



ACTA AGRONOMICA ÓVÁRIENSIS



VOLUME 56.

NUMBER 1.

**Mosonmagyaróvár
2014**

UNIVERSITY OF WEST HUNGARY
Faculty of Agricultural and Food Sciences
Mosonmagyaróvár
Hungary

NYUGAT-MAGYARORSZÁGI EGYETEM
Mosonmagyaróvári
Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar
Közleményei

Volume 56. Number 1.

**Mosonmagyaróvár
2014**

Editorial Board/Szerkesztőbizottság

Benedek Pál DSc
Hegy Judit PhD
Kovács Attila József PhD
Kovácsné Gaál Katalin CSc
Kuroli Géza DSc
Manninger Sándor CSc
Nagy Frigyes PhD
Neményi Miklós CMHAS
Pinke Gyula PhD
Porpáczy Aladár DSc
Reisinger Péter CSc
Salamon Lajos CSc
Schmidt János MHAS
Schmidt Rezső CSc
Tóth Tamás PhD
Varga László PhD
Varga-Haszonits Zoltán DSc
Varga Zoltán PhD *Editor-in-chief*

Address of editorial office/A szerkesztőség címe
H-9201 Mosonmagyaróvár, Vár 2.

Publisher/Kiadja
University of West Hungary Press/Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó
9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky u. 4.



Szemle

A meteorológiai tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolat modellezésének módszertani alapjai

VARGA-HASZONITS ZOLTÁN – VARGA ZOLTÁN

Nyugat-magyarországi Egyetem
Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar
Matematika, Fizika és Informatikai Intézet
Agrometeorológiai Intézeti Tanszék
Mosonmagyaróvár

ÖSSZEFOGLALÁS

A mezőgazdasági termelőknek ismerniük kell azt, hogy az általuk termesztett növények fejlődését milyen meteorológiai tényezők befolyásolják és azok milyen mértékű változást képesek előidézni a fejlődésben. Az összefüggések feltárásához olyan módszereket kell kidolgozni, amelyekkel az adott területre vonatkozóan a növényfenológiai jelenségek bekövetkezését gyakorlati szempontból kielégítő pontossággal meg lehet határozni. A meteorológiai tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolat modellezésének általában három alapvető formáját szokták megkülönböztetni. Nevezetesen a hőmérsékleti összeg alapján történő növényfejlődés-számítást, az átlagos fejlődési ütem számítási módszerét empirikus formulák segítségével és a fejlődési ütem becslését a hőmérséklet, a nappalhosszúság és a vernalizáció figyelembevételével. A cikk ezeket a lehetőségeket tekinti át. **Kulcsszavak:** hőmérséklet, hőmérsékleti összeg, termikus idő, nappalhosszúság, vernalizáció, növényfejlődés, modellezés.

BEVEZETÉS

A növénytermesztőknek ismerniük kell azt, hogy az általuk termesztett növények fejlődését milyen meteorológiai tényezők befolyásolják és azok milyen mértékű változást képesek előidézni. S mivel ugyanazok a meteorológiai viszonyok másként hatnak a növény növekedésére és másként hatnak a növény fejlődésére, szükséges, hogy a növényfejlődésre gyakorolt meteorológiai hatásokat részletesen tanulmányozzuk.

Ezért az egyes országokban külön kultúrnövény fenológiai megfigyelő hálózatokat létesítettek, amelyek mezőgazdasági vagy meteorológiai intézetek felügyelete alatt működnek.

Az egyes megfigyelőhelyeken az adatgyűjtést azonos útmutatás szerint végzik. Ilyen kultúrnövény fenológiai útmutatót adott ki hazánkban is az Országos Meteorológiai Intézet (Varga-Haszonits és Lexa 1967), amikor megindította a fenológiai hálózat működését.

A korábbi évtizedekben a megfigyelők az egyes növény esetében a kultúrnövény fenológiai útmutatóban feltüntetett fenológiai jelenségek bekövetkezésének dátumait jegyezték fel, s küldték be az Országos Meteorológiai Intézetbe. Az így összegyűjtött növényfenológiai anyag matematikai módszerekkel történő feldolgozása azáltal vált lehetővé, hogy a fenológiai dátumokat számokká alakítottuk oly módon, hogy a dátum helyett az adott nap január 1-től számított sorszámát adtuk meg. Ez lehetővé tette, hogy a meteorológiai tényezők és a növények fejlődése közötti kapcsolatot megvizsgáljuk.

A meteorológiai tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolat vizsgálata már az 1700-as években megkezdődött. Több országban – így hazánkban is – létesítettek növényfenológiai megfigyelő hálózatot, amely rövidebb-hosszabb ideig működött, aztán megszűnt. A meteorológiai és kultúrfenológiai jelenségek párhuzamos megfigyeléseiből összegyűlt adatbázis lehetővé tette a meteorológiai tényezők hatásának elemzését. A vizsgálatok számszerűen is bizonyították, hogy a növények fejlődésében a hőmérséklet kiemelkedő szerepet játszik – nem kismértékben a fotoszintézisre és légzésre gyakorolt közvetlen hatásának köszönhetően (Szalai 1974). Az ilyen vizsgálatokban elsősorban annak van jelentősége, hogy ez a hatás matematikai formában hogyan írható le. A növényfejlődésre gyakorolt hatásban szerepet játszik a nappalhosszúság is. E hatás matematikai formájának meghatározása ugyancsak nem elhanyagolható. Az őszi gabonák esetében figyelembe szokták venni még a vernalizáció jelenségét, amely a fejlődés vegetatív szakaszában fejti ki a hatását. Meg kell említeni, hogy az előbbieket mellett a növények megfelelő fejlődésének a jó vízellátottság is alapvető feltétele, de – megfelelő agrotechnika esetén – ennek biztosítása tűnik a legkevésbé problematikusnak.

Napjainkban a fent említett kölcsönhatásokra vonatkozó vizsgálatok a mezőgazdasági termeléssel foglalkozó országokban széleskörűen folynak. A feladat olyan módszer kidolgozása, amellyel az adott területre vonatkozóan a növényfenológiai jelenségek bekövetkezését gyakorlati szempontból kielégítő pontossággal meg lehet határozni, azaz előre lehet jelezni. A meteorológiai tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolat modellezésének három alapvető formáját megkülönböztetik meg, nevezetesen

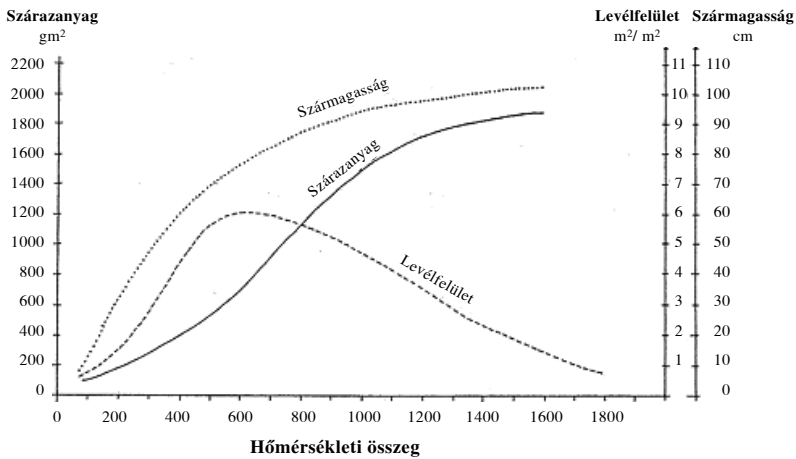
- a hőmérsékleti összeg alapján történő növényfejlődés-számítás (léghőmérsékleti adatokra alapozva);
- az átlagos fejlődési ütem számítása empirikus formulák segítségével és
- a fejlődési ütem számítása a hőmérséklet, a nappalhosszúság és a vernalizáció figyelembevételével.

Szemleciikkünkben ezeket a lehetőségeket tekintjük át.

A HŐMÉRSÉKLETI HATÁS MEGHATÁROZÁSA

A növényfejlődés hőmérsékleti összegén alapuló számítása

A hőmérsékleti összeg fogalmat Réaumur (1735) vezette be. Úgy találta, hogy a léghőmérsékleti összeg alapján pontosabban lehet meghatározni a fenofázisok bekövetkeztét, mint a naptári dátumok alapján. Azóta számos változtatást végeztek az eredeti koncepción, de még napjainkban is – viszonylagos egyszerűsége miatt – ez az egyik gyakran használt módszer.



I. ábra Az őszi búza növekedési folyamatainak változása a termikus idő (5 fok feletti hőmérsékleti összeg) változásával (Varga-Haszonits 2004)

Figure 1. Impact of thermal time (growing degree-days above 5 °C – on axis x) on development (leaf area index, dry matter, stand height – on axis y) of winter wheat

A módszernek többféle elnevezése van. Hőmérsékleti összegnek (sum of temperatures) nevezik, ha a hőmérsékleti értékeket eredeti formájukban alkalmazzák. Az angol nyelvű irodalomban a dimenziója után nevezik még degree-day-nek (foknapnak), mivel a hőmérsékleti foknak és a napok számának a szorzata. Ha a tényleges hőmérsékletnek csak azt a részét veszik figyelembe, amelyik a bázishőmérséklet felett van, akkor effektív hőmérsékleti összegnek nevezik, angolul growing degree-day-nek, mivel – e koncepció szerint – a léghőmérsékletnek csak a bázishőmérséklet feletti része hat a növényre (Saykewich 1995). Az utóbbi évtizedekben a növények növekedésének és fejlődésének időbeli folyamatait gyakran a hőmérsékleti összegek napi halmozódása alapján követik nyomon, ezért Monteith (1981) nyomán az így értelmezett hőmérsékleti összeget termikus időnek nevezik (*I. ábra*). A hőmérsékleti összeget a magyar nyelvben gyakran „hőösszegnek” nevezik, az angol nyelvben pedig „heat unit”-nak, ami fizikai értelemben téves elnevezés, mert nem hőmennyiségeket, hanem hőmérsékleti fokokat összegeznek, amint erre Robertson (1983)

is felhívta a figyelmet. Ő hangsúlyozta továbbá, hogy az angol nyelvben a hőmérsékleti összegre vonatkozó „growing degree day” elnevezés is hibás, mert nem növekedésre ható foknapokról van szó, hanem a fejlődésre (development) ható foknapokról.

A hőmérsékleti összeg meghatározásához a napi középhőmérsékletre van szükség. Azokon a helyeken, ahol naponta több alkalommal mérik a léghőmérsékletet, ott a napi középhőmérsékletet ezen mért értékekből számítják a következő módon:

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (1)$$

ahol t_k a levegő napi középhőmérséklete, a t_1, t_2, \dots, t_n pedig a nap folyamán különböző órákban mért léghőmérséklet (pl. az éghajlati állomásokon 1, 7, 13 és 19 órakor mérnek léghőmérsékletet), az n pedig a nap folyamán végzett mérések száma. Vannak azonban helyek, ahol naponta csak egy alkalommal (a reggeli órákban) történik megfigyelés, akkor is csak a maximum és a minimum hőmérsékletet jegyzik fel. Ebben az esetben a léghőmérsékletet napi középértékét a következő formulával határozzák meg:

$$t_k = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} \quad (2)$$

A formulában a t_{\max} a maximum hőmérsékletet, t_{\min} pedig a minimum hőmérsékletet jelenti. Ez a formula – az előző formulával szemben – csak közelítő értéket ad.

Amikor a hőmérsékleti összeget a hőmérséklet növényekre gyakorolt hatásának vizsgálata céljából számítjuk, akkor az effektív hőmérsékleti értékek (t_{eff}) összegét szoktuk használni, amely a következő formában írható:

$$t_{\text{eff}} = t_k - t_b \quad (3)$$

A t_b az adott növény bázishőmérséklete. Bázishőmérsékleten pedig azt a hőmérsékletet értjük, amelyen a növény növekedése és fejlődése megindul. Ennek pontos értékét nagyon nehéz meghatározni. Mesterséges terekben, szántóföldön végzett kísérletekben és hőmérséklet-növényfejlődés empirikus függvényekkel történő meghatározásokban rendszerint egymástól eltérő értékeket kapunk, ezért többnyire a bázishőmérsékletet intervallum formájában szokták megadni. Az 1. táblázat a Varga-Haszonits (1987) által irodalmi forrásokból összegyűjtött bázishőmérséklet-intervallumokat tartalmazza. Az effektív hőmérsékleti összeg számításánál azonban csak egyetlen értéket használhatunk, s ezzel valójában egy közelítő értéket alkalmazunk a számítások során.

1. táblázat Néhány fontosabb gazdasági növényfaj bázishőmérséklete (°C)

Table 1. Base temperature (°C) of some important crops

(1) winter wheat, (2) winter barley, (3) rye, (4) oats, (5) peas, (6) lentils, (7) radishes, (8) lettuce, (9) common sorrel, (10) red clover, (11) poppies, (12) flax, (13) alfalfa, (14) spinach, (15) onions, (16) carrots, (17) broad-bean, (18) sugar beet, (19) fodder beet, (20) hemp, (21) millet, (22) beetroot, (23) bean, (24) sunflower, (25) potato, (26) cauliflower, (27) tobacco, (28) maize, (29) rice, (30) peanuts, (31) soyabean, (32) cucumber, (33) pumpkin, (34) cabbage, (35) kohlrabi, (36) tomato, (37) watermelon, (38) melon, (39) eggplant, (40) red pepper

5 °C alatt			
Őszi búza (1)	1–5	Sóska (9)	2–3
Őszi árpa (2)	1–5	Vörös here (10)	2–3
Rozs (3)	1–5	Mák (11)	3–5
Zab (4)	1–5	Len (12)	3–5
Borsó (5)	1–5	Lucerna (13)	3–6
Lencse (6)	1–5	Spenót (14)	4–5
Retek (7)	2–3	Vöröshagyma (15)	4–5
Fejes saláta (8)	2–3	Sárgarépa (16)	4–6
5 és 10 °C között			
Lóbab (17)	5–9	Cékla (22)	8–10
Cukorrépa (18)	5–8	Bab (23)	8–10
Takarmányrépa (19)	6–8	Napraforgó (24)	8–10
Kender (20)	6–8	Burgonya (25)	8–10
Köles (21)	8–10		
10 és 15 °C között			
Karfiol (26)	10–12	Tök (33)	12–14
Dohány (27)	10–12	Káposzta (34)	12–14
Kukorica (28)	12–14	Karalábé (35)	12–14
Rizs (29)	12–14	Paradicsom (36)	12–16
Földimogyoró (30)	12–14	Görögdinnye (37)	14–16
Szójabab (31)	12–14	Sárgadinnye (38)	14–16
Uborka (32)	12–14		
15 °C felett			
Tojásgyümölcs (39)	15–16	Fűszerpaprika (40)	15–17

A napi középhőmérséklet és a bázishőmérséklet birtokában kiszámíthatjuk az előző formula segítségével a napi effektív hőmérsékletet. Ezen érték napi összegezésével megkapjuk az adott fejlődési fázisra, vagy az egész tenyészidőszakra vonatkozó effektív hőmérsékleti összeget:

$$\sum_1^n t_{\text{eff}} = t_{\text{eff}_1} + t_{\text{eff}_2} + \dots + t_{\text{eff}_n} \quad (4)$$

Ha egyaránt rendelkezésünkre állnak a napi középhőmérséklet és a bázishőmérséklet adatai, akkor a (3) egyenlet segítségével meghatározhatjuk a napi effektív hőmérsékletet, a (4) egyenlet segítségével pedig egy meghatározott időszakra (pl. fenofázisra) vonatkozó effektív hőmérsékleti összeget.

Ha ismerjük azt az effektív hőmérsékleti összeget, amely egy fenofázis vagy a vegetációs periódus befejezéséhez szükséges, akkor a hőmérsékleti összeg folyamatos felhalmozásával nyomon követhetjük a növény fejlődését. Ha ugyanis feltételezzük, hogy a növénynek az egyik fenofázisból a másikba való átmenethez egy meghatározott hőmérsékleti összegre van szüksége, akkor a növény egy nap alatt a napi effektív hőmérsékletnek a hőmérsékleti összeghez viszonyított arányában fejlődik, s ez lehetővé teszi a fejlődési ütem (DVR = developmental rate) számítását:

$$DVR = \frac{t_k}{\left(\sum t_{\text{eff}}\right)_{\text{POT}}} \quad (5)$$

ahol $(\sum t_{\text{eff}})_{\text{POT}}$ az a potenciális effektív hőmérsékleti összeg, amely szükséges ahhoz, hogy a növény az egyik fejlődési fázisból a másikba eljusson. Ha ez az összeg minden évben ugyanannyi lenne, akkor az (5) egyenlettel pontosan meghatározhatnánk, hogy a növény egy nap alatt mennyit fejlődik. Minthogy azonban a növény fejlődése a meteorológiai tényezők közül a léghőmérsékleten kívül más időjárási elemektől is függ (amelyek évről-évre ingadoznak), ez az összeg nem állandó. Ezért a $(\sum t_{\text{eff}})_{\text{POT}}$ értékét különféle módon határozhatjuk meg. Megadható sokévi tapasztalat alapján, vagy számítható az átlagos vetési időpont és az átlagos érési időpont közötti hőmérsékleti összegként (Williams *et al* 1989). A különböző módon számított hőmérsékleti összegek közül célszerű azt az értéket választani, amelyeknek a legkisebb a variációs koefficiense (Saykewich 1995).

A növény fejlettségi állapotát (DVS=developmental stage) a napi fejlődési ütemek összegezésével, illetve az (5) összefüggést figyelembe véve a számlálóban lévő napi effektív léghőmérsékleti értékek összegezésével határozhatjuk meg az alábbiak szerint:

$$DVS = \frac{\sum_1^n t_k}{\left(\sum t_{\text{eff}}\right)_{\text{POT}}} \quad (6)$$

s amikor a számlálóban lévő hőmérsékleti összeg eléri a $(\sum t_{\text{eff}})_{\text{POT}}$ értékét, azaz a DVS = 1 lesz, akkor a számítások szerint befejeződik az adott fenofázis.

A hőmérsékleti összeg számítása egyszerű. A fenti módszer alkalmazásakor azonban néhány problémát szem előtt kell tartani. Közülük néhány fontosabbat megemlítünk.

A növényfejlődést nem az egyedüli hatótényezőként figyelembe vett léghőmérséklet, hanem a növényhőmérséklet befolyásolja. A léghőmérséklet és a növényhőmérséklet közötti különbséget pedig alapvetően a sugárzás és a nedvességellátottság befolyásolja (Saykewich 1995). Erős besugárzás esetén, amikor a szél gyenge (vagy szélcsend van) és a párologtatás is gyenge, akkor a növényhőmérséklet magasabb a léghőmérsékletnél (Gorisina 1979). Ekkor a különbség meghaladhatja a 10 fokot is. Az intenzíven párologtató növények esetében pedig, amikor az erős párologtatásra fordítódik a hó jelentős része, a növényhőmérséklet több fokkal is alacsonyabb lehet a léghőmérsékletnél.

Mint arra már utaltunk, a bázishőmérsékletet, vagyis azt a hőmérsékletet, amely felett a növény fejlődésnek indul, csak közelítőleg tudjuk meghatározni. A különböző módszerekkel történő meghatározásánál többnyire különböző eredményekhez jutunk. Az

egy-egy módszerrel meghatározott értékek eltérhetnek a tényleges küszöbértékektől is (Robertson 1983). Ezenkívül minden fenofázisban más az a minimum hőmérsékleti érték, amelynél magasabb hőmérsékleti értékeket igényel a növény (Goudriaan és van Laar 1994). Azonban ahol többéves fenológiai adatsorok állnak rendelkezésre, ott lehetőség van a bázishőmérséklet meghatározására oly módon, hogy több bázishőmérséklet figyelembevételével kiszámítják a vizsgált időszakokra vonatkozó hőmérsékleti összeget, s azt a bázishőmérsékletet fogadják el alsó küszöbhőmérsékletnek, amelynél a hőmérsékleti összeg variációs koefficiense a legkisebb (Saykewich 1995).

A hőmérsékletnek a növényfejlődésre gyakorolt hatása nem lineáris, vagyis a hőmérséklet emelkedése vagy süllyedése a növényfejlődésben nem azonos nagyságú fejlődésiütem-növekedést vagy -csökkenést idéz elő. A hőmérsékleti összeg használata pedig lineáris hatást feltételez, mivel

$$n \cdot t_k = \sum t \quad (7)$$

Az átlagos fejlődési ütem meghatározása empirikus függvénnyel

A fenológiai adatok az egymás utáni fenofázisok bekövetkezési időpontjait jelölik. Napi fenológiai adatok általában nincsenek, így a növényfejlődés ütemét csak becsülni lehet oly módon, hogy ha a növény fejlődése az egyik fenofázistól a másikig n napig tart, akkor az egy napra eső átlagos fejlődési ütem $1/n$. Nyilvánvaló, hogy ha az így számított egy napra eső fejlődési ütemértékeket összegezzük, akkor a következő fázis bekövetkezése arra a napra esik, amelyen az összegük eléri az 1 értéket. Ugyanis

$$\left(\frac{1}{n}\right)_1 + \left(\frac{1}{n}\right)_2 + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)_n = n \cdot \frac{1}{n} = 1 \quad (8)$$

Mint említettük, a növény fejlődési üteme a környezeti tényezőktől függ, elsősorban a meteorológiai tényezőktől, s azok közül is döntően a hőmérséklettől. Ha tehát számítani akarjuk a növények fejlődési ütemét, akkor mindenekelőtt numerikus formában meg kell határoznunk a fejlődési ütem és a meteorológiai elemek közötti kapcsolatot. Általában a következő formájú empirikus függvényt:

$$\frac{1}{n} = f(m_1, m_2, \dots, m_k) \quad (9)$$

ahol az m_1, m_2, \dots, m_k az egyes meteorológiai elemek valamilyen formájú (pl. átlag, összeg stb.) értékei.

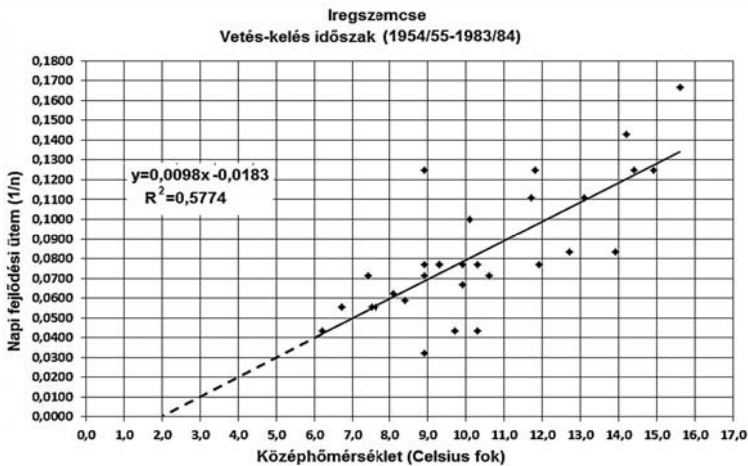
A napi középhőmérséklet hatásának meghatározása

Egyszerű megoldásnak tűnik a léghőmérséklet és a növényfejlődés között olyan lineáris összefüggést keresni, amely a következő függvénnyel írható le:

$$DVR = a + b \cdot t \quad (10)$$

ahol DVR a napi fejlődési ütem, t a napi középhőmérséklet, az a és b pedig empirikus konstans. Egy ilyen kapcsolatnak az az előnye, hogy ha ezt az összefüggést egy olyan koor-

dináta rendszerben ábrázoljuk, amelyben a vízszintes tengelyen a hőmérséklet, a függőleges tengelyen pedig a növényfejlődési ütem szerepel, és ott a pontthalmazra illeszkedő egyenest a vízszintes tengelyig meghosszabbítjuk, azaz extrapolálunk, akkor amely értéknél az egyenes metszi a vízszintes tengelyt, az tekinthető bázishőmérsékletnek. Példaként egy ilyen vizsgálati eredményt mutatunk be a 2. ábrán.



2. ábra Az őszi búza bázishőmérsékletének meghatározása empirikus függvényvel. *Forrás: saját számítás*

Figure 2. Empirical function for determining the base temperature of winter wheat (axis x: mean temperature, axis y: daily developmental rate)

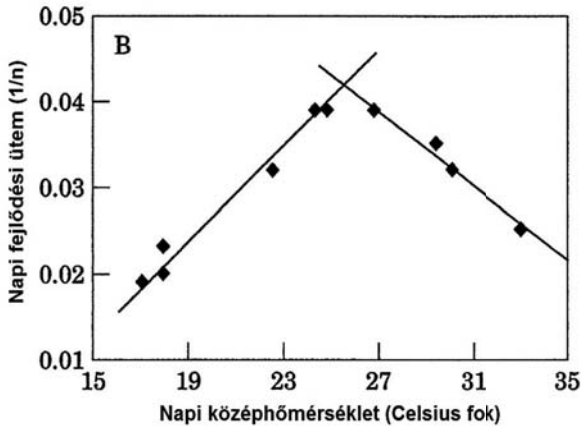
A léghőmérséklet és a növényfejlődés közötti lineáris kapcsolat azonban leginkább csak a bázishőmérséklet és az optimum hőmérséklet közötti intervallumban tapasztalható (Yan és Hunt 1999). Ebben az intervallumban a hőmérséklet emelkedésével a fejlődési ütem gyorsul, az optimum hőmérséklet feletti értékeknél azonban a hőmérséklet emelkedésével a fejlődési ütem lelassul. A bázishőmérséklet becslésére gyakran használják az empirikus módszert (Varga-Haszonits 1967, Goudriaan és van Laar 1994).

Annak felismerése, hogy a növényfejlődés üteme a bázishőmérséklet és az optimum hőmérséklet közötti értékeknél a hőmérséklet növekedésével gyorsul, majd az optimumnál magasabb értékek esetén lassul, vezetett a bilineáris módszer kidolgozásához és alkalmazásához. Ennek a módszernek az a lényege, hogy a növényfejlődést a bázishőmérséklet és az optimum hőmérséklet, valamint az optimum hőmérséklet és a felső küszöb hőmérséklet között két különböző lineáris összefüggéssel írják le:

$$DVR = a_1 + b_1 \cdot t \dots \dots \dots t < t_{OPT}$$

$$DVR = a_2 + b_2 \cdot t \dots \dots \dots t < t_{OPT}$$

ahol az a_1 , a_2 , b_1 és b_2 az empirikus függvények paraméterei. A bilineáris módszert grafikus formában a 3. ábra mutatja be.

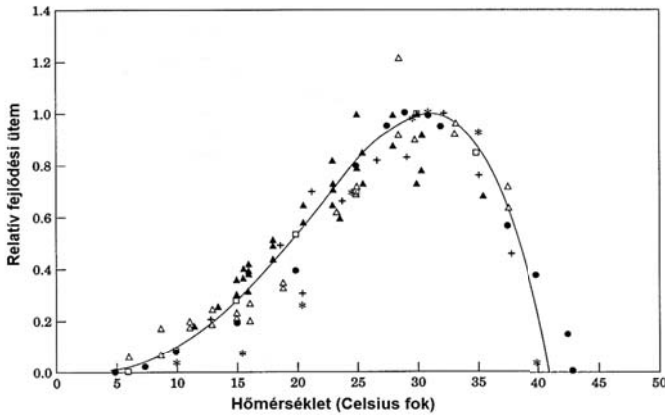


3. ábra A cirok fejlődési üteme és a hőmérséklet közötti kapcsolat meghatározása bilineáris modellel (Yan és Hunt 1999)

Figure 3. Bilinear model for determining the relationship between temperature (axis x) and daily developmental rate of sorghum (axis y)

Ha a 3. ábrára tekintünk, akkor láthatjuk, hogy a fekete négyzetekkel jelzett tényleges mérési adatok inkább haranggörbe vonalú összefüggésre utalnak. Ilyen összefüggésre vonatkozóan számos kutató kereste a megoldást, eleinte másod- majd harmadfokú polinomok alkalmazásával (Yin *et al.* 1995), sőt Charles-Edwards *et al.* (1986) negyedfokú polinom alkalmazásával is próbálkozott.

Yan és Hunt (1999) hat különböző kukoricavizsgálat adatait ábrázolta egy koordináta rendszerben, ahol a hőmérséklet volt a vízszintes tengelyen és a relatív fejlődési ütem a függőleges tengelyen. Ezek az adatok láthatók a 4. ábrán, ahol a hat vizsgálat adatai különböző jelekkel vannak feltüntetve. Látható, hogy a mért relatív fejlődési adatok a fejlődés megindulása után a hőmérséklet emelkedésével egy ideig exponenciálisan növekszenek, majd a kezdeti fejlődés után közel lineárisan növekszenek az optimum hőmérsékletig, ahol elérik a maximumukat. Az optimális hőmérséklet utáni további hőmérsékletemelkedés a fejlődési ütem meredek csökkenését vonja maga után.



4. ábra A hőmérséklet és kukorica fejlődési üteme közötti kapcsolat (Yan és Hunt 1999)

Figure 4. The relationship between temperature (axis x) and relative rate of development in maize (axis y)

A léghőmérséklet és a kukorica megfigyelt fejlődése közötti kapcsolat függvénnyel történő leírására a béta függvény alkalmazható, amint azt a 4. ábrán látható folytonos vonal mutatja. A béta függvény olyan sűrűségfüggvény, amelyet az x független változó egycsúszú eloszlása jellemez a 0 és 1 közötti függvénytartományban. Az $x < 0$ vagy $x > 1$ esetén a sűrűségfüggvény értéke 0, a maximum értéke pedig a 0 és 1 közötti tartományban az optimális x értéknél van (Yan és Hunt 1999). Ha az x változó helyébe a növény bázishőmérséklete, vagyis az alsó küszöbhőmérséklete (t_{\min}) és a felső küszöbhőmérséklete (t_{\max}) közötti hőmérsékleti adatokat (t) helyettesítjük, akkor ez a függvény alkalmas a növényfejlődésre gyakorolt hőmérsékleti hatás leírására a következő formában (Yin *et al.* 1995):

$$DVR = DVR_{\max}^C \cdot \left[\left(\frac{t - t_{\min}}{t_{\text{opt}} - t_{\min}} \right) \cdot \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_{\text{opt}}} \right)^{\frac{t_{\max} - t_{\text{opt}}}{t_{\text{opt}} - t_{\min}}} \right] \quad (11)$$

A (11) egyenlet által leírt görbe jól illeszkedik a tapasztalati adatokhoz, ha öt paramétert használunk: a három kardinális hőmérsékletet (t_{\min} , t_{opt} , t_{\max}), a DVR_{\max} maximális fejlődési ütemet és a C paramétert, amely a görbe alakját határozza meg. Az ötből négy paraméter biológiailag értelmezhető, csak a görbe alakját megadó C paraméter a kivétel.

A VERNALIZÁCIÓ HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Vannak olyan növények, amelyek a tenyészidőszakuk folyamán, a vegetatív szakaszban alacsony hőmérsékletet igényelnek a generatív szakaszba való átmenethez. Nem szükséges,

hogy az alacsony hőmérséklet egyetlen időszak alatt folyamatosan hasson, előfordulhat, hogy egy alacsony hőmérsékletű időszak után magasabb a hőmérséklet, majd ismét egy vagy több alacsony hőmérsékletű időszak következik. Ez nem befolyásolja a növény fejlődésére gyakorolt hatást. Alacsony hőmérséklet ugyanis a vegetatív szakaszban több időszakban is előfordulhat, a hideghatás ugyanis összegeződik. Az alacsony hőmérséklet virágzást befolyásoló hatását vernalizációnak nevezzük (Pethő 1993).

A hideghatást igénylő növényfajok többségénél a vernalizáció számára optimális hőmérsékleti tartomány – Wareing és Phillips (1982) szerint – a -1 és +9 fok közötti értékköz, főként a +1 és +2 fok közötti hőmérséklet. Weir *et al* (1984) viszont azt tapasztalta, hogy a +3 és +10 fok közötti hőmérséklet a legkedvezőbb. Az e tartomány alatti -4 és +3 fok közötti értékek, valamint az e tartomány feletti +10 és +17 fok közötti hőmérséklet a vernalizáció szempontjából kevésbé hatékony (Butterfield és Morison 1992). A hideghatást igénylő növények különböző típusai számára eltérő intenzitású és hosszúságú hideg időszakok szükségesek (Mirschel *et al* 2005).

A vernalizáció napi hatékonyságát, azaz a vernalizációs hatékonysági faktort (VF) a napi középhőmérséklet (t_k) alapján határozzuk meg:

$$VF = f(t_k) \quad (12)$$

Az $f(t_k)$ függvény értéke 0 és 1 között változik. Ha a vernalizációs hatékonysági faktor napi értékeit összegezzük, akkor a hideghatás tartamát kapjuk meg oly módon, hogy amikor az érték eléri az 1 értéket, azt egy vernalizációs napnak (VD) tekintjük (Streck *et al.* 2003a):

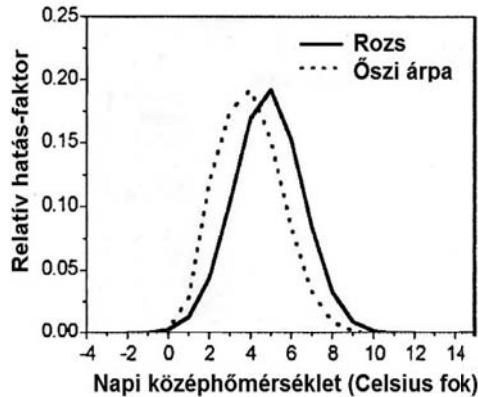
$$VD = \sum_{i=1}^n f(t_k) \quad (13)$$

A VD tehát a kumulatív vernalizációs nap (Liu 2007), amelynek értéke az $f(t_k)$ függvény napi értékeinek összegeződéséből adódik. Az $f(t_k)$ hőmérsékleti hatásfüggvényt különböző formában (pl. lineáris, parabolikus vagy béta függvény) határozhatjuk meg. Az $f(t_k)$ értéke 0, ha a napi középhőmérséklet a vernalizációra ható hőmérsékleti tartományon kívül esik, s 1, ha a napi középhőmérséklet éppen az optimumot jelenti.

A (13) egyenlettel történő összegezést addig folytatjuk, míg a vernalizációs napok (VD) száma el nem éri a teljes vernalizációhoz szükséges értéket (VD_{full}). A vernalizációs napoknak van egy alsó küszöbértéke (VD_b), amelynél kevesebb vernalizációs nap esetén nincs fejlődés. A VD_{full} érték elérése után a vernalizáció befejeződött, vagyis felette már nincs további vernalizáció. Mind a VD_b , mind pedig a VD_{full} érték a növényfajta függvénye. Weir *et al.* (1984) az AFRCWHEAT modell számára olyan vernalizációs hatékonysági faktort határozott meg, ahol -4 és +3 fok között a vernalizációs hatás-faktor értéke növekszik, +3 és +10 fok között optimális értéket mutat, majd +10 foktól +17 fokig fokozatosan csökken. E tartományon kívül a vernalizációs hatásfaktor értéke 0. Ezt a hatást leíró függvényt háromszakaszos lineáris függvénynek (three-stage-linear function) nevezik (Streck *et al.* 2003a).

Az eddig elvégzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy az alacsony hőmérséklet vernalizációra gyakorolt hatása csak egy meglehetősen szűk hőmérsékleti intervallumon belül lineáris. A vernalizációra ható teljes hőmérsékleti intervallumra ez nem érvényes.

Ezért elsősorban nemlineáris jellegű modelleket dolgoztak ki az alacsony hőmérséklet vernalizációra gyakorolt hatásának a meghatározására (Streck *et al.* 2003a).



5. ábra A napi középhőmérséklet és a vernalizációs hatásfaktor közötti összefüggés rozsrá és őszi árpára vonatkozóan (Mirschel *et al.* 2005)

Figure 5. Vernalization rate function (axis y) dependent on daily mean temperature (axis x) for winter rye and winter barley

Az 5. ábrán látható $f(t_k)$ függvényeket Mirschel *et al.* (2005) határozta meg rozsrá és őszi árpára vonatkozóan. Az ábrán látható hőmérsékleti tartományon kívül a függvény értéke 0. Ha a napi középhőmérséklet a függvényhez tartozó intervallumba esik, akkor az adott léghőmérsékletre tartozó relatív hatásfaktor értékét hozzáadjuk a (13) egyenlet szerint addig összegezett vernalizációs értékekhez. Amikor a DV értéke eléri az 1-et, akkor az a hatás tartományban egy vernalizációs napot jelent.

Ritchie *et al.* (1985) által a Ceres-Wheat modellben a vernalizációs hatásfaktor számítására olyan függvényt használt, ahol a vernalizációs hőmérsékleti tartományba a 0 és +15 fok közötti hőmérsékleti értékek tartoznak. Ebben a tartományban a relatív hatásfaktor értéke 0 és +7 fok között fokozatosan növekszik, +7 fok felett pedig eleinte lassan, majd később gyorsabban csökken.

A vernalizációs napok ismeretében meghatározható az $f(V)$ vernalizációs hatásfüggvény:

$$f(V) = f(VD) \quad (14)$$

A vernalizációs hatásfüggvényt is különböző formákban határozták meg. Használtnak lineáris formát (Weir *et al.* 1984, Ritchie *et al.* 1985), általában azonban a függvények nemlineáris jellege a jellemző.

Az AFRCWHEAT modell esetében (Weir *et al.* 1984) a $VD_b = 8$, a $VD_{full} = 33$. Ezért az $f(V)$ függvény meghatározása az alábbi feltételekkel történik: ha $VD_b < 8$, akkor $f(V) = 0$; ha $8 < VD < 33$, akkor $f(V) = (VD - VD_b) / (VD_{full} - VD_b)$; ha $VD > 33$, akkor $f(V) = 1$.

A Ceres-Wheat modell (Ritchie *et al.* 1985) szintén lineáris összefüggést használ az $f(V)$ függvény számítására: $f(V) = 1 - K(50 - VD)$. Ebben az összefüggésben a fajtától függő K koefficiens, a vernalizációhoz szükséges napok száma 50 ($VD_{full} = 50$) minden hideghatást igénylő fajtára vonatkozóan, VD pedig a tényleges vernalizációs napok száma. A K értéket 12 búzafajtára határozták meg, közöttük egy olyan is van, amit korábban hazánkban is termesztettek, ez a Bezosztaja, amely esetén a K értéke 0,031.

Felmerült a gondolat, hogy egy általános jellegű vernalizációs függvényt kellene meghatározni. Ennek az lenne az előnye, hogy ez a növény fajtájától független maradna, s ezért a modell kevesebb bemeneti adatot igényelne, s biológiailag is realisabb lenne (Streck *et al.* 2003a). Ez a modell a vernalizációs napokra ($VD =$ vernalization day) épül. Amikor a növény 8–10 napnál kevesebb ideig van kitéve az alacsony hőmérsékletnek, akkor az nem vernalizálódik. Ha az alacsony hőmérsékletnek való kitétség tovább folytatódik, akkor növekvő ütemben növekszik a VD értéke mintegy 15–20 napig, majd a kitétség további folytatódásával a VD értéke lineáris módon növekszik egészen 35 napig. Ezután a hatás lassan csökken az 50. napig, amikor is a növény már vernalizáltnak tekinthető. Egy ilyen eloszlás szigmoid alakú görbével írható le. A szigmoid alakú görbe többféle függvénnyel is közelíthető. Közülük a rugalmas Morgan-Mercer-Flodin függvényt (MMF) használták, amely így írható fel (Streck *et al.* 2003a):

$$Y = \frac{a \cdot b + c \cdot X^n}{b + X^n} \quad (15)$$

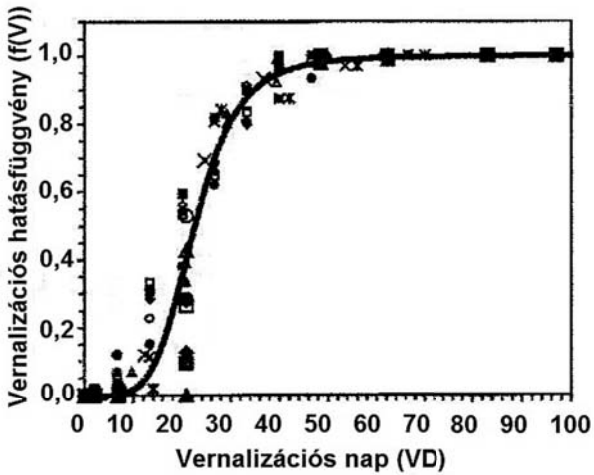
ahol Y a függő (vagyis a hatást mutató) változó, az X pedig a független (vagyis a magyarázó) változó. Az a mutatja azt az értéket, ahol $X = 0$ esetén a függvény a tengelyt metszi, c az asszimptota, amikor X közelít a végtelenhez, n az alakot formáló kitevő, a $b = (VD_{0,5})^n$, azaz a b értéke az az X érték, amelynél az Y a maximális értékének a fele.

Ebben az összefüggésben, ha az Y értékét tekintjük a vernalizációs hatásfüggvénynek ($f(V)$), az X értékét pedig a vernalizációs napnak (VD), akkor mivel $f(V)$ 0 és 1 között változik, az $a = 0$, $c = 1$ lesz. Az n kitevő növekedésével a függvény mindinkább szigmoid alakúvá válik, s tapasztalat szerint az őszi búzára vonatkozóan $n = 5$ kitevő a legmegfelelőbb választás, mivel $VD < 8-10$ nap esetén a függvény értéke közelítőleg 0, $VD > 50$ esetén pedig 0,98, közelítőleg 1. Az összefüggés tehát így írható fel:

$$f(V) = \frac{VD^5}{(VD_{0,5})^5 + VD^5} \quad (16)$$

A vizsgált adatokból megállapítható volt, hogy az őszi búza 20–25 VD után tekinthető félig vernalizálódottnak, ezért a $VD_{0,5} = 22,5$ -nek vehető.

A függvény 12 őszi búza-fajta adatai alapján a 6. ábrán látható. Leolvasható az ábrából, hogy 8–10 vernalizációs napnál kevesebb nap esetén a vernalizációnak nincsen hatása a növényfejlődésre, 50 nap felett pedig a növény vernalizáltnak tekinthető.



6. ábra Tizenkét őszi búza-fajta adatai alapján meghatározott vernalizációs hatásfüggvény (Streck *et al.* 2003a)

Figure 6. The vernalization responses of 12 winter wheat cultivars (axis x: number of vernalization days, axis y: vernalization response function)

A (16) összefüggés jobb eredményt ad, mint a korábban használt függvények, s amint az ábrából is látható, a tapasztalati adatokkal is jól megegyezik (Streck *et al.* 2003a).

A FOTOPERIÓDUS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSA

A fotoperiódus a megvilágított és a sötét időszakok váltakozását jelenti. Ezt a jelenséget a megvilágított időszak hosszával, azaz a nappalhosszúsággal jellemzik. A nappalhosszúságnak évi menete van, amely hazánkban a december 21-i 8 óra körüli minimális nappalhosszúság és a június 23-i 16 óra körüli maximális nappalhosszúság közé esik. Egy adott helyre vonatkozóan a nappalhosszúság földrajzi jellemzőkből meghatározható (Varga-Haszonits és Tölgyesi 1990).

Kiszámító az óraszög (ω) a gömbháromszögtan cosinus tétele alapján:

$$\sinh = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (17)$$

ahol h a napmagasság, φ a földrajzi szélesség, δ a Nap deklinációja és ω az óraszög. Napfelkeltekor vagy napnyugtakor, amikor a Nap a horizonton van, akkor a magassága nulla ($h = 0$), ezért az összefüggésbe $h = 0$ -t helyettesítve és az egyenletet átrendezve azt kapjuk, hogy

$$\cos \omega = \frac{\sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (18)$$

A (18) formula alapján az óraszög értéke kiszámítható, mivel a φ -értékek általában ismertek, a δ értékei pedig a csillagászati évkönyvekből kivehetők. Amennyiben ez utóbbi – valamilyen oknál fogva – nem áll a rendelkezésünkre, akkor a Spencer-formulát lehet használni, amely a következőképpen adja meg a δ -értéket (Paltridge és Platt 1976, Bencze et al. 1982):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos u + 0,070257 \cdot \sin u - 0,002697 \cdot \cos 2u + 0,000907 \cdot \sin 2u - 0,002697 \cdot \cos 3u + 0,001480 \cdot \sin 3u$$

ahol az u értékét a következő összefüggés adja meg:

$$u = \frac{2\pi}{365} \cdot n_k \quad (19)$$

Az egyenletben az n_k az év k -adik napja, ha a január 1-jét nullának, december 31-ét pedig 365-nek vesszük.

A $\cos \omega$ értékéből számítható a ω értéke ($\omega = \arccos \omega$). Mivel a délkörre szimmetrikus, vagyis ugyanannyi idő telik el napkeltétől délig, mint déltől napnyugtáig, a nappal hossza óraszögben kifejezve éppen 2ω . Ha ezt az értéket óraegységekben akarjuk megadni, akkor abból kell kiindulnunk, hogy egy nap időtartama: 24 óra ($\tau = 24$ óra) alatt a Nap egy teljes kört ír le ($2\pi = 360^\circ$), ezért a napkeltétől a napnyugtáig eltelt idő (t):

$$t = \frac{\tau}{2\pi} \cdot 2\omega = \frac{24}{180} \cdot \omega \quad (20)$$

A növényfejlődést a hőmérséklet mellett a nappalhosszúság is befolyásolja. Ez a két tényező az emberi beavatkozástól független. A nappalhosszúság – amint az előzőekben bemutatuk – a földrajzi szélesség, a Nap deklinációja és az óraszög ismeretében kiszámítható.

A nappalhosszúság alapvetően a vegetatív fejlődési szakaszban fejti ki a hatását. A generatív szakaszban a növények a nappalhosszúságra már kevésbé érzékenyek. A nappalhosszúságot általában a hőmérséklettel együtt szokták figyelembe venni vagy additív vagy multiplikatív formában (Yan és Wallace 1998). Az additív forma:

$$DR = f(t) + f(P) \quad (21)$$

ahol DR a napi fejlődési ütem, $f(t)$ a hőmérsékleti hatásfüggvény, $f(P)$ pedig a fotoperiodikus hatásfüggvény.

A multiplikatív forma a következő:

$$DR = f(t) \cdot f(P) \quad (22)$$

Vannak olyan modellek, amelyekben a hőmérséklet és a nappalhosszúság vagy napsugárzás egyetlen index formájában van megadva, amit jelölhetünk $f(t,P)$ hatásfüggvényként, s ezt az indexet hozzájuk összefüggésbe a növényfejlődéssel, akár az előző összefüggésekben az $f(P)$ hatásfüggvény helyett (Yan és Wallace 1998), akár önálló formában (Caprio 1977, Varga-Haszonits 1991):

$$DR = f(t, P) \quad (23)$$

Általában az $f(P)$ függvényt szokták meghatározni különböző (lineáris, parabola, hatványkitevős vagy exponenciális) formában. Az összefüggés független változója a nappalhosszúság (P) órákban kifejezett értéke vagy a nappalhosszúság és annak kritikus értéke (P_c) közötti különbség. A valóságot jól megközelítő megoldásnak tűnik az exponenciális hatásfüggvény, amely a következő formában írható (Streck *et al.* 2003b):

$$f(P) = 1 - \exp[-\lambda \cdot (P - P_c)] \quad (24)$$

ahol P a nappalhosszúság órákban kifejezett értéke, P_c a kritikus nappalhosszúság órákban kifejezett értéke, amely nappalhosszúság érték alatt nincsen fejlődés, a λ pedig fajtaspecifikus fotoperiódus érzékenységi koefficiense (dimenziója óra⁻¹). A Streck *et al.* (2003b) által vizsgált búzafajták esetében a P_c értéke 9,5 óra, a λ értéke pedig 0,34 óra⁻¹.

A FEJLŐDÉSI ÜTEM MEGHATÁROZÁSA KOMPLEX MODELLEKKEL

A kombinált modellek legegyszerűbb formája, az additív modell, amikor a növényfejlődésre legjobban ható két elem: a hőmérséklet (t) és fotoperiódus (P) hatását kétváltozós empirikus függvénnyel adjuk meg (Saykewich 1995):

$$\frac{1}{n} = a + b + t_k + c \cdot P \quad (25)$$

ahol az n a két fenofázis közötti napok száma, az a , b és c pedig empirikus konstansok. A t_k a fenofázis középhőmérséklete, a P pedig a fenofázis alatti átlagos nappalhosszúság (óra). A (25) egyenlet additív modell, ami nem veszi figyelembe a hőmérséklet és a fotoperiódus közötti kölcsönhatást, ezért napjainkban már inkább előnyben részesítik a multiplikatív modelleket, amelyek érzékenyek a kölcsönhatásokra is (Xue *et al.* 2004). Ezekben a modellekben a növényfejlődésre hatást gyakorló két legfontosabb elem, a hőmérséklet és a fotoperiódus mellett – elsősorban a téli gabonák esetében – a vernalizáció hatását is figyelembe szokták venni.

$$\frac{1}{n} = f(t) \cdot f(P) \cdot f(V) \quad (26)$$

ahol $f(t)$ a hőmérsékleti, $f(P)$ a fotoperiodikus, $f(V)$ pedig a vernalizációs hatásfüggvény. A multiplikatív modellek egyik változata a legerősebb korlátozó tényezőző módszer (most limiting factor), ami azt jelenti, hogy a három hatásfüggvény közül csak a minimumban lévő hatásfüggvényt veszik figyelembe. Ez a Liebig-féle minimumelv alkalmazását jelenti:

$$\frac{1}{n} = \min[f(t) \cdot f(P) \cdot f(V)] \quad (27)$$

A multiplikatív modellek tehát jobban reprezentálják a környezeti tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolatot, mert figyelembe veszik a kölcsönhatásokat. Ezek a modellek is különböznek azonban egymástól abban, hogy az egyes hatásfüggvényeket milyen formában határozzák meg.

Az $f(t)$ függvényt sokszor lineáris formában határozzák meg, használva a termikus idő fogalmát (Weir *et al.* 1984, McMaster és Wilhelm 1997). A kutatók jelentős része (Shaykewich 1995) azonban a nemlineáris függvényformákat részesítik előnyben. Vannak, akik a béta függvényt használják a hőmérsékleti hatás meghatározására (Yin *et al.* 1995, Wang és Engel 1998, Streck *et al.* 2003b).

A fotoperiodikus $f(P)$ hatásfüggvényt hasonlóképpen lineáris és nemlineáris formában is meghatározták. Önállóan azonban ezt a függvényt nem szokták használni, rendszerint csak valamilyen (additív vagy multiplikatív) formában a hőmérsékleti hatásfüggvényhez kapcsolva (Yan és Wallace 1998). Többnyire a fotoperiodus növényfejlődésre gyakorolt hatását exponenciális formában adják meg.

Az $f(V)$ vernalizációs hatásfüggvényt csak a hideghatást igénylő növények esetében használják, általában nemlineáris formában, amint azt korábban már bemutattuk.

A komplex növényfejlődési modellek egy jól kidolgozott formája a Wang-Engel modell (Wang és Engel 1998), vagy annak valamilyen módosított változata (Streck *et al.* 2003b, Xue *et al.* 2004). A modell általános formában így írható fel:

$$DR = DR_{\max} \cdot f(t) \cdot f(P) \cdot f(V) \quad (28)$$

ahol DR (developmental rate) a napi fejlődési ütem, DR_{\max} a fejlődési ütem maximális értéke. A DR_{\max} értéke növényfajtánként és fejlődési fázisonként változik. A hatásfüggvények 0 és 1 közötti értékeket vehetnek fel.

A fejlettségi állapotot DS (developmental stage) a napi fejlődési ütem összegezésével kapjuk meg:

$$DS = \sum_1^n DR \quad (29)$$

ahol n a napok száma. A DS értékét a keléstől számítjuk, ekkor értéke 0, a virágzáskor 1 és éréskor 2.

A MODELLEK VERIFIKÁLÁSA ÉS VALIDÁLÁSA

A modellezésben a verifikáció és a validáció általánosan használt fogalmak. A verifikáció során a ténylegesen mért adatokat a modellel számított adatokkal hasonlítják össze. Ez azt mutatja meg, hogy a modellben használt összefüggések mennyire helyesek (Mavi és Tupper 2004). A mért és számított adatok közötti összefüggés korrelációs koefficiense minél inkább közeledik az 1-hez, annál jobbnak tekinthető az alkalmazott módszer.

A validálás során megvizsgáljuk a tényleges értékek és a modellel meghatározott adatok közötti különbségeket. A modellt akkor tekintjük alkalmazhatónak és pontosnak, ha a mért értékek és a modellel meghatározott adatok közötti különbségek kicsik (Mavi és Tupper 2004), illetve ha a különbség egy gyakorlati szempontból meghatározott intervallumon belül van.

Az adatanyag felosztása

Az agroklimatológiai vizsgálatok során az adatanyagot általában három részre célszerű osztani:

- egy olyan adattömegre, amelyből a modell paramétereit empirikusan határozzák meg (bázisminta);
- egy olyan adattömegre, amelyből az empirikusan meghatározott értékeket korrigálják (korrekciós minta);
- egy olyan, a bázismintától független adattömegre, amelyből az empirikusan meghatározott értékeket ellenőrzik (tesztminta).

Általában – rendszerint adathiány miatt – elegendő az adattömeget bázismintára és tesztmintára felosztani. A gyakorlatban azonban nem mindig lehet a modell verifikálását független mintán elvégezni. Ebben az esetben – elegendően hosszú adatsorok esetén – egy lehetséges megoldás a sorok felezése, valamilyen módon két részre történő felosztása. Az adatbázis első felét lehet a modell kidolgozására, a másik felét pedig a modell validálására használni. Ezt a módszert kereszt-validitási módszernek nevezik. Az adatbázis megosztásánál arra kell ügyelni, hogy a megfigyelések száma legalább 4-5-szöröse legyen a modellben szereplő független változóknak (*Hunyadi et al.* 1996).

A módszer verifikálása

A verifikáció – *van Waveren et al.* (1999), valamint *Mavi és Tupper* (2004) szerint – a modellben szereplő összefüggések korrektségének vagy helyes voltának a tesztje. Ezt a tesztvizsgálatot úgy végzik, hogy a vizsgált rendszerre vonatkozóan mért adatokat összehasonlítják a modellszámítással kapott adatokkal, s ha az egyezés jó, akkor igazolt a modellben alkalmazott függvényszerű összefüggés korrektsége.

A tényleges és a modellel meghatározott adatok közötti összefüggés akkor determinisztikus, ha fennáll az $y = x$ egyenlőség. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor az x egységnyi változásával az y valamilyen a együttható szerint változik, azaz az összefüggés a következő formában írható: $y = a \cdot x$. Az összefüggés legfontosabb paramétere a korrelációs koefficiens (r), amely az összefüggés szorosságát mutatja. Minél nagyobb a korrelációs együttható értéke (azaz minél közelebb van 1-hez), annál szorosabb az összefüggés. Ha az r értéke 1, akkor az összefüggés determinisztikus, azaz az x értéknek vele azonos értékű y felel meg. A korrelációs koefficiens négyzete, amit determinációs együtthatónak nevezünk, azt mutatja meg, hogy a független változók milyen arányban (százalékban) okozzák a függő változó megváltozását. Ezzel válasz kapható arra a kérdésre, hogy a meteorológiai elemek milyen mértékben befolyásolják a növény életjelenségeinek alakulását.

A módszer validálása

A modell validálása – bár ez a szakirodalomban eléggé ellentmondásos fogalomnak tűnik – azt jelenti, hogy a modell által kapott értékeket összehasonlítjuk egy független minta adataival, s megvizsgáljuk, hogy a két adatsor mennyire egyezik (*van Waveren et al.* 1999). A modellépítés során számos tényezőt elhanyagolnak, ezért a kidolgozott módszerekkel

becsült értékek többnyire nem esnek egybe a tényleges értékekkel még a bázis mintában sem, amelynek adatai alapján a módszer empirikus paramétereit meghatározták. A tényleges értékek és a becsült értékek közötti különbségeket reziduális különbségeknek vagy egyszerűen reziduumoknak nevezzük.

Az összefüggés pontosságának meghatározására a reziduumok szórását szokás felhasználni, amely a következőképpen adható meg (*Theiss 1958, Wallach és Goffinet 1989*):

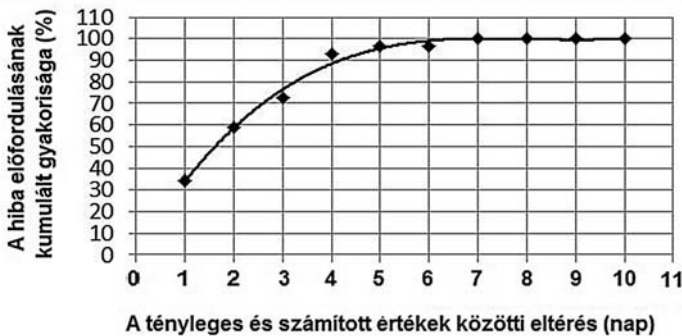
$$S_y = \sqrt{\frac{(y_t - y_{sz})^2}{n}} = \sigma_y \cdot \sqrt{(1 - r^2)} \quad (30)$$

ahol S_y a meghatározás pontossága (a reziduumok szórása), amelyet a becslés standard hibájának is neveznek, az y_t a tényleges érték, y_{sz} a számított érték, n a számításnál figyelembe vett esetek száma, a σ_y a független változó szórása, r pedig a korrelációs koefficiens. A módszer validálását a tesztmintán végzik el. A cél az, hogy olyan módszert dolgozzanak ki, amelynél a becslés standard hibája (S_y) első lépésben kisebb, mint a függő változó szórása (σ_y), majd a módszer további pontosítása azt követeli meg, hogy a következő módszer standard hibája S_y^{k+1} kisebb legyen, mint S_y^k , vagyis

$$\sigma_y > S_y^1 > S_y^2 > \dots > S_y^n$$

ahol az $S_y^1, S_y^2, \dots, S_y^n$, az egymás után kidolgozott módszerek szórását jelenti.

Ezzel az eljárással dönthető el, hogy az újonnan kidolgozott modell mennyire pontos, és hogy jobb eredményeket ad-e a korábbi módszereknél.



7. ábra Az őszi búza szárbaindulás-kalászás időszakának tényleges tartama és a fototermikus index (hőmérséklet/napfénytartalomösszeg) alapján számított tartama közötti napokban kifejezett különbség előfordulásának kumulatív gyakorisága (Iregszemcse, 1955–1984) Forrás: saját számítás

Figure 7. Cumulative frequency (%; axis y) of difference (in days, axis x) between actual length of shooting-heading phenophase and calculated length on the base of photothermal index (Iregszemcse, 1955–1984)

Gyakorlati szempontból azonban azt is fontos lehet tudni, hogy bizonyos nagyságú hibák milyen gyakorisággal fordulnak elő (*Varga-Haszonits 1977*). Ehhez a becslési hibák abszolút értékeinek a kumulatív gyakorisági eloszlását kell meghatározni, s az eredmények táblázatos vagy grafikus formában közölhetők. A 7. ábrán leolvasható, hogy az esetek 70%-ában a meghatározás hibája három napnál kisebb, vagyis minden három esetből kettőben a hiba kisebb, mint három nap.

Review

Methodological basis of modelling impact of meteorological factors on plant development

ZOLTÁN VARGA-HASZONITS – ZOLTÁN VARGA

University of West Hungary
Faculty of Agricultural and Food Sciences
Agrometeorological Department
of Institute of Mathematics, Physics and Informatics
Mosonmagyaróvár

SUMMARY

It is important for agricultural production to study the impacts of meteorological factors on the important cultivated crops. In this respect there is a need for methods which can determine the date of phenological events with sufficient accuracy in a given area. Modelling the relationship between meteorological elements and plant development can be divided into the following three groups:

- methods based on the relationship between degree-days and development;
- methods calculating the average developmental rate by the help of empirical formulas;
- methods quantifying developmental rate as a function of temperature, photoperiod and vernalization.

These options are reviewed in this paper.

Keywords: temperature, sum of temperatures, thermal time, photoperiod, vernalization, development, modelling.

IRODALOM

- Bencze P. – Major Gy. – Mészáros E.* (1982): Fizikai meteorológia. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Butterfield, R. E. – Morison, J. I. L.* (1992): Modelling impact of climate warming on winter cereals development. *Agricultural and Forest Meteorology* **62**, 241–261.

- Caprio, J. M.* (1977): The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration. In: *Landsberg, J. J. – Cutting, C. V.* (eds): Environmental Effects on Crop Physiology. Academic Press, London. 353–364.
- Charles-Edwards, D. A. – Doley, D. – Rimmington, G. M.* (1986): Modelling plant growth and development. Academic Press, Sydney.
- Gorisina, T. K.* (1979): Ekologija rasztyenyij. Viszsaja skola, Moszkva.
- Goudriaan, J. – van Laar, H. H.* (1994): Modelling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Academic Publications, Dordrecht.
- Hunyadi L. – Mundruczó Gy. – Vita L.* (1996): Statisztika. Aula Kiadó, Budapest.
- Liu, D. L.* (2007): Incorporating vernalization response functions into an additive phenological model for reanalysing the flowering data of annual pasture legumes. Field Crop Research. **101**, 331–342.
- Mavi, H. S. – Tupper, G. J.* (2004): Agrometeorology. Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture. Food Product Press, London.
- McMaster, G. S. – Wilhelm, W. W.* (1997): Growing degree day: one equation, two interpretations. Agricultural and Forest Meteorology. **87**, 291–300.
- Mirschel, W. – Wenkel, K.O. – Schultz, A. – Pommerening, J. – Verch, G.* (2005): Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. European Journal of Agronomy. **23**, 123–135.
- Monteith, J. L.* (1981): Climatic variation and growth of crops. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. **107**, 749–774.
- Paltridge, G. W. – Platt, C. M. R.* (1976): Radiative process in meteorology and climatology. Elsevier Scientific Publisher Company, Amsterdam.
- Pethő M.* (1993): Mezőgazdasági növények élettana. Második, átdolgozott kiadás. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Réaumur, R. A. F.* (1735): Termometric observations made at Paris during the year 1735, compared to those made below the equator on the Isle of Mauritius, at Algiers and on few American Islands. Acad. Sci. Memoirs Acad. Sci. Paris. 545. Cit. by: *Saykewich, C. F.* (1995): An appraisal of cereal crop phenology modelling. Canadian Journal of Plant Science 75: 329–341.
- Ritchie, J. T. – Godwin, D. C. – Otter-Nacke, S.* (1985): CERES-Wheat: A Simulation Model of Wheat Growth and Development. Texas A&M Univ. Press, College Station, Texas.
- Robertson, G. W.* (1983): Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops. WMO Technical Note No. 180. Geneva.
- Saykewich, C. F.* (1995): An appraisal of cereal crop phenology modelling. Canadian Journal of Plant Science. **75**, 329–341.
- Streck, N. A. – Weiss, A. – Baezinger, P. S.* (2003a): A generalized response function for winter wheat. Agronomy Journal. **95**, 155–159.
- Streck, N. A. – Weiss, A. – Xue, Q. – Baezinger, P. S.* (2003b): Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. Agricultural and Forest Meteorology. **115**, 139–150.
- Szalai I. (szerk.)* (1974): Növényélettan I–II. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Theiss E. (szerk.)* (1958): Korreláció és trendszámítás. Közgazdasági és Jogi Kiadó, Budapest.
- Varga-Haszonits Z. – Lexa I.* (1967): Útmutatás kultúrnövényfenológiai megfigyelésekre. Kézirat. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Varga-Haszonits Z.* (1967): A *Bánkúti 1201* búzafajta vetés-kelés szakaszának hőmérsékleti viszonyai. Időjárás. **61**, 334–338.
- Varga-Haszonits Z.* (1977): Agrometeorológia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Varga-Haszonits Z.* (1987): Agrometeorológiai információk és hasznosításuk. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Varga-Haszonits Zoltán – Tölgyesi L.* (1990): A globálsugárzás és a fotoszintetikusan aktív sugárzás számítása rövid időszakokra. Beszámoló az 1986-ban végzett tudományos kutatásokról, OMSZ, Budapest, 83–106.

- Varga-Haszonits Z. (1991): Relationship between the development rate of winter wheat and meteorological factors. *Acta Agronomica Óváriensis* **34**, 3–12.
- Varga-Haszonits Z. (2004): Az éghajlatváltozás és a mezőgazdasági termelés közötti kapcsolat elemzésének elvi-módszertanai alapjai. *Acta Agronomica Ovariensis*. **46**, 135–150.
- Van Waveren, R. H. – Groot, S. – Scholten, H. – Geer, F. C. – de Wosten, J. H. M. – Koeze, R. D. – Noort, J. J. (1999): Good modelling practice handbook. Stowa report 99-05. Dutch Dept. of Public Works, Institute of inland water management and waste water treatment, report 99.036, ISBN 90-5773-056-1. (<http://waterlaand.net/riza/aquest/>).
- Wallach, D. – Goffinet, B. (1989): Mean squared error of predictions as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecological Modelling*. **44**, 299–306.
- Wang, E. L. – Engel, T. (1998): Simulation of phenological development on wheat crops. *Agricultural Systems*. **58**, 1–24.
- Wareing, P. F. – Phillips, I. D. J. (1982): Növényi növekedés-élettan. Natura Kiadó, Budapest.
- Weir, A. H. – Bragg, P. L. – Porter, J. R. – Rainer, J. H. (1984): A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science*. **102**, 371–382.
- Williams, J. R. – Jones, C. A. – Kiniry, J. R. – Spanel D. A. (1989): The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASAE*. **32**, 497–511.
- Xue, Q. – Weiss, A. – Baezinger, P. S. (2004): Predicting phenological development in winter wheat. *Climatic Research*. **25**, 243–252.
- Yan, W. – Wallace, D. (1998): Simulation of Prediction of Plant Phenology for Five Crops Based on Photoperiod x Temperature Interaction. *Annals of Botany*. **81**, 705–716.
- Yan, W. – Hunt, L. A. (1999): An Equation for Modelling the Temperature Response of Plants using only the Cardinal Temperatures. *Annals of Botany*. **84**, 607–614.
- Yin, X. – Kropff, M. J. – McLaren, G. – Visperas, M. R. (1995): A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. **77**, 1–16.

A szerzők levélcíme – Address of the authors:

VARGA-HASZONITS Zoltán – VARGA Zoltán
 Nyugat-magyarországi Egyetem
 Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar
 H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár 2.
 E-mail: vargahz@mtk.nyme.hu
varzol@mtk.nyme.hu