tárgyát is képezi (TÓTH et al., 2011). Az egyes kutatók különböző alakú és méretű, általában egyedi kialakítású kamrákat használnak. A szakirodalom beszámol nagy (3,25 m³) térfogatú, hasáb alakú, légkeveréses kamrával végzett vizsgálatról (REICOSKY, 1990), valamint jóval kisebb térfogatú, henger, hasáb és csonkakúp alakú, légkeverés nélküli kamrák használatáról is (PARKIN & VENTEREA, 2010; ZSEMBELI et al., 2005).

A tapasztalatok szerint, zárt mérőkamrák légtől eltérő CO₂ koncentrációja befolyásolja a talaj kibocsátási intenzitását, azonban a kibocsátás szén-dioxid mennyiségének mérésére jelenleg ez a legpontosabb eljárás (RÁDICS & JÓRI, 2011). A talaj mikroklímájára gyakorolt hatásból adódó hibát minimalizálhatjuk a kamra megfelelő méretével, az inkubációs idő csökkentésével, a mért levegő kiszivattyúzásával, gáz-analizátoros mérőrendszer használatával, a kamralevegő keverésével, tapasztalaton alapuló ürítés-telítés módszerének kidolgozásával.

A szakirodalomban jelentős mennyiségű szántóföldi mérések alapján meghatározott intenzitási és kumulált érték található a bolygatatlan (JANSSENS et al., 2000) és a művelt talaj (REICOSKY, 1990) CO₂ kibocsátására is. Hiányosak azonban azok az ismeretek, amelyek segítségével a művelési eljárások szén-dioxid kibocsátásának modellezése lehetővé válik és a pontosan meghatározható, hogy a különböző művelési eljárások és talajművelési rendszerek használata milyen irányban és mértékben befolyásolja a talaj szén-dioxid kibocsátását. A talajlégzés modellezésének és mérésének nehézségét a talaj komplex természete adja, hiszen 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 & TRUMBORE, 1995).

A biokémiai folyamatok, így CO₂ kibocsátás hőmérséklet függősége a 19. század végétől ismert, melyet először az Arrhenius egyenlet írta le (ARRHENIUS, 1889). A mikroorganizmusok aktivitásában a hőmérséklet hatása a legjelentősebb, ez miatt a műveletlen talajok CO₂ kibocsátását leíró kapcsolati modellek alapja a

legtöbb esetben az Arrhenius egyenlet alapján valamilyen exponenciális függvény (LLOYD & TAYLOR, 1994), de ugyanígy megtalálhatók a mérési eredmények regresszió analízise alapján felírt empirikus összefüggések is (FANG & MONCRIEFF, 2001). A művelt talajok, közvetlenül a talajbolygatás után tapasztalható, a levegő bekeverés, aggregátum- és pórustérfogat megváltozás hatására bekövetkező intenzívebb CO₂ kibocsátása azonban csak kisebb mértékben függ a hőmérséklettől. A talajok művelése nem csak a talaj CO₂ kibocsátásának intenzitását, hanem a CO₂ kibocsátás hőmérséklet-érzékenységet is megváltoztatja. A művelés után mért adatok alapján, a CO₂ kibocsátás hőmérséklet érzékenysége arányban van a talajművelés intenzitásával (LASCALA et al., 2005).

A művelés utáni kibocsátás kvantitatív meghatározására kidolgozott modellek a legtöbb esetben elsőrendű reakciókinetika alapján levezetett exponenciális (LASCALA et al., 2009; REICOSKY & ARCHER, 2007), vagy egyéb, empirikus összefüggések (ELLERT & JANZEN, 1999). Ezek többnyire csak a katalizált enzimreakció jellege alapján, az emisszió átlagértékeire adnak közelítést, de nem veszik figyelembe a talajbolygatás hatására megnövekedett emisszió lecsengéséig, a hőmérsékletfüggő napi ingadozás jelentős hatását.

Kutatásunk célja egyrészt egy egyszerűen alkalmazható matematikai modell kidolgozása, a művelés hatására létrejövő kibocsátás meghatározására. Másrészt pedig a modell általánosítása és a talajművelés technológiák teljes kibocsátásának meghatározására.

Anyag és módszer

A talajművelést követő CO₂ kibocsátásának mérésére közepes időtartamú (26–30 óra) szántóföldi vizsgálatokat végeztünk a Fejér megyei, Enying- és a Somogy megyei, Mesztegnyő térségében lévő kísérleti területeken. A kísérleti területeken kisebb parcellákat jelöltünk ki, amelyeken intenzív szántásos alpművelést és kevésbé intenzív, tarlólántásnak megfelelő műveléseket végeztünk különböző munkagépekkel (1. táblázat).

1. táblázat. A közepes időtartamú mérések összefoglaló adatai

(1) Mérés száma	(2) Művelet / dátum	(3) Terület	(4) Időjárási és talaj viszonyok	(5) Talajművelő gép	(6) Művelési mélység, cm
1.	Tarlólántás gabonatarlón 2004.07.15.- 2004.07.16.	Enying "S4"	száraz, napos, 28 °C száraz talaj	Kuhn Optimer kompakt tárcsás borona	12–14
				Kverneland BB115 ágyeke	24–26
2.	Tarlólántás gabonatarlón 2014.08.18- 2014.08.19.	Mesztegnyő "H2"	száraz, napos, 28 °C nedves talaj	Pöttinger Synkro szántóföldi kultivátor	20–22
				Vogel&Noot váltvaforogató eke	32–35



1. ábra. Csonkakúp és hasáb alakú mérőkamrák a mérőterületen

A művelés hatására kibocsátott CO₂ akkumulálására 8,3 dm³ térfogatú csonkakúp és 27 dm³ térfogatú, hasáb alakú mérőkamrákat (1. ábra) helyeztünk el. A mérőkamrák kihelyezése után, az inkubációs idő leteltével, a kamrákban az infravörös abszorpciós elven működő, TESTO 535 típusú CO₂ koncentráció mérő műszerrel végeztük a kamrakoncentráció mérését. A mintavételi időközöket a kezdeti mérésnél a kibocsátás valószínűsíthető intenzitása, majd a mérési tapasztalatok alapján, a kibocsátás reprezentálásának optimalizálására törekedve határoztuk meg. A művelést követő 3-5 órás időszakban a legintenzívebb a kibocsátás. Ennek megfelelően, ebben az időszakban minimalizáltuk a mérések közötti időt, amelyet a minimális inkubációs idő, a kamrák száma, valamint a pillanatnyi kamrakoncentráció mérésének időszükséglete határozott meg. A mérés időszükségletét az alkalmazott TESTO 535 műszer esetében főként az határozza meg, hogy a pontos méréshez, a mérőfejnek alkalmazkodnia kell a kamra atmoszférájához, amely 60–90 másodperc a környezeti levegő hőmérsékletétől függően. A természetes kibocsátás referencia értékeinek meghatározására, a művelt területen alkalmazottal megegyező számú mérőkamrával, felvettük a műveletlen terület kibocsátását is. A mérőkamrákat a terület heterogenitásának reprezentálására, minden ciklus alkalmával más-más, véletlenszerűen kiválasztott mérési ponton talajba süllyesztettük, így minden egyes mérőpont esetében biztosított volt, hogy a mérés megkezdéséig, nem történik beavatkozás a talaj mikroklimájába és a mért értékek a valós, a művelésre természetes körülmények között jellemző emissziós értékeket adják meg.

A vizsgálatokat a korábbi mérések tapasztalatai alapján validált „ürítéses” módszerrel végeztük, amely során a mérőkamrákat minden mérés után szellőztettük. Az ürítéses 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 méteres magasságban mértük a légköri CO₂ koncentrációt.

A mérési adatokat TESTO műszer [ppm]-ben adja meg, amely SI mértékegységben értelmezve [μmol/mol]. Az adatfeldolgozáshoz a kamrákban mért koncentráció értékeket, a talaj CO₂ kibocsátási intenzitásának jellemzésére, egységnyi idő és területre értelmezve kell átszámítani, amelyet a következő egyenlet szerint végeztük (MEYER et al., 1987; WIDÉN & LINDROTH, 2003) alapján:

$$F_{CO_2} = \frac{dC}{dt} \frac{V \cdot p \cdot M}{R \cdot (273,15 + T) \cdot A}, \quad (1.)$$

ahol F_{CO_2} a CO_2 kibocsátás intenzitása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, dt a mérési idő [h], dC a CO_2 koncentráció változása a mérés időtartama alatt $\left[\frac{mol}{mol}\right]$, V a mérőkamra térfogat $[m^3]$, p a légköri nyomás [Pa], M a CO_2 moláris tömege = 44,01 $\left[\frac{g}{mol}\right]$, R az univerzális gázállandó = 8,314 $\left[\frac{J}{mol \cdot K}\right]$, T a hőmérséklet [$^{\circ}C$] és A a mérőkamra által lefedett talajfelszín $[m^2]$.

A mintavételi ciklusidőket a kibocsátás valószínűsíthető intenzitása, majd a mérési tapasztalatok alapján a kibocsátás reprezentálásának optimalizálására törekedve határoztuk meg. A ciklusidő minimumértékét a mérőműszer mérési ideje, a mérőkamrák és a mintavételi területek száma határozza meg. Az előzőek miatt a mérési eredmények az idő függvényében nem egyenletes eloszlású diszkrét értékek. A megfelelő modell illesztéshez szükség van a mért értékek interpolálására. A mért adatok közötti értékek meghatározását alak tartó, monoton szakaszos harmadfokú interpolációval végeztük (FRITSCH & CARLSON, 1980).

A kibocsátási modell felállítása

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 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).

A művelés hatására megváltozó talaj CO_2 kibocsátás időben változó folyamatának lezajlását egyrészt a műveléssel a talajba kevert oxigén által katalizált enzimek reakciói, másrészt pedig a talaj hőmérsékletének változásai által módosult sebességű enzimek reakciói együttes hatása eredményezi. Az enzimek által katalizált reakciók folyamatát a Michaelis-Menten kinetikával szokás jellemezni (NYESTE, 1988), amely sztöchiometriai egyenlete alapján a végtermék képződésre levezethető differenciálegyenlet megoldása a következő:

$$C_{talaj}(t) = C_0 \cdot e^{-k_1 t}, \quad (2.)$$

ahol C_{talaj} a talaj mobilizálható szén tartalma $\left[\frac{g}{m^2}\right]$, t az idő [h], C_0 a talaj kezdeti mobilizálható szén tartalma $\left[\frac{g}{m^2}\right]$, k_1 modell paraméter [-].

A mért adatok közelítésének egyik fontos szempontja a felszíni hőmérséklet hatásának és jellegének figyelembe vétele. Ugyanakkor a hőmérséklet direkt hatásának, hőmérsékletfüggő változóval való követése nem indokolt. A különböző környezeti hatások és talajadottságok által befolyásolt, méréssel meghatározható kibocsátási értékek már tartalmazzák a hőmérséklet paramétert, hiszen 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 talajhőmérséklet változása a (VÖLGYESI, 1982) alapján az alábbi függvénnyel írható le:

$$T = T_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{t_0}t + \beta\right), \quad (3.)$$

ahol T a talajhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], T_0 a talaj közepes hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], A a talajhőmérséklet változás amplitúdója [$^{\circ}\text{C}$], t_0 a periódus hossza [h], t az idő [h], a fáziseltolódás [h].

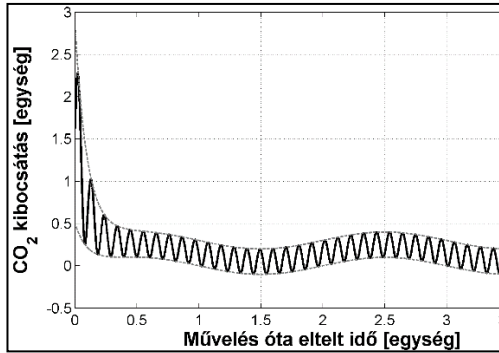
A katalizált enzimreakció hatását és a kibocsátás hőmérsékletfüggőségét jellemző (2.) és (3.) egyenletek egyszerű összeszorzásából kapható függvény hasonló lenne a csillapított rezgőmozgás leírásához, azonban jelen esetben ez nem kielégítő, mivel az alapvető ok a művelés utáni CO_2 kibocsátás és a műveletlen talaj CO_2 kibocsátásának különbözőségére, a talajba kevert, oxigént tartalmazó levegő hatása az aerob baktériumok enzimreakcióira, amely minden esetben pozitív irányba tolja el a függvényértékeket. Ebből következően a modell középértékének exponenciálisan csökkenő jelleget kell mutatnia, vagyis összességében a művelés utáni szén-dioxid kibocsátás modellezése egy exponenciálisan csökkenő amplitúdójú, szinuszos periodicitással változó függvénnyel indokolt, amely periodicitása egyrészt a napi, másrészt pedig az éves hőmérsékletingadozást írja le. Így a kibocsátási modell a következőképpen írható le:

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t \cdot c_0)} + h)}{2} \right) (\sin(c_1 t - c_2)) \right) + \left(\frac{(Be^{(t \cdot c_0)} + h)}{2} \right) + (C * \sin(c_3 * t)), \quad (4.)$$

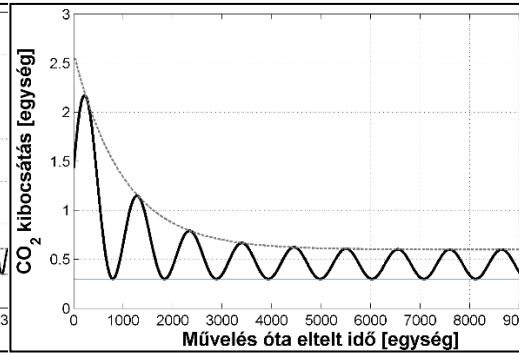
ahol W a CO_2 kibocsátás [$\frac{g}{m^2 h}$], A az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-], B az emisszió minimumértékének kezdeti értékét megadó együttható [-], C az emisszió éves ingadozásának amplitúdóját megadó együttható [-], t a művelést követően eltelt idő [h], c_0 az emisszió intenzitásának csökkenését megadó együttható [-], h a műveletlen terület maximális kibocsátása [$\frac{g}{m^2 h}$], c_1 a műveletlen terület CO_2 kibocsátásának periódusidejét megadó együttható [-], c_2 a kibocsátás szinuszos periodicitásának fáziseltolódását megadó együttható [-], c_3 a műveletlen terület CO_2 kibocsátásának éves periódusidejét megadó együttható [-], j a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke [$\frac{g}{m^2 h}$]. A (4.) egyenlet szerinti modell grafikus megoldása a 2. ábrán látható. az együtthatók meghatározása ennek a modellnek az esetében a bonyolult matematikai problémán túl szinte kivitelezhetetlen mennyiségű mérési adat meglétét feltételezi. Másrészt a művelés hatására kibocsátott CO_2 mennyiségének meghatározása szempontjából túldefiniált. Ez utóbbi szempontot, valamint az általunk elvégzett vizsgálatok időtartamát és mérési pontjainak számát figyelembe véve, az egyes művelések kibocsátásának leírására alkalmazható gyakorlatias modell a (4.) egyenlet egyszerűsítésével az (5.) egyenlet szerint írható le. Ennek a gyakorlati szempontból egyszerűen alkalmazható modellnek a felső burkológörbéje exponenciális függvény, míg alsó burkolója a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke alapján konstans függvény.

$$W = \left(\left(\frac{(Ae^{(t \cdot c_0)} + h)}{2} \right) \cdot (\sin(c_1 \cdot t - c_2) + 1) \right) + j \quad (5.)$$

ahol W a CO_2 kibocsátás $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, A az emisszió kezdeti értékét megadó együttható [-], t a művelést követően eltelt idő [h], c_0 az intenzitás csökkenését adó együttható [-], h a műveletlen terület maximális kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, c_1 a műveletlen terület CO_2 kibocsátásának periódusidejét adó együttható [-], c_2 a kibocsátás fáziseltolódását adó együttható [-], j a műveletlen kibocsátás minimumértéke $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$. Az (5.) egyenlet grafikus megoldását a 3. ábrán mutatjuk be.



2. ábra. A (4.) egyenlet általános grafikus megoldása



3. ábra. Az (5.) egyenlet általános grafikus megoldása

A kibocsátási modell együtthatóinak meghatározásához, Matlab program segítségével, elvégeztük az (5.) egyenlet nemlineáris regresszió analízisét. 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 minimum érték keresés során, az együtthatók értékének iterációja nem tud átlépni. Így hiába lesz a függvény konvergens, a globális minimumot nem sikerül elérnie. Ezért a kibocsátási modellek illesztése előtt el kellett végezni az együtthatók kezdőértékeinek meghatározását, amely minden esetben a mért adatok elemzésén alapult.

A kibocsátási modell (5. egyenlet) alsó burkolóját, illetve felső burkológörbéjének aszimptotáját a műveletlen terület mért adataira illesztett (5.) egyenlet szerinti szinuszos függvény határértékei adják meg.

$$W_{ref} = b_1 + b_2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{b_3} \cdot t - b_4\right) \quad (6.)$$

ahol W_{ref} a műveletlen terület kibocsátási intenzitása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, b_1 az emisszió középérték együttható, b_2 az emisszió amplitúdójához tartozó együttható $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, b_3 az emisszió periódusidejéhez tartozó együttható, b_4 az emisszió fáziseltolódás együtthatója, t az idő [h].

A (6.) egyenlet együtthatóinak meghatározását a legkisebb négyzetek minimalizálásának módszerével végeztük a következők szerint:

$$\min \left\{ \sum_{t_0}^{t_{end}} \left(W_{ref}(b_1, b_2, b_3, b_4) - W_{ref\ mért} \right)^2 \right\} \quad (7.)$$

ahol W_{ref} = a referenciaterület a CO₂ kibocsátási függvénye, $W_{ref\ mért}$ a referenciaterület méréssel meghatározott CO₂ kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, $b_1, b_2, b_3, b_4 =$ (5.) egyenlet együtthatói.

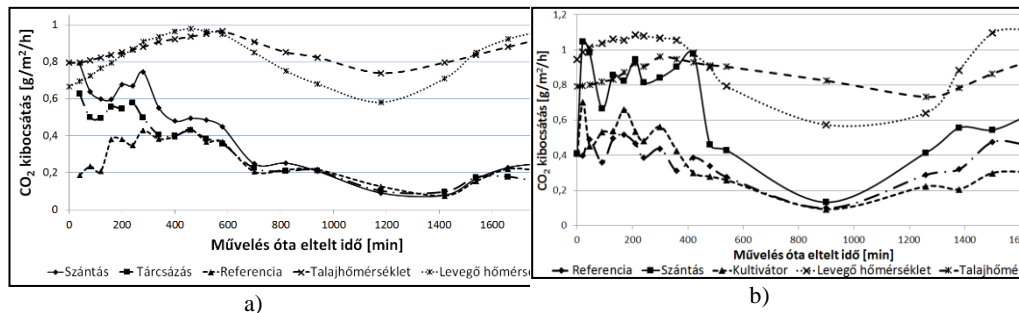
A kibocsátási modell burkológörbéihez tartozó határértékek meghatározását követően, a teljes modell illesztését, a modell kvantitatív jellege miatt, az elemi numerikus integrálok különbségének minimalizálásával végeztük a következők szerint:

$$\int_{t_0}^{t_{end}} |W_{mért} - W(c_0, c_2, A)| dt \rightarrow \min \quad (8.)$$

ahol W a talaj CO₂ kibocsátás függvénye, $W_{mért}$ a művelt terület mért CO₂ kibocsátása $\left[\frac{g}{m^2h}\right]$, $c_0, c_2, A =$ a (4.) egyenlet együtthatói.

Eredmények

A közepes időtartamú mérések mérési eredményei alapján számolt kibocsátási intenzitás értékeket az 4. 4. ábra. ábrán mutatjuk be.

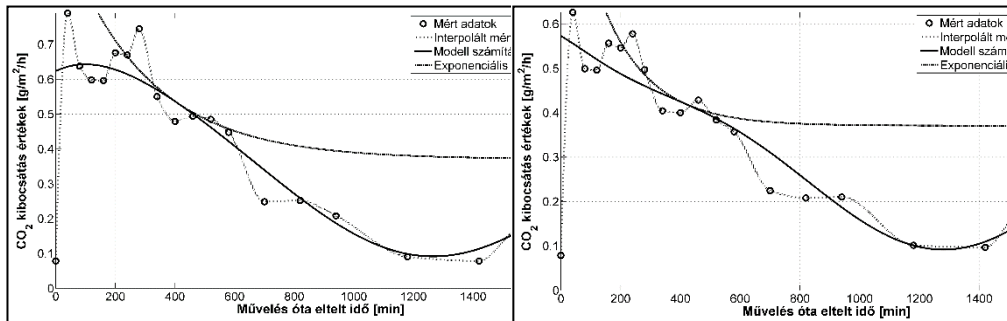


4. ábra. A mért kibocsátási és hőmérséklet adatok megjelenítése polinomális interpolációval, a) 1. mérés; b) 2. mérés

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. Az első közepes időtartamú mérés esetében 11–15 óra után megfigyelhető a művelt és a nem művelt terület görbéinek együttfutása is. Ez megegyezik a szakirodalomban megtalálható megállapításokkal, mivel például a művelés hatásának lecsengését (ELLERT & JANZEN, 1999) közel ilyen időtartamban tapasztalta kanadai csernozsem talajon végzett vizsgálataik során. Ugyanakkor a második mérés esetében a kibocsátási értékének együttfutása nem határozható meg egyértelműen, mivel a valószínűsíthető együttfutás időszaka az éjszakára esik, ahol a talajhőmérséklet jelentős csökkenése is nagymértékben mérsékli a kibocsátást. A görbék lefutásában

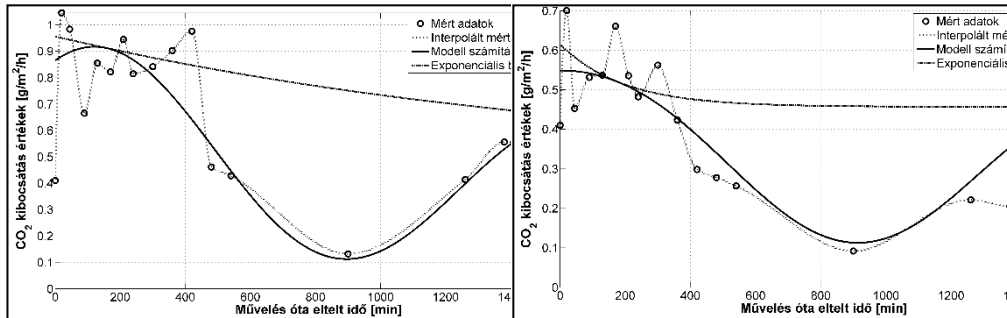
tapasztalható fluktuáció valószínűsíthetően a térbeli heterogenitás miatt jelentkeznek. Ezt a megállapítást támasztja alá, hogy a korábbi méréseknél használt kumulált mérési eljárással, hosszabb ideig azonos mérőpontban történő mérés esetén, a mért eredmények simább lefutású görbéket eredményeztek. Az üritéses 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 referenciagörbe értékei alapján jól látható, hogy a műveletlen talaj esetében a reakciókinetikai modelltag elhagyása helyénvaló, hiszen a kibocsátás a talajhőmérséklettől eltolt periódusú, de hasonló jellegű görbelefutást mutat. Megfigyelhető az is, hogy a nem művelt terület kibocsátásának maximuma nem a talajhőmérséklet, inkább a levegő hőmérséklet maximumával esik egybe. A művelt terület mért értékeire illesztett kibocsátási modell illeszkedését és az exponenciális burkológörbéket az 5–8. ábrákon mutatjuk be.



5. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése az 1. mérés szántott területen mért adataira

6. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése az 1. mérés tárcsázott területen mért adataira



7. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése az 2. mérés szántott területen mért adataira

8. ábra. A kibocsátási modell illeszkedése az 2. mérés kultivátorozott területen mért adataira

A nem művelt terület mért értékeire illesztett szinuszos modelltag, valamint a művelt terület mért értékeire illesztett teljes kibocsátási modell illeszkedésének pontosságát, valamint a mért és számított adatok alapján meghatározott kibocsátási értékeket a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat. A kibocsátási modell illeszkedése a mért adatokra és a mérés alatt kibocsátott CO₂ mennyisége

	(1) Determi- nációs együttható (R ²) [%]	(2) A mért adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége [g/m ²]	(3) A modell adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége [g/m ²]	(4) A kibocsátott CO ₂ mennyiségének eltérése a műveletlen területhez képest [g/m ²] [%]	
(a) 1. mérés					
(b) Műveletlen terület	72,58	6,876	6,875	-	100
(c) Szántott terület	93,26	9,380	9,267	2,392	134
(d) Tárcsázott terület	88,86	8,162	7,883	1,008	114
(e) 2. mérés					
(f) Műveletlen terület	81,10	8,074	8,074	-	100
(g) Szántott terület	77,99	13,044	13,467	5,393	166
(h) Kultivátorozott terület	88,86	8,509	7,603	-0,471	94

A bemutatott modell nemlineáris regresszió analízise, a definiált feltételek mellett végzett vizsgálatok esetében a 3. táblázat szerinti emissziós együtthatókat eredményezte.

3. táblázat. A kibocsátási modell együtthatói

	A	c ₀	c ₁	c ₂	h	j
(a) 1. mérés						
(b) Szántott terület	0,6991	-0,0036	0,0037	-0,0870	0,2791	0,0917
(c) Tárcsázott terület	0,6507	-0,0062		-0,0353		
(d) 2. mérés						
(e) Szántott terület	0,4994	-0,000058	0,0043	-0,8985	0,3443	0,1127
(f) Tárcsázott terület	0,1589	-0,0052		-0,8234		

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az alkalmazott kibocsátási modell, a vizsgált mért értékeket, a művelt talajok szén-dioxid kibocsátásánál elvárható mértékben közelíti. A mérések eredményeinek közelítésére használt kibocsátási modell szinuszos tagja, a talaj CO₂ kibocsátásának napi hőmérsékletfüggőségét a hőmérsékletváltozás trigonometrikus jellege alapján veszi figyelembe. A hőmérsékletváltozás ilyen jellegű reprezentálása a kibocsátási modellben a hőmérséklet-CO₂ kibocsátás kapcsolatának lineáris jellegű leírása. A művelést követően emittált CO₂ mennyiségnek meghatározására, ez a módszer, a modell kvantitatív jellege miatt kellő pontosságú eredményt ad, mivel a teljes modell regresszió analízisének alapja, a lépésközönkénti 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 & MONCRIEFF, 2001; LELLEI-KOVÁCS, 2011), a nem művelt talajokra alkalmazott hőmérséklet-CO₂ kibocsátás modellekkel. Ebben az esetben a modell 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, hiszen a közepes időtartamú mérések eredményei 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 összehasonlítottuk az alkalmazott lineáris függvénykapcsolatot (9. egyenlet) és a (LELLEI-KOVÁCS, 2011) által legpontosabb közelítést adónak ítélt O'Connell modellt (10. 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, és matematikailag könnyebben kezelhető.

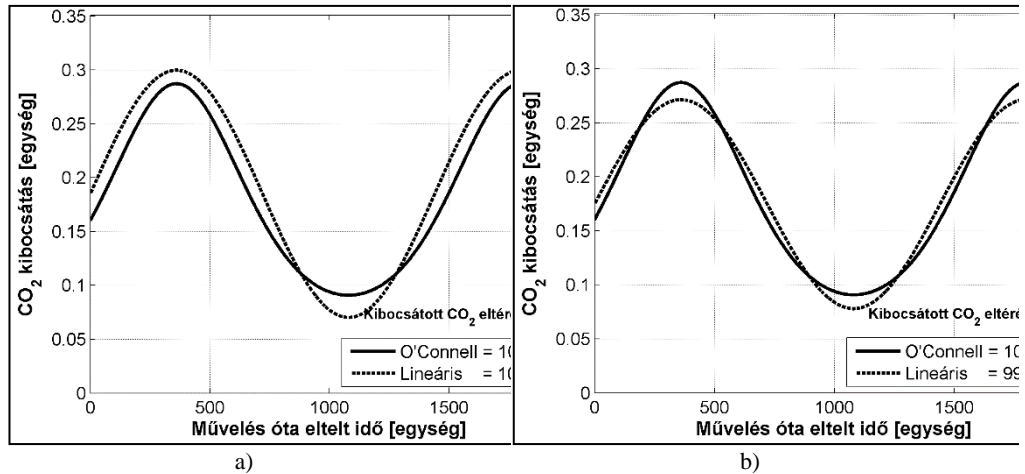
$$Y = a + b * T, \quad (9.)$$

ahol Y a CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2h}$], T a hőmérséklet [°C], a = 0,143 a modell paraméter szántóföldi talajokra [-], b = 0,0164 a modell paraméter szántóföldi talajokra [-] (FANG & MONCRIEFF, 2001).

$$Y = a * e^{(b*T+c*T^2)}, \quad (10.)$$

ahol Y a CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2h}$], T a hőmérséklet [°C], a = 0,03282 a modell paraméter szántóföldi talajokra [-], b = 0,07640 a modell paraméter szántóföldi talajokra [-], c = 1,485*10⁻⁴ modell paraméter [-] (FANG és MONCRIEFF, 2001).

A 10. ábra szemlélteti az O'Connell és a lineáris modell eltérését. Az ábrán látható, hogy a (FANG & MONCRIEFF, 2001) által meghatározott együtthatók használatával a két görbe együttfutása és a numerikus integrálok eltérése sem kielégítő. A lineáris modell azért közelíti viszonylag rosszul az O'Connell modellt, mivel FANG & MONCRIEFF (2001) az általuk használt együtthatókat nem egy (egyenlőre nem létező) univerzális kapcsolati modellre történő illesztéssel, hanem mérési adatok közelítésével határozták meg. Ez indokolja a 9/a. ábrán látható eltérést a megadott együtthatók használata esetén. Amennyiben a lineáris kapcsolati modell együtthatóinak meghatározása, az O'Connell modell értékeinek regresszió analizisével történik, a modell alapján számítható emittált mennyiségben nincs jelentős eltérés, csak a görbék lefutása tér el kismértékben (9/b. ábra).



9. ábra. A lineáris és az O'Connell kibocsátási modellek jellegének ábrázolása és a modellek által leírt kibocsátás emittált mennyiségének eltérése. a) FANG & MONCRIEFF (2001) által meghatározott együtthatók használatával; b) A lineáris modell illesztésével meghatározott együtthatókkal

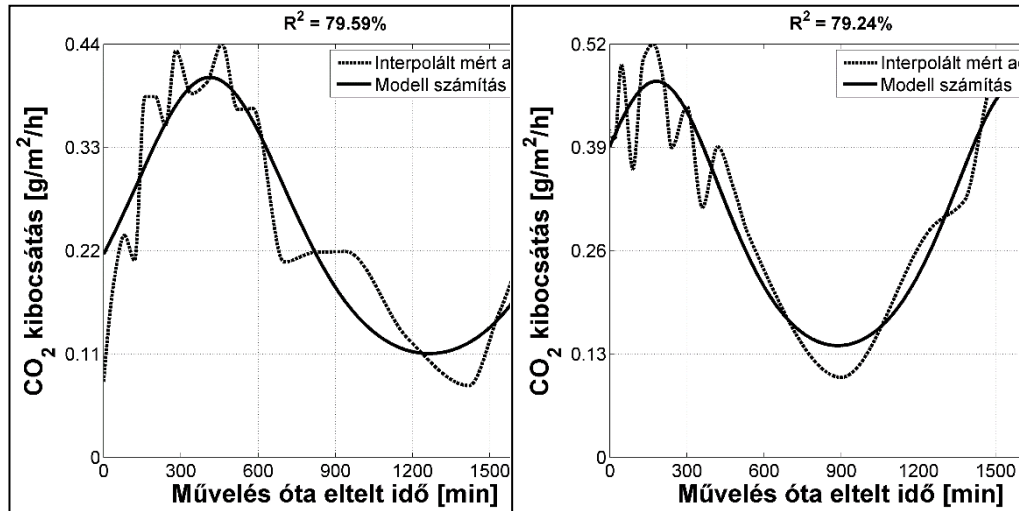
Ez alapján, a felállított gyakorlatias modellben alkalmazott lineáris kapcsolat a hőmérsékletfüggvény és a kibocsátási függvény között nem jelent jelentős elhanyagolást vagy pontatlanságot, hiszen a modell együtthatói a mért pontok közelítésével adódnak. A művelt parcellák esetében, a bemutatott eltérés az enzimkinetikai hatás dominanciája miatt tovább veszít jelentőségéből, hiszen 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 nem művelt, referencia terület esetében a kibocsátást szinte kizárólag az enzimek reakció sebességének hőmérsékletfüggősége határozza meg. Ez miatt 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 helyettesíthető be a (3.) egyenlet szerinti napi hőmérséklet változás függvény. Így a következő modell illeszkedését vizsgáltuk a közepes időtartamú mérések mért adataira:

$$W_r = a * e^{(b*[k+l*\sin(c_1*t)]+c*[k+l*\sin(c_1*t)]^2)}, \quad (11.)$$

ahol W_r a CO₂ kibocsátás [$\frac{g}{m^2h}$], $a = 0,03282$ modell paraméter [-](FANG & MONCRIEFF, 2001), $b = 0,07640$ modell paraméter [-](FANG & MONCRIEFF, 2001), $c = 1,485*10^{-4}$ modell paraméter [-](FANG & MONCRIEFF, 2001), k a középhőmérséklet együttható [-], l a hőmérséklet amplitúdó együttható [-], c_1 a kibocsátás periódusideje [-] és t az idő [min]. A modell illesztésének eredményeit a 10. és 11. ábrákon mutatjuk be.

Az ábrák alapján, láthatóan az O'Connell modellel kiegészített kibocsátási modell jobb illeszkedést biztosít, mivel az 1. mérés esetében a determinációs együttható értéke magasabb, de a 2. mérés esetében, ezzel ellentétes eredményt látható, vagyis a determinációs együttható értéke, bár jóval kisebb mértékben, de csökkent. Ugyanakkor 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. táblázat). A referenciaterületek 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 kapcsolatot leíró modellek használata.



10. ábra. A kibocsátási modell O’Connell modellel kiegészített szinuszos tagjának illeszkedése a nem művelt terület interpolált mért adataira (1. mérés)

11. ábra. A kibocsátási modell O’Connell modellel kiegészített szinuszos tagjának illeszkedése a nem művelt terület interpolált mért adataira (2. mérés)

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

	(1) Nem művelt terület (1. mérés)	(2) Nem művelt terület (2. mérés)
(a) Determinációs együttható (R ²) [%]	79,59	79,24
(b) Az interpolált mért adatok alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége [g/m ²]	6,876	8,074
(c) A lineáris kapcsolati modell alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége [g/m ²]	6,875	8,074
(d) A O’Connell kapcsolati modell alapján kibocsátott CO ₂ mennyisége [g/m ²]	6,859	8,096
(e) Az O’Connell és a lineáris modellel számolt CO ₂ mennyiségek eltérése [%]	99,76	100,2

Következtetések

A bemutatott kutatás eredményei alapján kidolgozásra került egy talaj szén-dioxid kibocsátási modell, amely a talajművelés felületi emisszió intenzitásának változásait a biokémiai folyamatok két törvényszerűsége alapján veszi figyelembe. Egyrészt, a művelés által a talajba kevert levegő katalizáló hatása miatt, az elsőrendű reakciókinetikai törvényeknek megfelelően, másrészt a biokémiai folyamatok hőmérséklet függősége alapján, a talaj hőmérsékletváltozás jellege és a talajhőmérséklet-szén-dioxid kibocsátás kapcsolata szerint veszi figyelembe. Bizonyítást nyert, hogy a művelés utáni szén-dioxid kibocsátás egy

exponenciálisan csökkenő amplitúdójú, szinuszos periodicitással változó függvénnyel leírható, amelynek felső burkológörbéje exponenciális függvény, míg alsó burkolója a műveletlen terület kibocsátásának minimumértéke alapján konstans függvény. Általános esetben a modell alsó és felső burkológörbéje is szinuszos periodicitású exponenciálisan csökkenő függvény.

A kidolgozott algoritmus alkalmazásával a különböző művelések utáni szén-dioxid kibocsátási modell illeszthető, együtthatói, ezzel együtt a különböző talajművelő gépek emissziós hatása, meghatározható. Ez alapján új, alacsony kibocsátású eljárások és gépek fejleszthetők ki, amelyek hatása mérhetővé, alkalmazásuk támogathatóvá válik. A különböző talajművelő gépek és eljárások vizsgálatának első lépése a szántóföldi mérés végrehajtása a művelt és művelés nélküli területen, második lépése a műveletlen területre vonatkozó modelltag illesztése, harmadik lépése a teljes kibocsátási modell illesztése a modell együtthatóinak meghatározásához.

A művelt talajokra alkalmazható kibocsátási modell $T \rightarrow \infty$ esetén, a bolygatatlan talajra vonatkozóan szinuszos összefüggést mutat. A művelés katalizáló hatásának lecsengése utáni időszakra, a kibocsátás jellegének pontosabb leírása érdekében célszerűbb a szinuszos modelltag kiegészítése egy talajhőmérséklet-CO₂ kibocsátást pontosabban leíró kapcsolati modelltaggal, de a művelt területek jellemzésére, a lineáris modell is megfelelő közelítést ad.

A megfogalmazott kibocsátási modell alkalmazhatóságának korlátja a környezeti paraméterek hirtelen megváltozásának hatása. Ezért további kutatásoknak kell kitérniük a hirtelen hőmérséklet, légnyomás, szélsébség és csapadékváltozásokra is, mivel ezek közvetlen hatására csak részeredmények léteznek, amelyek alapján nem kaphatunk kellő képet ezen külső tényezők által, a talaj szén-dioxid kibocsátására gyakorolt hatásról. A modell korlátlan alkalmazhatóságához, ezen jelenségek hatásainak vizsgálata is szükséges.

Összefoglalás

A Föld légkörének CO₂ koncentrációja az ipari forradalom óta folyamatosan növekszik. Az 1850-es években a CO₂ koncentráció hozzávetőlegesen 280 ppm volt, míg a mérések 1958-as kezdetekor már 316 ppm. Ez az érték napjainkban több mérőállomás adatai szerint is átlépte a 400 ppm-es határértéket. A légkör szén-dioxid tartalmának növekedése jelentősen befolyásolja az üvegházhatás kialakulását és a klíma változását. A növekvő légköri szén-dioxid koncentráció ugyanis csökkenti a Földre érkező napenergia visszasugárzásának mértékét.

A teljes CO₂ kibocsátás jelentős részéért, az ipar mellett, az intenzív mezőgazdasági tevékenységek is felelőssé tehetők. Több kutatás is rámutatott, hogy a különböző művelési eljárások között jelentős eltérések tapasztalhatók a talajművelés utáni CO₂ kibocsátásban. A talaj CO₂ kibocsátását vizsgáló kutatási módszerek eltérései, főként a mérőcella méretének és kialakításának különbözőségében figyelhetők meg. Az ismert mérési eljárások közös jellemzője, hogy a közép-, és hosszú időtartamú kibocsátás meghatározása nagyon időigényes. A talaj CO₂ emissziójának meghatározásához szükség lenne egy olyan módszerre, amelynek segítségével rövid időtartamú mérések alapján nagy pontossággal megbecsülhető a kibocsátás intenzitásának lefolyása és meghatározható a kibocsátott szén-dioxid mennyisége. Ezért kutatásunk során rövid és közepes időtartamú méréseket végeztünk, annak érdekében, hogy a CO₂ kibocsátás lefolyásának modellezésével megvalósítható legyen a kibocsátás mértékének rövidtávú mérések alapján történő meghatározása és pontos számszerűsítése.

Ezen irányelvek alapján, kutatásunk célja a különböző talajművelési eljárások, a talaj CO₂ kibocsátásra gyakorolt hatásának vizsgálata, valamint a hagyományos és a csökkentett művelési eljárások hatásmechanizmusának elemzése volt.

Kulcsszavak: talajlégzés, CO₂ kibocsátás, talajművelés, kibocsátási modell, regresszió analízis

Irodalom

- ANDERSON, J.P.E., 1982. Soil respiration. In: PAGE, A.L., MILLER, R.H., KEENEY, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis Part 2., Chemical and Microbiological Properties*, Madison, Wisconsin, USA. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, 831–871.
- ARRHENIUS, S., 1889. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 4. 226–248.
- COLE, V., 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: *Climate Change 1995*. Cambridge Univ. Press. New York. 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. 184–187.
- DAVIDSON, E.A., TRUMBORE, S.E., 1995. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. *Tellus B*. 47. 550–565.
- 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. 21–32.
- FANG, C., MONCRIEFF, J.B. 1999. A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*. 95. 225–236.
- FANG, C., MONCRIEFF, J.B., 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*. 33. 155–165.
- FARKAS CS., 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*, Dordrecht: Springer Netherlands, 65–90.
- FRITSCH, F.N., CARLSON, R.E., 1980. Monotone Piecewise Cubic Interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 17. 238–246.
- GONZÁLEZ-SÁNCHEZ E.J., ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ R., CARBONELL-BOJOLLO R., VEROZ-GONZÁLEZ O., GIL-RIBES J.A., 2012: Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, 122. 52–60.
- 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. 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. 219–236.
- 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.
- KASSAM A., FRIEDRICH T., DERPSCH R., LAHMAR R., MRABET R., BASCH G., GONZÁLEZ-SÁNCHEZ E.J., SERRAJ R. (2012): Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 132. 7–17.

- LAL, R., KIMBLE, J., FOLLETT, R., STEWARD, B.A. (Eds.), 1998a. Soil processes and the C cycle. Boca Raton, FL. CRC Press.
- LAL, R., KIMBLE, J., FOLLETT, R., STEWARD, B.A., (Eds) 1998b. Management of Carbon sequestration in soil. Boca Raton, FL. CRC Press.
- 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. 222–225.
- LASCALA, J.R.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. 650–657.
- LELLEI-KOVÁCS E., 2011. Talajlégzés vizsgálata a kiskunsági homoki erdőssztyepp ökoszisztémában, Doktori (PhD) értekezés, Vácrátót. ELTE Természettudományi Kar, Biológiai Intézet, Biológia Doktori Iskola.
- LLOYD, J., TAYLOR, J.A., 1994. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*. 8. 315–323.
- MEYER, W.S., REICOSKY, D.C., SHELL, G.S., 1987. Technical Report No. 5. Centre for Irrigation and Freshwater Research. Griffith, Australia.
- NYESTE L., 1988. Biológiai rendszerek kinetikája. In: *Biomérnöki műveletek és alapfolyamatok*. Tankönyvkiadó. Budapest.
- PACALA, S., 2004. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*. 305. 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.
- PARKIN, T.B., 1996. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W., FRANCO-VIZCAÍNO, E. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. 231–245.
- PARKIN, T.B., VENTEREA, R.T., 2010. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. *Sampling Protocols*. USDA-ARS, Fort Collins, CO. 1–39.
- RÁDICS J.P., JÓRI J.I. (2011): Sampling method development for measuring tillage induced CO₂ flux. *Hungarian Agricultural Engineering*, 23. 109–112.
- REICOSKY, D.C., 1990. Canopy gas exchange in the field: Closed chambers. *Remote Sensing Reviews*. 5. 163–177.
- REICOSKY, D.C., ARCHER, D.W., 2007. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*. 94. 109–121.
- SINGH, J.S., GUPTA, S.R., 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*. 43. 449–528.
- 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. 67–79.
- STEFANOVITS P., FILEP G., FÜLEKY G. (Szerk.), 1999. *Talajtan*. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- 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*, Dordrecht: Springer Netherlands, 157–197.
- VÖLGYESI L., 1982. A föld hőjelenségei. In: *Geofizika* [online], Tankönyvkiadó. Budapest. URL: <http://sci.fgt.bme.hu/volgyesi/geofiz/geofiz.htm>.
- Widén B., Lindroth A. 2003. A calibration system for soil carbon dioxide-efflux measurement chambers. *Soil Science Society of America Journal*, 67. 327–334.
- ZSEMBELI, J., TUBA, G., JUHÁSZ, C., NAGY, I., 2005. CO₂-measurements in a soil tillage experiment. *Cereal Research Communications*. 33. 137–140.

Effect of tillage machines and processes on soil CO₂ emission

¹RÁDICS, J.P., ¹JÓRI, J.I., ²FENYVESI, L.

¹*BME, Dep. of Machine and Product Design, radics.janos@gt3.bme.hu*

²*NARIC Institute of Agricultural Engineering*

Summary

Since the industrial revolution of 1850, concentration of carbon dioxide in the atmosphere is constantly rising. Nowadays the initially measured 316 ppm reached the 400 ppm limit. Long term effects of this change cannot be forecasted exactly with our current knowledge, only questionable climate projections can be made. This increase come from the effects of the increased energy production, industrial activity, intensive agriculture and forestry. Tillage has prominent role in the climate change mitigation and reversal. 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.

Two research aims were initially made under this work. First, to measure the initial and altered emission of soils after tillage by different tillage machines. Secondly, to 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. 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.

As the result of this research, 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.

Keywords: soil respiration, CO₂ flux, tillage, emission model, regression analysis

Table 1. Conditions of mid-term measurements. (1) Measurement No.; (2) Tillage type/date; (3) Area; (4) Weather and soil conditions; (5) Tillage machine; (6) Tillage depth [cm]

Table 2. Fit of the emission model to the measured data and the amount of CO₂ emitted during the measurement. (1) Determination coefficient; (2) Emitted CO₂ obtained from measured data; (3) Emitted CO₂ obtained from model data; (4) Difference of emitted CO₂ to the reference plot; (a) 1. study; (b) Untilled (reference); (c) Moldbord plowing; (d) Disking; (e) 2. study; (f) Untilled (reference); (g) Moldbord plowing; (h) Field cultivating

Table 3. Co-efficients of the emission model. (a) 1. study; (b) Moldbord plowing; (c) Disking; (d) 2. study; (e) Moldboard plowing; (f) Field cultivating

Table 4. Fitting characteristics of trigonometrical part of emission model with different integrated temperature-soil respiration relations to measured data of untitled plot and quantity of emitted CO₂. (1) Untitled plot (1. study); (2) Untitled plot (2. study); (a)

Determination co-efficient; (b) Emitted CO₂ quantity obtained from interpolated measurement data; (c) Emitted CO₂ quantity obtained from model data using linear model; (d) Emitted CO₂ quantity obtained from model data using O'Connell model; (e) Difference of emitted CO₂ quantity of the O'Connell and the linear model.

- Figure 1.* Truncated cone and prismatic shaped incubation chambers on the measure area
- Figure 2.* Graphical representation of eq. (4). Horizontal axis: Time after tillage. Vertical axis: CO₂ emission
- Figure 3.* Graphical representation of eq. (5). Horizontal axis: Time after tillage. Vertical axis: CO₂ emission
- Figure 4.* Polynomial representation of measured CO₂ emission and temperature data. a.) 1. study (plowing, disking, reference, soil temperature, air temperature), b.) 2. study (reference, plowing, cultivating, air temperature, soil temperature). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 5.* Emission model fitted to measured data of the plowed plot of the 1. study. (measured data, interpolated measured data, model calculation, exponential envelope curve). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 6.* Emission model fitted to measured data of the disked plot of the 1. study. (measured data, interpolated measured data, model calculation, exponential envelope curve). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 7.* Emission model fitted to measured data of the plowed plot of the 2. study. (measured data, interpolated measured data, model calculation, exponential envelope curve). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 8.* Emission model fitted to measured data of the cultivated plot of the 2. study. (measured data, interpolated measured data, model calculation, exponential envelope curve). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 9.* Character representation of linear and O'Connell emission models and the quantity difference of emitted CO₂. a) Using co-efficients of Fang and Moncrieff (2001), b) Using co-efficients obtained from regression analysis. Horizontal axis: Time after tillage. Vertical axis: CO₂ emission
- Figure 10.* Fitting of trigonometrical part of emission model with integrated O'Connell relation to measured data of untilled plot. (1. study). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]
- Figure 11.* Fitting of trigonometrical part of emission model with integrated O'Connell relation to measured data of untilled plot. (2. study). Horizontal axis: Time after tillage [min]. Vertical axis: CO₂ emission [g/m²/h]