

A környezeti tényezők hatása a normalizált vegetációs index mérésére

Dobos Attila – Vig Róbert – Nagy János

Debreceni Egyetem Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar, Földhasznosítási, Műszaki és Területfejlesztési Intézet, Debrecen
dobosa@agr.unideb.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Nem destruktív, optikai mérőműszerek alkalmazásával lehetővé válik a növényállomány nitrogénellátottságának gyors mérése, valamint a nitrogénhiány területileg differenciált meghatározása és pótlása. A nitrogénellátottság megállapítása azon alapszik, hogy a növények klorofilltartalma szoros összefüggésben áll a nitrogéntartalommal, valamint a klorofill mennyisége jól mérhető a klorofill molekulák fényelnyelése alapján. Az optikai mérések eredményességét az időjárási paraméterek változása befolyásolhatja, ezért a gyakorlati alkalmazásban fontos ismernünk a mérési eredmények és az időjárási paraméterek közötti összefüggéseket.

A vizsgálataink során alkalmazott GreenSeeker Model 505 mérőműszerek a relatív klorofilltartalmat a növényállományról visszaverődött vörös és infravörös fény sugarak intenzitása alapján kalkulált normalizált vegetációs index (NDVI) formájában határozza meg. A méréseket lucernaállományban végeztük 10 ismétlésben, ötféle mérési magasságban és négyféle mérési időpontban. Az időjárási paramétereket a lucernaállomány közepén elhelyezett meteorológiai állomással mértük, majd megvizsgáltuk a meteorológiai adatok és az NDVI értékek közötti összefüggéseket.

Az eredmények statisztikai értékelése során megállapítottuk, hogy az NDVI mérés eredményét elsősorban a levegő relatív páratartalma, másodsorban a levegő hőmérséklete, harmadsorban pedig a szélesebbé befolyásolta. A relatív páratartalommal az NDVI érték erős összefüggést mutatott, amit a mérési magasság és a mérési időpontja is befolyásolt. A regresszió nem bizonyult szignifikánsnak 20 centiméteres mérési magasság alkalmazása mellett, míg a 40 cm feletti mérési magasságokban szignifikáns összefüggéseket kaptunk. Az összefüggés minden vizsgált időpontban erősnek bizonyult, viszont a páratartalom mérést befolyásoló hatása a 11:00 és 14:00 óras mérések esetében érvényesült a legkevésbé.

Kulcsszavak: lucerna, NDVI, GreenSeeker, időjárás

SUMMARY

The level of nitrogen supply of a plant population can be quickly measured with non-destructive optical measurement devices and the differentiated determination of nitrogen shortage and the replenishment of nitrogen can also be carried out. The level of nitrogen supply is based on the fact that the chlorophyll content of crops is in close correlation with nitrogen content and that the amount of chlorophyll can be easily measured on the basis of the light absorption of chlorophyll molecules. The successfulness of optical measurements can be influenced by the change of weather parameters; therefore, it is important to know the correlations between measurement results and weather parameters when it comes to practical use.

The GreenSeeker Model 505 measurement device determines the relative chlorophyll content in the form of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) calculated on the basis of the intensity of the reflected red and infrared rays of light from the crop population. The measurements were performed in alfalfa population with 10 replications at five measurement heights and four measurement

times. The weather parameters were measured by a weather station located in the middle of the alfalfa population and the correlations between the meteorological data and the NDVI values were examined.

During the statistical evaluation of the results, it was established that the NDVI measurement is primarily influenced by the relative humidity of the air, secondly by air temperature and thirdly by wind speed. Relative humidity was in strong correlation with the NDVI values which were also influenced by the measurement height and time. Regression was not significant in the case of 20 cm measurement height, but the measurements above 40 cm height showed significant correlations. The correlation was shown to be strong at each measurement time, but the influence of humidity was the lowest at 11:00 and 14:00.

Keywords: alfalfa, NDVI, GreenSeeker, weather

BEVEZETÉS ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A növények nitrogénigényének kielégítése történhet a vegetációs periódusban a növények aktuális nitrogénigénye alapján (Fox et al., 1986; Lemaire et al., 2008), melynek meghatározása történhet destruktív laborvizsgálatokkal, valamint nem destruktív, optikai mérésekkel (Justes et al., 1997; Feibo et al., 1998). A nem destruktív, optikai mérési módszerek előnye a laborvizsgálatokkal szemben, hogy kevésbé költségesek, gyorsak és kisebb a munkaigényük, ezért a gyakorlatban célszerű optikai mérési módszereket alkalmazni (Blackmer és Schepers, 1994; Chapman és Barreto, 1997; Justes et al., 1997).

Az optikai mérési módszerek azon alapulnak, hogy a klorofill molekulák a fényt a látható vörös tartományban elnyelik, míg az infravörös tartományban átengedik (Brown, 1969; Murata és Sato, 1978; Yadava, 1986), így az infravörös és a vörös fényintenzitások arányosításával képzett indexek szoros összefüggésben állnak a klorofilltartalommal (Roderick et al., 1996; Zhang et al., 2009). A klorofill mennyisége szoros pozitív összefüggésben áll a levelek nitrogéntartalmával (Evans, 1983, 1989; Houliès et al., 2007), így a klorofill molekulák által elnyelt vörös fény sugarak intenzitása alapján kalkulált indexekből következtethetünk a növények nitrogénellátottságára is (Iida et al., 2000; Freeman et al., 2007; Wright et al., 2007).

Az egyik leggyakrabban alkalmazott index a normalizált vegetációs index (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), amit az alábbi képlet szerint határoznak meg: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, ahol NIR = az infravörös fény intenzitása és RED = a vörös fény intenzitása (Rouse et al., 1973). Az NDVI meghatározása történhet műholdképek spektrális elemzésével, mely elsősorban regionális szintű elemzéseket tesz lehetővé (Wang és Tenhunen, 2004; Knight et al., 2006; Ren et al., 2008), valamint szabadföldi, optikai

mérőműszerek alkalmazásával, ami táblaszintű értékekre ad lehetőséget (Hancock és Dougherty, 2007; Rambo et al., 2010).

A normalizált vegetációs index szoros pozitív összefüggésben áll a növényállomány fejlődésével (Aparicio, 2000; Nambuthiri, 2010) klorofilltartalmával (Roderick et al., 1996; Cui et al., 2009), nitrogéntartalmával (Iida et al., 2000; Wei et al., 2010), biomassza-produkciójával (Hong et al., 2007; Hancock és Dougherty, 2007) és a termés mennyiségével (Teal et al., 2006; Chung et al., 2008), így az NDVI mérés számos gyakorlati alkalmazást tesz lehetővé. A normalizált vegetációs index időben és térben történő meghatározásával lehetővé válik a növényállomány fejlődésének monitoringja (Viña et al., 2004; Martin et al., 2007), a növényállomány egészségi állapotának és nitrogénellátottságának térképezése (Boegh et al., 2002; Nambuthiri, 2010), a nitrogénhiány területi alapú meghatározása és differenciált pótlása (Singh et al., 2006), valamint a várható termés becslése (Teal et al., 2006).

A mérési eredményeket befolyásolhatja a növényborítottság mértéke, mely a talaj kisebb vagy nagyobb mértékű reflektanciájából adódik (Aparicio et al., 2002), ezért fontosnak tartjuk a mérési módszerek kapás és zárt kultúrákban történő vizsgálatát. Kutatásaink elsődleges célja annak megállapítása, hogy zárt lombosított növénykultúrákban milyen mérési módszerrel határozható meg a legpontosabban az NDVI és a nitrogénellátottság közötti összefüggés. Korábbi publikációkban az NDVI, a mérési magasság és a mérés időpontja közötti összefüggéseket ismertettük (Vig et al., 2011), míg jelen tanulmányunkban az időjárási paraméterek NDVI mérést befolyásoló hatását értékeljük.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Vizsgálatainkat a Debreceni Egyetem Kertészeti Intézetének bemutatókertjében, csernozjom talajon végeztük. A mérés helyszínéről egy 729,8 m² területű (17,8 m×41,0 m) lucernaállományt választottunk, melyben Trimble GPS Pathfinder ProXH és ArcPad 7.0 szoftver alkalmazásával 10 mérési pontot határoztunk meg. A lucernaállományon belül a tábla két oldalán, a táblaszéltől 2, egymástól 7 méterre 5–5 mérési pontot jelöltünk ki 1,2 méteres bambuszkarókkal.

A vegetációs periódusban 2010. 05. 27. és 2010. 09. 21. között 6 alkalommal, alkalmanként 4 időpontban (08:00 óra, 11:00 óra, 14:00 óra és 17:00 óra) NDVI-méréseket végeztünk GreenSeeker Model 505 készülékkel. A méréseket minden esetben az előre kijelölt mérési pontokon végeztük a növényállomány felett 20, 40, 60, 80 és 100 centiméteres magasságban.

Az időjárási paraméterek mérésére a lucernaállomány közepén meteorológiai állomást helyeztünk ki, melynek tartozékai: CR 1000 adatgyűjtő és memória (Campbell Scientific Ltd., UK), 52202 csapadékmérő (R. M. Young Co., USA), CS215 hőmérséklet- és páratartalommérő (Campbell Scientific Ltd., UK), 05103-5 szélsebesség- és széliránymérő (R. M. Young Co., USA), CMP3 sugárásmérő (Kipp & Zonen Inc., USA), LWS levélnedvességmérő (Decagon Devices Inc., USA), CS616 talajnedvességmérő (Campbell Scientific Ltd., UK), Model 107 talajhőmérsékletmérő (Campbell Scientific Ltd., UK).

A vizsgálat helyszíne (Debrecen) a 9/a klímakörzet észak-keleti részén helyezkedik el (Ángyán, 1985). A vizsgálat évében (2010) a tavaszi-nyári félév átlaghőmérséklete a klímakörzetet jellemző értékhez hasonlóan alakult (17,8 °C). A július átlaghőmérséklete 0,8 °C-kal, az április átlaghőmérséklete 0,9 °C-kal volt magasabb, mint a 80 éves átlag. Az éves csapadék (2009. 10. 01.–2010. 09. 30.) 70 százalékkal (377 mm), az őszi-téli félév (2009. 10. 01.–2010. 03. 31.) csapadéka 44 százalékkal (100 mm), a tavaszi-nyári félév (2010. 04. 01.–2010. 09. 30.) csapadéka 88 százalékkal (277 mm), a nyár legmelegebb hónapjának csapadéka 43 százalékkal (29 mm) haladta meg a klímakörzetet jellemző átlagos értékeket.

A mérési eredmények értékelését SPSS for Windows 14.0 statisztikai programcsomaggal végeztük. Az NDVI érték, az NDVI mérésekben jelentkező átlagos differencia (MD%) és a mérési eredményekben jelentkező variabilitás (CV%) időjárási paraméterekkel való összefüggését lineáris, négyzetes, harmadfokú exponenciális és logaritmus regresszió-analízissel értékeltük 0,1%, 1,0% és 5,0% szignifikancia szinten, melyek közül csak a legszorosabb összefüggést igazoló regressziós egyenleteket publikáljuk.

A mérési eredményekben jelentkező átlagos differenciát százalékos értékben határoztuk meg az alábbi képlet alapján: $MD\% = \sum[(M_x - M_y)/(M_y/100)]$, ahol $MD\%$ = átlagos differencia, M_x = az x mérési magasságban mért eredmények átlaga, M_y = az y mérési magasságban mért eredmények átlaga, valamint $M_x > M_y$. A mérési eredményekben jelentkező variabilitást a variációs koefficienssel jellemeztük, vagyis a szórás az átlagérték százalékában fejeztük ki: $CV\% = Sd/(M/100)$, ahol $CV\%$ = variációs koefficiens, Sd = szórás, M = átlag (Senders, 1958).

KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A vizsgálat során a különböző mérési pontokon meghatározott napi átlagos NDVI értékek és a napi átlagos időjárási paraméterek közötti összefüggések értékelése során, megállapítottuk, hogy a napi átlagos NDVI szoros pozitív összefüggésben áll a napi átlagos páratartalommal. Az összefüggést $p < 0,01$ szinten szignifikáns, harmadfokú regressziós egyenlettel tudtuk a legpontosabban meghatározni, mely a napi átlagos NDVI és a napi átlagos páratartalom között 96,5 százalékos összefüggést mutatott. Az összefüggés erős, ezért a páratartalom függvényében az NDVI mérés eredménye jelentősen eltérhet a valós értékektől. A többi vizsgált időjárási paraméter (napi átlagos hőmérséklet, napi összes globális napsugárzás, napi átlagos szélsebesség, evapotranspiráció) a napi átlagos NDVI értéket nem befolyásolta (1. táblázat).

A különböző mérési időpontokban (08:00 óra, 11:00 óra, 14:00 óra, 17:00 óra) meghatározott NDVI értékekhez hozzárendeltük az adott időpontban mért időjárási paraméterek értékét, majd regresszió-analízissel meghatároztuk az összefüggések erősségét és jellegét. Az aktuális (az NDVI mérés időpontjában mért) globális napsugárzás és a normalizált vegetációs index között nem jelentkezett szignifikáns különbség (1. táblázat), mely igazolja a GreenSeeker Model 505 készülék fejlesztőinek azon állítását, miszerint a fényviszo-

nyok nem befolyásolják a mérés eredményességét (NTech Industries Inc., 2007). Az aktuális páratartalom, az aktuális hőmérséklet és az aktuális szélesség közepes-erős összefüggést mutatott az NDVI mérés eredményeivel. Az aktuális páratartalom és az aktuális hőmérséklet a normalizált vegetációs indexszel $p < 0,001$ szinten szignifikáns, szoros összefüggést adott. Az NDVI és az aktuális páratartalom közötti 58,0 százalékos, har-

madfokú, míg az aktuális hőmérséklet és a normalizált vegetációs index között 53,3 százalékos négyzetes regressziót igazoltunk. Az aktuális szélesség és az NDVI érték között $p < 0,05$ szinten szignifikáns, harmadfokú összefüggés jelentkezett, mely szerint a szélesség 43,5 százalékban befolyásolta a mérés eredményességét (1. táblázat).

1. táblázat

Az NDVI és az időjárási paraméterek közötti összefüggések értékelése

Időjárási paraméterek(1)	R ² (2)	R(3)	F(4)	Regressziós egyenlet(5)
A napi átlagos NDVI és az időjárási paraméterek napi átlagos értéke közötti összefüggések(16)				
NAP(6)	0,956	0,978	32,9**	$y = 0,091 + 0,015x - 9 \cdot 10^{-7}x^3$
NÁH(7)	0,344	0,587	0,787 ⁿ	-
NÖGN(8)	0,168	0,410	0,304 ⁿ	-
NÁSZ(9)	0,073	0,270	0,052 ⁿ	-
EPT _p (10)	0,257	0,507	0,230 ⁿ	-
EPT _{sz} (11)	0,164	0,405	0,130 ⁿ	-
A különböző mérési időpontokban meghatározott NDVI és az adott időpontban mért időjárási paraméterek közötti összefüggések(17)				
P(12)	0,580	0,762	13,1***	$y = 0,806 + 5,46 \cdot 10^{-5}x^2 - 6,10 \cdot 10^{-7}x^3$
H(13)	0,533	0,730	10,8***	$y = 0,588 + 0,024x - 4,8 \cdot 10^{-4}x^2$
GS(14)	0,077	0,277	0,5 ⁿ	-
SZ(15)	0,435	0,660	4,6*	$y = 0,734 + 0,351x - 0,278x^2 + 0,068x^3$

n = nincs szignifikáns összefüggés, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, R² = determinációs együttható, R = korrelációs koefficiens, F = F-próbastatisztika, NAP = Napi átlagos páratartalom (%), NÁH = Napi átlagos hőmérséklet (°C), NÖGN = Napi összes globális napsugárzás (KJ/m²), NÁSZ = Napi átlagos szélesség (m/s), EPTP = Evapotranspiráció (mm/nap) a Penman képlettel számolva, EPTSZ = Evapotranspiráció (mm/nap) a Szász-féle képlettel számolva, P = Az NDVI mérés időpontjában mért páratartalom (%), H = Az NDVI mérés időpontjában mért hőmérséklet (°C), GS = Az NDVI mérés időpontjában mért globálisugárzás (KJ/m²), SZ = Az NDVI mérési időpontjában mért szélesség (m/s)

Table 1: Evaluation of the correlations between NDVI and weather parameters

Weather parameters(1), R² = Coefficient of determination(2), R = Coefficient of correlation (3), F = F-test statistics(4), Regression equation(5), NAP = Daily mean humidity (%)(6), NÁH = daily mean temperature (°C)(7), NÖGN = Daily total global solar radiation (KJ m⁻²)(8), NÁSZ = Daily mean wind speed (m s⁻¹)(9), EPTP = Evapotranspiration (mm day⁻¹) calculated with Penman's formula(10), EPTSZ = Evapotranspiration (mm day⁻¹) calculated with Szász's formula(11), P = Humidity measured at the time of the NDVI measurement (%)(12), H = Temperature measured at the time of the NDVI measurement (°C), GS = Global radiation measured at the time of the NDVI measurement (KJ m⁻²)(14), SZ = Wind speed measured at the time of the NDVI measurement (m s⁻¹)(15), Correlations between the daily mean NDVI values and the weather parameters (16), Correlations between NDVI values determined at different times and the respective weather parameters(17), n = No significant correlation, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Ellentmondást találtunk abban, hogy az NDVI mértést az aktuális páratartalom 58,0 százalékban, az aktuális hőmérséklet 53,3 százalékban, a szélesség pedig 43,5 százalékban befolyásolta. Hipotézisünk szerint az összefüggések között átfedés jelentkezik, abból adódóan, hogy a vizsgálat időjárási paraméterek nem függetlenek egymástól. Ennek igazolására egytényezős variancia-analízissel meghatároztuk, hogy a különböző időjárási paraméterek milyen eltérést mutatnak a különböző mérési időpontokban, valamint főkomponens analízissel megállapítottuk az időjárási paraméterek közötti összefüggéseket. A páratartalom, a hőmérséklet és a szélesség esetében is $p < 0,001$ szinten szignifikáns különbségek jelentkeztek a négyféle mérési időpontban meghatározott értékek között. A páratartalom 08:00 órától 14:00 óráig csökkent, majd kis mértékben növekedett, míg a hőmérséklet és a szélesség fordítottan arányosan változott, vagyis 08:00 órától 14:00 óráig növekedett, majd ezt követően csökkent. A szignifikánsan legnagyobb páratartalmat 08:00 órákor, a szignifikánsan legkisebb páratartalmat pedig 14:00 órákor mértük. A

11:00 órákor és a 17:00 órákor rögzített értékek statisztikailag igazolható mértékben nagyobbak voltak, mint a 14:00 óras mérés eredménye, valamint szignifikánsan alacsonyabbak voltak, mint a 08:00 óras időpontban meghatározott érték. A 17:00 órákor és a 14:00 órákor mért léghőmérséklet között nem adódott statisztikai értelemben vett különbség, valamint a 08:00 és a 11:00 időpontban végzett mérések szignifikánsan alacsonyabbak voltak mint a 14:00 és 17:00 óras értékek. A különböző időpontokban mért szélességben jelentkező szignifikáns különbségek az alábbi sorrendben alakultak: 14:00>11:00>08:00>17:00 (2. táblázat).

A páratartalom, a léghőmérséklet és a szélesség közötti összefüggéseket főkomponens analízissel vizsgálva egy főkomponenst határoztunk meg, mely alapján a főkomponensek előjeleit figyelembe véve megállapítottuk, hogy a páratartalom negatív összefüggést mutatott a hőmérséklettel és a szélességgel. A főkomponens súlyok igazolták, hogy a páratartalom a szélességgel és a hőmérséklettel szoros összefüggésben állt (2. táblázat).

Az időjárás paraméterek különböző időpontokban mért értékei közötti különbségek, valamint az időjárás paraméterek közötti összefüggések értékelése

A mérések időpontja (óra)(1)	A levegő relatív páratartalma (%) (2)	Léghőmérséklet (°C)(3)	Szélsebesség (m/s)(4)
Mért értékek (7)			
08:00	70,6 ± 11,5 a	21,7 ± 5,0 c	0,87 ± 0,43 d
11:00	54,8 ± 2,5 b	25,9 ± 4,2 b	1,45 ± 0,46 b
14:00	48,4 ± 4,6 d	28,1 ± 4,7 a	1,52 ± 0,36 a
17:00	50,5 ± 6,8 c	27,5 ± 4,3 a	1,08 ± 0,36 c
F(5)	539,2***	112,6***	159,9***
Főkomponens súlyok(8)			
I. főkomponens(6)	-0,899	0,849	0,663

***p<0,001, F = F-próbastatisztika

Table 2: Evaluation of the differences between the weather parameters measured at different times and the correlation between weather parameters

Measurement time (hour)(1), Relative humidity (%) (2), Air temperature (°C)(3), Wind speed (m s⁻¹)(4), F = F-test statistics(5), 1st main component(6), Measured values(7), Main component weights(8), ***p<0.001, F = F-test statistics.

Az NDVI és az időjárás paraméterek (páratartalom, hőmérséklet, szélsebesség) közötti összefüggések regresszió-analízissel történő, valamint a páratartalom, léghőmérséklet és szélsebesség közötti összefüggések főkomponens analízissel történő értékelése során arra a következtetésre jutottunk, hogy az NDVI mérést a páratartalom a hőmérséklet és a szélsebesség is befolyásolja (1. és 2. táblázat). Főkomponens analízissel igazoltuk, hogy a páratartalom a hőmérséklettel és a szélsebességgel negatív összefüggésben áll (2. táblázat), amiből következik, hogy a léghőmérséklet és a szélsebesség a levegő relatív páratartalmán keresztül befolyásolja az NDVI mérés eredményét. Az NDVI és a vizsgált időjárás paraméterek közötti regresszió értékelése során kapott korrelációs koefficiens alapján kijelenthető, hogy az NDVI értéket elsősorban a levegő relatív páratartalma (R=0,762), másodsorban a léghőmérséklet (R=0,730), harmadsorban pedig a szélsebesség (R=0,660) befolyásolta (1. táblázat).

Az NDVI mérés és a páratartalom közötti összefüggéseket vizsgáltuk a különböző mérési magasságok és mérési időpontok függvényében is, ugyanis korábbi vizsgálatainkban megállapítottuk, hogy az NDVI érték az alkalmazott mérési magasság és mérési idő függvényében szignifikánsan eltérő (Vig et al., 2011). A különböző mérési magasságokban és mérési időpontokban meghatározott NDVI értékek és a levegő relatív páratartalma közötti összefüggéseket lineáris, négyzetes, harmadfokú, exponenciális és logaritmus regresszió-analízissel vizsgálva megállapítottuk, hogy a legszorosabb összefüggéseket a másod és harmadfokú regressziós egyenletek írták le. A 20 centiméteres mérési magasságban az NDVI és a páratartalom között nem jelentkezett szignifikáns regresszió, míg a 40, 60, 80 és 100 centiméteres mérési magasságok alkalmazása mellett az NDVI és a páratartalom között p<0,01 és p<0,001 szinten szignifikáns összefüggéseket igazoltunk. A páratartalom a mérési magasságtól függően erősnek bizonyult (R=0,819–0,873) és 67,0–76,3 százalékban (R²=0,670–0,763) befolyásolta az NDVI mérést. A különböző mérési időpontokra minden esetben szignifikáns (p<0,01 és p<0,001) és erős (R=0,828–0,986) összefüggéseket igazoltunk. A páratartalom NDVI mérést befolyásoló ha-

tása a 08:00 órás mérés alkalmazása mellett volt a leg-erősebb (R²=0,972) és a 14:00 órakor végzett mérések esetében a leggyengébb (R²= 0,686) (3. táblázat).

Egy korábbi publikációinkban megállapítottuk, hogy a különböző mérési magasságokban meghatározott NDVI értékek közötti átlagos differencia (MD_{0%}) a különböző mérési időpontokban eltérő, valamint a mérési eredményekben jelentkező variabilitás (CV_{0%}) függ az alkalmazott mérési magasságtól (Vig et al., 2010). Jelen tanulmányunkban igazoljuk, hogy a vizsgált paraméterekben bekövetkező változás a levegő relatív páratartalmával van összefüggésben.

A különböző mérési magasságokban mért NDVI értékek közötti átlagos differencia (MD_{20–100}), valamint a különböző mérési magasságokban mért értékek variabilitása (CV_{20–100%}) és a páratartalom közötti összefüggéseket másodfokú, harmadfokú, exponenciális és logaritmus regresszió-analízissel értékelve megállapítottuk, hogy az összefüggéseket másodfokú és harmadfokú regressziós egyenletekkel lehet a legpontosabban leírni. Az átlagos differencia és a páratartalom között p<0,001 szinten szignifikáns, erős összefüggést határoztunk meg, melyben a levegő relatív páratartalma 68,1 százalékban befolyásolta a különböző mérési magasságokban meghatározott NDVI értékek közötti átlagos eltérést. A 20 centiméteren és a 40 centiméteren végzett mérések eredményeiben jelentkező variabilitás (CV_{20%}, CV_{40%}) és a páratartalom között nem jelentkezett statisztikailag igazolható összefüggés, míg a többi mérési magasságra számolt variációs koefficiensre (CV_{60%}, CV_{80%}, CV_{100%}) vonatkozóan közepes erősségű összefüggéseket igazoltunk. A 60 és a 80 centiméteres mérési magasságokban meghatározott összefüggések p<0,05 szinten szignifikánsnak bizonyultak, a regressziós koefficiens pedig megközelítette a 0,6 értéket, míg a 100 centiméteren végzett mérések esetében p<0,01 szinten szignifikáns és 0,6 feletti korrelációs koefficienssel jellemezhető összefüggést írtunk le. A determinációs együttható alapján a 60 és 80 centiméteres mérési magasságban 35,4 és 35,3 százalékban, míg a 100 centiméteres mérési magasságban 38,8 százalékban befolyásolta a páratartalom az NDVI értékek variabilitását (4. táblázat).

3. táblázat

A levegő relatív páratartalma és az NDVI érték közötti összefüggések a különböző mérési magasságokban és mérési időpontokban

Mérési magasság (cm)(1)	R ² (2)	R(3)	F(4)	Regressziós egyenlet(5)
20	0,065	0,255	0,7 ⁿ	-
40	0,755	0,869	29,2 ^{***}	$y = 0,738 - 0,003x - 3,4 \cdot 10^{-7}x^3$
60	0,763	0,873	30,5 ^{***}	$y = 0,792 + 6,2 \cdot 10^{-5}x^2 - 7,0 \cdot 10^{-7}x^3$
80	0,734	0,857	26,3 ^{***}	$y = 0,779 + 7,4 \cdot 10^{-5}x^2 - 8,3 \cdot 10^{-7}x^3$
100	0,670	0,819	8,4 ^{**}	$y = 0,783 + 6,9 \cdot 10^{-5}x^2 - 7,7 \cdot 10^{-7}x^3$
Mérés időpontja (óra)(6)	R ² (2)	R(3)	F(4)	Regressziós egyenlet(5)
08:00	0,972	0,986	52,8 ^{***}	$y = 0,590 - 1,5 \cdot 10^{-6}x^3$
11:00	0,744	0,863	29,8 ^{***}	$y = -3,735 + 0,168x - 0,002x^2$
14:00	0,686	0,828	10,3 ^{**}	$y = -0,770 + 0,66x - 0,001x^2$
17:00	0,850	0,922	46,7 ^{***}	$y = 0,168 + 0,027x - 2,0 \cdot 10^{-4}x^2$

n = nincs szignifikáns összefüggés, **p<0,01, ***p<0,001, R² = determinációs együttható, R = korrelációs koefficiens, F = F-próbastatisztika

Table 3: Correlations between the relative humidity and the NDVI values at different measurement heights and times

Measurement height (cm)(1), R² = coefficient of determination(2), R = correlation of coefficient(3), F = F-test statistics(4), Regression equation(5), Measurement time (hour)(6), n = No significant correlation, **p<0.01, ***p<0.001, R² = coefficient of determination, R = correlation of coefficient, F = F-test statistics

4. táblázat

A különböző mérési magasságokban meghatározott NDVI értékek közötti átlagos differencia (MD₂₀₋₁₀₀), valamint a különböző mérési magasságokban mért értékek variabilitása (CV_{20-100%}) és a levegő relatív páratartalma közötti összefüggések

Vizsgált paraméterek(1)	R ² (2)	R(3)	F(4)	Regressziós egyenlet(5)
MD ₂₀₋₁₀₀ (6)	0,681	0,825	20,3 ^{***}	$y = 5,376 - 0,003x^2 - 4,06 \cdot 10^{-5}x^3$
CV _{20%} (7)	0,087	0,295	0,905 ⁿ	-
CV _{40%} (8)	0,232	0,482	2,9 ⁿ	-
CV _{60%} (9)	0,354	0,595	5,2 [*]	$y = 3,478 - 0,002x^2 + 1,59 \cdot 10^{-5}x^3$
CV _{80%} (10)	0,353	0,594	5,2 [*]	$y = 4,407 - 0,075x + 7,29 \cdot 10^{-6}x^3$
CV _{100%} (11)	0,388	0,623	6,0 ^{**}	$y = 8,574 - 0,221x + 0,002x^2$

n = nincs szignifikáns összefüggés, *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, R² = determinációs együttható, R = korrelációs koefficiens, F = F-próbastatisztika, MD₂₀₋₁₀₀ = a különböző mérési magasságokban meghatározott NDVI értékek közötti átlagos differencia, CV_{20%} = a 20 centiméteres magasságban mért NDVI értékek variabilitása, CV_{40%} = a 40 centiméteres magasságban mért NDVI értékek variabilitása, CV_{60%} = a 60 centiméteres magasságban mért NDVI értékek variabilitása, CV_{80%} = a 80 centiméteres magasságban mért NDVI értékek variabilitása, CV_{100%} = a 100 centiméteres magasságban mért NDVI értékek variabilitásaTable 4: Correlations between the mean difference (MD₂₀₋₁₀₀) and variability (CV_{20-100%}) and the relative humidityExamined parameters(1), R² = Coefficient of determination(2), R = Coefficient of correlation(3), F = F-test statistics(4), Regression equation(5), MD₂₀₋₁₀₀ = Mean difference between the NDVI values measured at different heights(6), CV_{20%} = Variability of NDVI values measured at 20 cm(7), CV_{40%} = Variability of NDVI values measured at 40 cm(8), CV_{60%} = Variability of NDVI values measured at 60 cm(9), CV_{80%} = Variability of NDVI values measured at 80 cm(10), CV_{100%} = Variability of NDVI values measured at 100 cm(11), n = No significant correlation, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001.

KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálati eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a szabadföldi NDVI mérés eredményeit elsősorban a levegő relatív páratartalma befolyásolja. Másod és harmadsorban az NDVI mérés eredményeire hatással van a léghőmérséklet és a szélsebesség is, ugyanis a hőmérséklet és a szélsebesség negatív összefüggésben áll a páratartalommal. A páratartalom NDVI mérésre gyakorolt hatása függ az alkalmazott mérési magasságtól és a mérés időpontjától. A 20 centiméteres mérési magasság alkalmazása mellett a páratartalom NDVI mérésre gyakorolt hatása nem érvényesül, míg 40 cm feletti mérési magasságokat alkalmazva a páratartalom mérést torzító hatása erős. A páratartalom és az NDVI érték közötti összefüggés a

08:00 és 17:00 órás mérések esetében volt a legerősebb, míg a 11:00 és 14:00 órákor végzett mérések során a leggyengébb. Ebből adódóan, a mérési magasság növelésével, valamint a reggeli és a késő délutáni időpontokban történő méréssel a páratartalom mérést torzító hatása erőteljesebb.

Korábbi vizsgálatainkban igazoltuk, hogy a mérési magasság növelésével a mérési eredmények variabilitása csökken (Vig et al., 2011), viszont a páratartalom variabilitásra gyakorolt hatása a mérési magasság növekedésével növekszik.

Az NDVI érték alapján történő nitrogénellátottság pontosabb meghatározása érdekében, szükségesnek tartjuk a páratartalom, az NDVI érték és a levelek nitrogéntartalma közötti összefüggések vizsgálatát, melynek célunk az NDVI alapján történő nitrogénhiány

pontosabb meghatározásához szükséges korrekciós tényezők megállapítása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció elkészítését az FP7-REGPOT-2010-1 UD_AGR_REPO, a Kutatási és Technológiai Alap

OM-00210/2008, a MTA-DE Földművelési és Területfejlesztési Kutatócsoport és a TÁMOP 4.2.2./B-10/1-2010-0024 számú projektek támogatták. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOM

- Aparicio, N.–Villegas, D.–Casadesus, J.–Araus, J. L.–Royo, C. (2000): Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*. 92. 1: 83–91.
- Aparicio, N.–Villegas, D.–Araus, J. L.–Casadesus, J.–Royo, C. (2002): Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science*. 42. 5: 1547–1555.
- Ángyán J. (1985): Nagyüzemi árukukorica-termesztés – A kukorica-termesztés területi elhelyezése. [In: Menyhért Z. (szerk.) A kukoricatermesztés kézikönyve.] Mezőgazdasági Kiadó. Budapest. 199–228.
- Boegh, E.–Soegaard, H.–Broge, N.–Hasager, C. B.–Jensen, N. O.–Schelde, K.–Thomsen, A. (2002): Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 81. 2–3: 179–193.
- Blackmer, T. M.–Schepers, J. S. (1994): Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 25. 9–10: 1791–1800.
- Brown, J. S. (1969): Absorption and fluorescence of chlorophyll a in particle fractions from different plants. *Biophysical Journal*. 9. 12: 1542–1552.
- Chapman, S. C.–Barreto, H. J. (1997): Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. *Agronomy Journal*. 89. 2: 557–562.
- Chung, B.–Girma, K.–Martin, K. L.–Tubaña, B. S.–Arnall, D. B.–Walsh, O.–Raun, W. R. (2008): Determination of optimum resolution for predicting corn grain yield using sensor measurements. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 54. 5: 481–491.
- Cui, D.–Li, M.–Zhang, Q. (2009): Development of an optical sensor for crop leaf chlorophyll content detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. 69. 2: 171–176.
- Evans, J. R. (1983): Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*. 72. 2: 297–302.
- Evans, J. R. (1989): Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*. 78. 1: 9–19.
- Feibo, W.–Lianghuan, W.–Fuhua, X. (1998): Chlorophyll meter to predict nitrogen sidedress requirements for short-season cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Research*. 56. 3: 309–314.
- Fox, R. H.–Kern, J. M.–Piekielek, W. P. (1994): Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptake. *Agronomy Journal*. 78. 4: 741–746.
- Freeman, K. W.–Girma, K.–Arnall, D. B.–Mullen, R. W.–Martin, K. L.–Roger K.–Teal, R. K.–Raun, W. R. (2007): By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. *Agronomy Journal*. 99. 2: 530–536.
- Hancock, D. W.–Dougherty, C. T. (2007): Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa. *Crop Science*. 47. 6: 2547–2556.
- Hong, S.–D.–Schepers, J. S.–Francis, D. D.–Schlemmer, M. R. (2007): Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38. 15-16: 2209–2226.
- Houlès, V.–Guérif, M.–Mary, B. (2007): Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. *European Journal of Agronomy*. 27. 1: 1–11.
- Iida, K.–Suguri, M.–Umeda, M.–Matsui, T. (2000): Estimation of nitrogen content using machine vision in a paddy field. [In: 2000 ASAE Annual International Meeting.] 9–12 July 2000, Milwaukee. Wisconsin. USA. 1–21.
- Justes, E.–Jeuffroy, M. H.–Mary, B. (1997): Wheat, barley, and durum wheat. [In: Lemaire, G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*.] Springer-Verlag. Berlin. 73–91.
- Knight, J.–Lunetta, R.–Ediriwickrema, J.–Khorram, S. (2006): Regional scale land cover characterization using MODIS-NDVI 250 m Multi-Temporal Imagery: A phenology-based approach. *GIScience & Remote Sensing*. 43. 1: 1–23.
- Lemaire, G.–Jeuffroy M.–H.–Gastal, F. (2008): Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*. 28. 4: 614–624.
- Martin, K. L.–Girma, K.–Freeman, K. W.–Teal, R. K.–Tubaña, B.–Arnall, D. B.–Chung, B.–Walsh, O.–Solie, J. B.–Stone, M. L.–Raun, W. R. (2007): Expression of variability in corn as influenced by growth stage using optical sensor measurements. *Agronomy Journal*. 99. 2: 384–389.
- Murata, N.–Sato, N. (1978): Studies on the absorption spectra of chlorophyll a in aqueous dispersions of lipids from the photosynthetic membranes. *Plant and Cell Physiology*. 19. 3: 401–410.
- Nambuthiri, S. S. (2010): Soil water and crop growth processes in a farmer's field. PhD Dissertation. College of Agriculture at the University of Kentucky. Lexington. Kentucky. USA.
- NTech Industries Inc. (2007): Operating Manual of GreenSeeker Model 505. Ukiah. California. United States of America.
- Rambo, L.–Mal, B.–L.–Xiong, Y.–da Silvia, P. R. F. (2010): Leaf and canopy optical characteristics as crop-N-status indicators for field nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 173. 3: 434–443.
- Ren, J.–Chen, Z.–Zhou, Q.–Tang, H. (2008): Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*. 10. 4: 303–413.
- Roderick, M.–Smith, R.–Cridland, S. (1996): The precision of the NDVI derived from AVHRR observations. *Remote Sensing of Environment*. 56. 1: 57–65.
- Rouse, J. W.–Haas, R. H.–Schell, J. A.–Deering, D. W. (1973): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. [In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351 I.*] December 10–14, 1973. Washington. 309–317.

- Senders, V. L. (1958): Measurement and statistics. Oxford University Press. New York.
- Singh, I.–Srivastava, A. K.–Chandna, P.–Gupta, R. K. (2006): Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: potential and constraints. Sugar Tech. 8. 4 : 299–302.
- Teal, R. K.–Tubana, B.–Girma, K.–Freeman, K. W.–Arnall, D. B.–Walsh, O.–Raun, W. R. (2006): In-season prediction of corn grain yield potential using Normalized Difference Vegetation Index. Agronomy Journal. 98. 6: 1488–1494.
- Vig R.–Dobos A.–Nagy J. (2011): A normalizált vegetációs index (NDVI) mérésének módszertani vizsgálata lucernában (*Medicago sativa* L.). Növénytermelés. 60. 3: 111–126.
- Viña, A.–Gitelson, A. A.–Rundquist, D. C.–Keydan, G.–Leavitt, B.–Schepers, J. (2004): Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. Agronomy Journal. 96. 4: 1139–1147.
- Wang, Q.–Tenhunen, J. D. (2004): Vegetation mapping with multi-temporal NDVI in North Eastern China Transect (NECT). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 6. 1: 17–31.
- Wei, Y.–Minzan, L.–Sigrimis, N. (2010): Estimating nitrogen content of cucumber leaves based on NIR spectroscopy. Sensor Letters. 8. 1: 145–150.
- Wright, D. L.–Rasmussen, V. P.–Ramsey, R. D.–Baker, D. J.–Ellsworth, J. W. (2007): Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. GIScience & Remote Sensing. 41. 4: 1548–1603.
- Yadava, U. L. (1986): A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves. HortScience. 21. 6: 1449–1450.
- Zhang, J.–Han, C.–Li, D. (2009): New vegetation index monitoring rice chlorophyll concentration using leaf transmittance spectra. Sensor Letters. 7. 6: 1–6.

