

A normalizált vegetációs index (NDVI) mérésének módszertani vizsgálata lucernában (*Medicago sativa* L.)

¹VIG RÓBERT-¹DOBOS ATTILA-²NAGY JÁNOS

¹MTA-DE Földművelési és Területfejlesztési Kutatócsoport, Debrecen

²Debreceni Egyetem AGTC Földhasznosítási, Műszaki és Területfejlesztési Intézet, Debrecen

Összefoglalás

A növényállomány klorofilltartalma és nitrogénellátottsága közvetve is mérhető nem destruktív, optikai mérőműszerekkel, melyek alkalmazásával lehetővé válik a növényállomány nitrogénellátottságának mérése, térképezése, valamint a nitrogénhiány differenciált pótlása. A GreenSeeker Model 505 készülék a relatív klorofilltartalmat vegetációs index (NDVI) formájában határozza meg, amit a növényállományról visszaverődött vörös és infravörös fénysugarak intenzitása alapján kalkulál. A nitrogénellátottság indirekt meghatározása során fontos ismernünk, hogy az optikai mérés eredménye hogyan változik a térben és az időben, valamint milyen összefüggést mutat a környezeti tényezőkkel.

A GreenSeeker Model 505 lucerna-állományban történő tesztelése során megállapítottuk, hogy a mérési eredmények és azok variabilitása a napszaknak és az alkalmazott mérési magasságnak megfelelően változnak. A növényállomány feletti 20 centiméteres mérési magasságban a mért értékek nagyobbak és variabilitásuk nagyobb, mint 40 és 100 cm közötti mérési magasságot alkalmazva. A 20 centiméteres mérési magasság esetében a 08:00, 11:00, 14:00 és 17:00 órákor végzett mérések eredményei között nem adódott különbség, viszont a mérési magasság növekedésével a különböző időpontokban végzett mérések eredményei közötti különbségek egyre jelentősebbé váltak. A mérési eredmények a későbbi mérési időpontokban egyre növekedtek variabilitásuk pedig csökkent.

Véleményünk szerint a mérési eredmények változékonysága a hőmérséklet, a páratartalom és a fényviszonyok változásával áll összefüggésben, ezért a továbbiakban fon-

tosnak tartjuk annak vizsgálatát, hogy a normalizált vegetációs index és a nitrogénellátottság közötti összefüggést, hogyan befolyásolják az időjárási paraméterekben bekövetkező változások.

Kulcsszavak: lucerna, NDVI, GreenSeeker, mérési magasság, mérési idő

Methodological examination of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) measurements in alfalfa (*Medicago sativa* L.)

¹R. VIG–¹A. DOBOS–²J. NAGY

¹Hungarian Academy of Sciences – University of Debrecen, Research Group of Cultivation and Regional Development, Debrecen

²University of Debrecen, Center of Agricultural Sciences and Engineering, Institute for Land Utilisation, Technology and Regional Development, Debrecen

Summary

The chlorophyll content and level of nitrogen supply of the crop stand can also be measured indirectly with non-destructive optical instruments that make it possible to map a crop stand and to replenish nitrogen in a differentiated way. GreenSeeker Model 505 measures the relative chlorophyll content in the form of vegetation index (NDVI) which is calculated on the basis of the intensity of red and infrared rays reflected from the crop stand. During the indirect determination of nitrogen supply, it is important to know how the results of the optical measurement change in space and time and what correlation they have with environmental factors.

During the testing of GreenSeeker Model 505 in an alfalfa stand, it was established that the measurement results and their variability change in accordance with the given part of the day and the applied measurement height. At the 20 cm measurement height above the crop stand, the measured values and their variability are higher than those at the height values between 40 and 100 cm. There was no difference between the results of the measurements taken at 08:00 a.m., 11:00 a.m., 02:00 p.m. and 05:00 p.m. at the 20 measurement height, but the difference between various measurement times became increasingly significant with the increase of measurement heights. Measurement results

increased at later measurement times, while their variability decreased. In our opinions, the variability of measurement results is related to the change in temperature, humidity and light; therefore, we consider it important to examine how changes in weather parameters influence the correlation between normalized difference vegetation index and nitrogen supply.

Key words: alfalfa, NDVI, GreenSeeker, measurement height, measurement time

Методическое исследование измерения нормализованного вегетационного индекса (NDVI) в люцерне (*Medicago sativa* L.)

¹Р. ВИГ–¹А. ДОБОШ–²Я. НАДЬ

¹Исследовательская группа Земледелия и Развития территорий Дебреценского Университета - Венгерская Академия Наук, Дебрецен

²Институт Землепользования, Техники и Развития территорий Центра Агро-Экономических Наук Дебреценского Университета, Дебрецен

Резюме

Содержание хлорофила растительным насаждением и обеспеченность азотом непосредственно и вычисляемо недеструктивными, оптическими измерительными приборами, с применением которых становится возможным измерение обеспеченности азотом растительного насаждения, его картография, а также дифференцированное дополнение недостатка азота. Прибор GreenSeeker Model 505 в форме вегетационного индекса (NDVI) определяет релятивное содержание хлорофила, которое вычисляет на основании интенсивности отражённых от растительного насаждения красных и инфро-красных световых лучей. В ходе индиректного определения обеспеченности азотом важно узнать, как меняется результат оптического измерения в пространстве и времени, и какую связь показывает с факторами окружающей среды.

В ходе тестирования прибора GreenSeeker Model 505 в насаждении люцерны установили, что результаты измерений и их изменчивость изменяются соответственно периоду дня и применённой высоте измерения. В 20-и сантиметровой высоте над

растительным насаждением измеренные показатели были выше, а их изменчивость больше, чем при использовании высоты измерения от 40 до 100 см. В случае 20-и сантиметровой высоты измерения в результатах, проведенных в 08:00, в 11:00, в 14:00 и в 17:00 измерений не было разницы, однако с ростом высоты измерения среди результатов проведенных в разное время измерений различия становились всё значительнее. Результаты измерений в более поздних сроках измерения увеличивались, а их изменчивость уменьшалась.

По-нашему мнению изменчивость результатов измерений связана с изменением температуры, влажности и световых условий, поэтому в дальнейшем считаем важным исследование того, какая связь между нормализованным вегетационным индексом и обеспеченностью азотом, как влияют в погодных параметрах наступившие изменения.

Ключевые слова: люцерна, NDVI, GreenSeeker, высота измерения, время измерения

Bevezetés, irodalmi áttekintés

Környezetvédelmi és gazdasági szempontok a nitrogéntrágyázás dózis-szükségletének és időpontjának precíz meghatározását indokolják (*Gastal és Lemaire 2002, Berenguer et al. 2009*), amit a növények nitrogénellátottságára szükséges alapozni (*Jia et al. 2004, Cartelat et al. 2005, Arregui et al. 2006*). A növények nitrogénellátottsága jól jellemezhető a nitrogéntápláltsági-index (NNI, Nitrogen Nutrition Index) meghatározásával, amit az aktuális nitrogéntartalom (Na) és a maximális növényi növekedéshez minimálisan szükséges nitrogéntartalom (kritikus nitrogéntartalom, Nc) arányaként határoznak meg: $NNI = Na/Nc$ (*Lemaire és Gastal 1997, Lemaire et al. 1989, 2008*). A növények aktuális nitrogéntartalmának meghatározása destruktív laborvizsgálatokat igényel, melyek hátránya, hogy munka-, idő- és költségigényesek, ezért a gyakorlatban gyorsan meghatározható indexek alkalmazását kell bevezetni (*Blackmer és Schepers 1994, Chapman és Barreto 1997, Justes et al. 1997*).

A növények nitrogénellátottságára következtethetünk a levelek klorofill-tartalmából, ugyanis a klorofill mennyisége szoros, pozitív, lineáris összefüggésben áll a levelek nitrogéntartalmával (*Evans 1983, 1989, Houlès et al. 2007*), ami abból adódik, hogy a nitrogén strukturális eleme a klorofill-molekuláknak (*Hikosaka és Terashima 1996*). A klorofill mennyisége indirekt módon mérhető

a klorofill molekulák fényelnyelésén alapuló, gyors, nem destruktív, optikai módszerekkel (Yadava 1986, Castelli et al. 1996). A módszer azon alapszik, hogy a klorofillmolekulák a fénysugarakat az infravörös tartományban átengedik, míg a látható vörös tartományban elnyelik (Brown 1969, Murata és Sato 1978), így az infravörös és a vörös fényintenzitások arányosításával olyan indexek képezhetők, melyek alkalmasak a klorofilltartalom és a nitrogénellátottság becslésére (Roderick et al. 1996, Zhang et al. 2009). A gyakorlatban a két leggyakrabban alkalmazott index a SPAD érték (Soil Plant Analysis Development) és az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Tucker 1979, Scheepers et al. 1992, Plant 2001, Perry és Davenport 2007).

A Minolta SPAD-502 mérőkészülék a SPAD értéket a levélen áthaladt vörös fénysugarak (650 nm) és infravörös fénysugarak (940 nm) intenzitása alapján kalkulálja: $SPAD = NIR / RED$ ahol NIR=az infravörös fény intenzitása és RED=a vörös fény intenzitása (Minolta Camera Co. Ltd. 1989). Ezzel ellentétben a GreenSeeker Model 505 mérőkészülék NDVI értéket határoz meg a lombozatról visszaverődött vörös (660 nm) és infravörös (770 nm) fénysugarak intenzitása alapján (NTech Industries Inc. 2007): $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, ahol NIR=az infravörös fény intenzitása és RED=a vörös fény intenzitása (Rouse et al. 1973).

A készülék eddigi tesztelése elsősorban kapás kultúrákban történt, ezért szükségesnek tartjuk a mérési módszerek zárt növényállományokban történő értékelését. Vizsgálataink célja annak megállapítása, hogy a környezeti feltételek hogyan befolyásolják az NDVI és a nitrogénellátottság közötti összefüggést. A vizsgálatok első lépéseként jelen tanulmányunkban az NDVI érték, az NDVI variabilitása, a mérési magasság és a mérési idő közötti összefüggéseket értékeljük.

Anyag és módszer

Vizsgálatainkat a Debreceni Egyetem Kertészeti Intézetének bemutatókertjében, csernozjom talajon végeztük. A mérés helyszínéül 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 méterre, 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 szélesség- és széliránymérő (R. M. Young Co., USA), CMP3 sugárzásmérő (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. A különböző időpontokban és a különböző mérési magasságokban meghatározott értékek a Kolmogorov-Smirnov teszt alapján normál eloszlást mutattak, ezért a mérési eredményeket egytényezős varianciaanalízissel (ANOVA) értékeltük 0,1 százalékos és 5,0 százalékos szignifikancia szinten. A középértékek szimultán összehasonlítását Duncan vagy Games-Howell teszttel végeztük, annak függvényében, hogy a Levene teszt a vizsgált változók varianciájának azonosságát vagy különbözőségét igazolta.

A mérési eredményekben jelentkező átlagos differenciát százalékos értékben határoztuk meg az alábbi képlet alapján: $MD_{\%} = \frac{M_x - M_y}{M_y/100}$, ahol $MD_{\%}$ =átlagos differencia, M_x =az x mérési magasságban vagy az x mérési időpontban mért eredmények átlaga, M_y =az y mérési magasságban vagy az y mérési időpontban mért eredmények átlaga, valamint $M_x > M_y$. A mérési ered-

ményekben jelentkező variabilitást a variációs koefficienssel jellemeztük, vagyis a szórást az átlagérték százalékában fejeztük ki: $CV_{\%} = Sd / (M / 100)$, ahol $CV_{\%}$ = variációs koefficiens, Sd = szórás, M = átlag (Senders 1958).

A különböző mérési magasságokban és a különböző mérési időpontokban meghatározott értékek átlaga és variációs koefficiense közötti összefüggéseket lineáris, négyzetes, harmadfokú és exponenciális regresszió-analízissel vizsgáltuk 0,1 százalékos és 5,0 százalékos szignifikancia szinten.

Kísérleti eredmények

A GreenSeeker Model 505 mérőkészüléket elsősorban a nitrogénellátottság becslésére, a nitrogén műtrágya-dózisok meghatározására, az NDVI és a növényi növekedés, az NDVI és a termés mennyisége, valamint az NDVI és a termés minősége közötti összefüggések vizsgálatára alkalmazzák a kutatómunkában és a gyakorlatban (Raun et al. 2005, Nambuthiri 2010, Rambo et al. 2010). A mérések során a készüléket forgalmazó cég a növényállomány feletti 32–48 inch (81–122 cm) mérési magasságot javasolja az NDVI meghatározásához, viszont nem ad információt arra vonatkozóan, hogy a mérési eredményeket a mérés időpontja milyen mértékben befolyásolja (NTech Industries Inc. 2007). Vizsgálati eredményeink alapján igazoltuk, hogy a mérési magasság a javasolt 81–122 centiméternél tágabb határok között is alkalmazható, ugyanis a mérési eredményeinkben 40–100 cm mérési magasságot alkalmazva nem adódott szignifikáns különbség.

A négy vizsgált mérési időpontban a 40, 60, 80 és 100 cm magasságban mért NDVI értékek között nem adódott statisztikailag igazolható különbség, míg a 20 centiméteren mért értékek $p < 0,001$ szinten szignifikánsan alacsonyabbnak bizonyultak, mint a nagyobb magasságokban végzett mérések eredményei (1. táblázat).

A mért értékek átlaga (M) a délelőtti óráktól a délutáni órák felé haladva növekedett, míg az öt mérési magasság közötti átlagos differencia ($MD_{\%}$) a 08:00 órás mérés esetében volt a legnagyobb, a másik három mérési időpontban pedig közel hasonlóan alakult. A 20 centiméteren végzett mérési eredmények átlagos eltérése a 40–100 centiméteren végzett mérések eredményeitől ($MD20_{\%}$) minden mérési időpontban jelentősen elmaradt a 40–100 centiméteres mérések közötti átlagos eltérésektől ($MD40-100_{\%}$) (1. táblázat).

1. táblázat. A különböző mérési magasságokban végzett mérések statisztikai értékelésének eredménytáblázata

Mérési magasság (cm)	A mérés időpontja				
	(1)	08:00	11:00	14:00	17:00
20		0,900±0,032 a	0,895±0,032 a	0,904±0,037 a	0,911±0,039 a
40		0,835±0,034 b	0,859±0,017 b	0,862±0,021 b	0,864±0,021 b
60		0,837±0,042 b	0,855±0,015 b	0,859±0,017 b	0,863±0,018 b
80		0,841±0,045 b	0,856±0,015 b	0,860±0,018 b	0,872±0,019 b
100		0,837±0,042 b	0,852±0,017 b	0,854±0,024 b	0,873±0,020 b
F-érték (3)		30,9***	47,6***	34,6***	31,9***
M		0,850	0,863	0,868	0,877
MD _%		3,2	2,1	2,4	2,4
MD20 _%		7,5	4,6	5,3	5,0
MD40-100 _%		0,4	0,4	0,5	0,7
CV _%		2,1	1,7	1,9	1,7
CV20 _%		2,5	2,0	2,7	2,1
CV40-100 _%		2,0	1,6	1,7	1,6

*** $p < 0,001$, M=átlag, MD_%=az öt mérési magasság eredményeiben jelentkező átlagos differencia, MD20_%=a 20 centiméteren mért eredmények átlagos eltérése a 40, 60, 80 és 100 centiméteren mért értékektől, MD40-100_%=a 40, 60, 80 és 100 centiméteres magasságban végzett mérések eredményeinek átlagos eltérése, CV_%=az öt mérési magasság eredményeinek variációs koefficiense, CV20_%=a 20 centiméteres mérések eredményeinek variációs koefficiense, CV40-100_%=a 40 és 100 centiméter között végzett mérések eredményeinek variációs koefficiense.

Table 1. Results of the statistical evaluation of measurements performed at different heights. (1) Measurement height (cm), (2) Measurement time, (3) F value. *** $p < 0.001$, M=mean, MD_%= mean difference of the results obtained at five different measurement heights, MD20_%=mean difference between results obtained at 20 cm and those measured at 40, 60, 80 and 100 cm, MD40-100_%= mean difference between measurement results obtained at 40, 60, 80 and 100 cm, CV_%=coefficient of variation of the five different measurement heights, CV20_%=coefficient of variation of the measurement results obtained at 20 cm, CV40-100_%=coefficient of variation between the measurement results obtained at 40 and 100 cm.

Martin et al. (2007) vizsgálataik során megállapították, hogy a GreenSeeker Model 505 készülékkel végzett NDVI-mérések eredménye, valamint a mért értékek variabilitása (CV_%) a vegetációs időszak különböző időpontjaiban eltérően alakult, amit a növényi fejlődéssel hoztak összefüggésbe. Vizsgálati eredményeink azt igazolják, hogy a növény adott fejlődési stádiumában a mérési eredmények és azok variabilitása attól függően is változik, hogy a méréseket

a nap melyik időszakában végezzük. Az NDVI variabilitása ($CV_{\%}$) a 08:00 órákor végzett mérések esetében volt a legnagyobb, míg a későbbi időpontok mérési eredményeinek variációs koefficiense közel hasonlóan alakult, és alacsonyabbnak bizonyult, mint az első mérési időpontban. A variációs koefficiens függ az alkalmazott mérési magasságtól is, ugyanis a 20 centiméteren mért értékek variációs koefficiense ($CV_{20\%}$) mindegyik mérési időpontban magasabb volt, mint a 40–100 centiméteren mért értékek variációs koefficiense ($CV_{40-100\%}$) (1. táblázat).

A különböző mérési magasságokban összehasonlítottuk az alkalmazott mérési időpontok eredményeiben jelentkező különbségeket. Húsz centiméteres mérési magasságot alkalmazva a különböző időpontokban végzett mérések eredményei között nem adódott statisztikai értelemben vett különbség, míg a többi mérési magasság esetében $p < 0,001$ szinten szignifikáns különbségek jelentkeztek. A 40 és 60 centiméteres magasságban történő mérések esetén a 08:00 órákor mért értékek szignifikánsan alacsonyabbak voltak, mint a későbbi időpontok mérési eredményei, valamint nem jelentkezett statisztikailag igazolható különbség a 11:00, 14:00 és 17:00 órás mérések között. A 80 és 100 centiméter magasságban mért NDVI jelentősebb különbséget mutatott a mérési időpontok között, mint az alacsonyabb mérési magasságokban. A 08:00 órákor mért értékek szignifikánsan alacsonyabbnak, míg a 17:00 órákor mért értékek szignifikánsan magasabbnak bizonyultak, mint a többi mérési időpontban, valamint a 11:00 és 14:00 órákor végzett mérések eredményei között nem adódott igazolható különbség (2. táblázat).

A mért értékek átlaga (M) 20 centiméteren volt a legnagyobb, míg a többi mérési magasságban közel hasonlóan alakult. A mérési magasság növekedésével a különböző mérési időpontok közötti átlagos differencia ($MD_{\%}$) növekedett, a különböző mérési időpontokban mért értékek közötti variabilitás ($CV_{\%}$) pedig csökkent (2. táblázat).

Számos szerző foglalkozott a mért értékek átlaga és variációs koefficiense közötti összefüggésekkel. A terméssel kapcsolatban többen megállapították, hogy a növekvő termésátlag a terméseredményekben jelentkező variációs koefficiens csökkenésével jár együtt (Taylor et al. 1999, Martin et al. 2005), ami abból adódik, hogy az eredmények szórása kisebb mértékben nő, mint az eredmények átlaga (Taylor et al. 1999, Dobermann et al. 2003). Az NDVI mérés eredményeiben is hasonló tendencia figyelhető meg, ugyanis a növekvő átlagos NDVI értékekhez a mérési eredmények variációs koefficiensének csökkenése

párosul (Raun et al. 2005, Martin et al. 2007). Vizsgálati eredményeink a fenti megállapításokat alátámasztják.

2. táblázat. A különböző mérési időpontokban végzett mérések statisztikai értékelésének eredménytáblázata

Mérés ideje (óra) (1)	Mérési magasság (cm) (2)				
	20	40	60	80	100
08:00	0,900 ±	0,835 ±	0,837 ±	0,841 ±	0,837 ±
	0,032	0,034 b	0,042 b	0,045 c	0,042 c
11:00	0,895 ±	0,859 ±	0,855 ±	0,856 ±	0,852 ±
	0,032	0,017 a	0,015 a	0,015 b	0,017 b
14:00	0,904 ±	0,862 ±	0,859 ±	0,860 ±	0,854 ±
	0,037	0,021 a	0,017 a	0,018 b	0,024 b
17:00	0,911 ±	0,864 ±	0,863 ±	0,872 ±	0,873 ±
	0,039	0,021 a	0,018 a	0,019 a	0,020 a
F-érték (3)	1,968 ^a	18,2 ^{***}	10,7 ^{***}	11,8 ^{***}	15,2 ^{***}
M	0,903	0,855	0,854	0,857	0,854
MD _%	1,0	1,8	1,6	1,9	2,2
CV _%	2,3	1,8	1,7	1,6	1,7

n=nincs szignifikáns különbség, ***p<0,001, M=átlag, MD_%=a különböző mérési időpontokban meghatározott értékek közötti átlagos differencia, CV_%=a különböző időpontokban meghatározott értékek átlagos variációs koefficiense.

Table 2. Results of the statistical evaluation of measurements performed at different times. (1) Measurement time (hour), (2) Measurement height (cm), (3) F value. n=no significant difference, ***p<0.001, M=mean, MD_%=mean difference of the results obtained at different measurement times, CV_%=coefficient of variation of the different measurement times.

A mérési eredmények átlaga és variációs koefficiense közötti összefüggéseket lineáris, négyzetes, harmadfokú és exponenciális regresszió-analízissel értékelve a legszorosabb összefüggést minden esetben négyzetes regresszió-analízist alkalmazva kaptuk. A különböző mérési magasságokban az összefüggés erőssége az alkalmazott mérési magasság függvényében változott. A regresszió a 20, 40, 60 és 80 centiméteres mérési magasságokban p<0,001 szinten, míg a 100 centiméteres mérési magasságban p<0,05 szinten bizonyult szignifikánsnak. A korrelációs koefficiens alapján az összefüggés a 20–80 centiméter magasságban végzett mérések esetében erős (0,7<R), a 100 centiméteres mé-

résre vonatkozóan közepes volt ($R=0,5-0,6$), valamint az összefüggés erőssége a mérési magasság növekedésével csökkent. A determinációs együttható (R^2) a 20 centiméteres mérési magasságban az átlag és a mért értékek variabilitása közötti 65,9 százalékos, míg a 100 centiméteres mérési magasságban már csak 37,1 százalékos összefüggést mutatott (3. táblázat). A regresszió minden esetben negatív irányú volt, vagyis az átlagértékek növekedésével a variabilitás csökkent.

3. táblázat. Az NDVI mérés átlaga és a mért értékek variációs koefficiense közötti összefüggés a különböző mérési magasságokban

Mérési magasság (cm)	R^2	R	F	Regressziós egyenlet
(1)				(2)
20	0,659	0,812	18,4 ^{***}	$248,8 - 522,8x + 276,3x^2$
40	0,557	0,746	11,9 ^{**}	$-143,7 + 376,3x - 249,9x^2$
60	0,582	0,763	13,2 ^{**}	$-44,7 + 133,9x - 93,2x^2$
80	0,543	0,737	11,3 ^{**}	$-11,7 + 51,5x - 41,9x^2$
100	0,371	0,609	5,6	$-70,0 + 187,2x - 120,7x^2$

*** $p<0,001$, ** $p<0,05$, R^2 =determinációs együttható, R=korrelációs koefficiens, F=F-próbastatisztika.

Table 3. Correlation between the mean results of the NDVI measurement and the coefficient of variation of these results at different measurement heights. (1) Measurement height (cm), (2) Regression equation. *** $p<0.001$, ** $p<0.05$, R^2 =coefficient of determination, R=coefficient of correlation, F=F statistics.

Az átlagértékek és a variációs koefficiens közötti összefüggés a mérési időpont függvényében is változott. A regresszió a 08:00 órakor végzett mérések esetében $p<0,05$ szinten, a 17:00 órás mérésekre vonatkozóan $p<0,001$ szinten szignifikánsnak bizonyult, míg a 11:00 és 14:00 órás mérések átlagértéke és variációs koefficiense között nem adódott szignifikáns összefüggés (4. táblázat).

A korrelációs koefficiens alapján a 08:00 órára vonatkozó regresszió gyengének, a 17:00 órára vonatkozó összefüggés pedig erősnek bizonyult. A determinációs együttható 08:00 órás mérési időpontot alkalmazva az átlagérték és a variációs koefficiens 21,9 százalékos, 17:00 órás mérési időpontot alkalmazva a két vizsgált mutató 80,8 százalékos összefüggését igazolta (4. táblázat).

4. táblázat. Az NDVI mérés átlaga és a mért értékek variációs koefficiense közötti összefüggés a különböző mérési időpontokban

Mérés ideje (óra) (1)	R ²	R	F	Regressziós egyenlet (2)
08:00	0,219	0,468	3,8	56,0 - 122,1x + 68,8x ²
11:00	0,031	0,176	0,4 ⁿ	63,0 - 136,1x + 75,3x ²
14:00	0,104	0,322	1,3 ⁿ	210,0 - 468,2x + 262,9x ²
17:00	0,808	0,899	46,2 ^{**}	689,0 - 1536,7x + 857,9x ²

***p<0,001, *p<0,05, n=nincs szignifikáns összefüggés, R²=determinációs együttható, R=korrelációs koefficiens, F=F-próbastatisztika.

Table 4. Correlation between the mean results of the NDVI measurement and the coefficient of variation of these results at different measurement times. (1) Measurement height (cm), (2) Regression equation. ***p<0.001, *p<0.05, n=no significant correlation, R²=coefficient of determination, R=coefficient of correlation, F=F statistics.

Következtetések

A vizsgálati eredmények alapján megállapítottuk, hogy a GreenSeeker Model 505 mérőkészülék mérési eredményeit a mérési magasság kis mértékben befolyásolja. A növényállomány feletti 20 centiméteres magasságban végzett mérések eredménye meghaladja a 40–100 cm magasságban mért értékeket, viszont a 40, 60, 80 és 100 centiméteres mérési magasságok alkalmazása esetén a mérési eredmények között nem jelentkezett igazolható különbség. Ezek az eredmények azt támasztják alá, hogy a forgalmazó cég által javasolt legalább 81 centiméteres mérési magasságnál alacsonyabb mérési magasság (40 cm) is alkalmazható a lucernában.

A mérés időpontja az alkalmazott mérési magasságtól függően eltérő mértékben befolyásolta a mérés eredményét. A különböző időpontokban végzett mérések eredményei között a legnagyobb eltérés a 80 és 100 centiméteres mérési magasság esetében jelentkezett. Véleményünk szerint a mért értékek napszakos változása az időjárási paraméterek napszakos változásával lehet összefüggésben, ezért szükségesnek tartjuk az időjárási paraméterek változása és az NDVI érték változása közötti összefüggések vizsgálatát.

Minél kisebb a mérési eredmények variabilitása annál pontosabban becsülhető az NDVI értékek alapján a növényállomány nitrogénellátottsága. A variációs koefficiens a 20 centiméteres mérési magasságban volt a legnagyobb, míg 40–100 centiméteres mérési magasságot alkalmazva alacsonyabbnak bizonyult.

A mérési időpontokat tekintve a legnagyobb variabilitás a 08:00 órás mérés esetében jelentkezett, a későbbi időpontokban végzett mérések eredményeinek variabilitása alacsonyabb és közel hasonló volt. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a lucernában az NDVI-mérés a 40 cm feletti mérési magasság és a 08:00 óránál későbbi mérési időpont alkalmazásával végezhető a mért értékek lehető legkisebb variabilitásával.

Az átlagértékek és a variációs koefficiensek közötti összefüggések vizsgálata során arra a következtetésre jutottunk, hogy a mért értékek átlagának növekedésével a mért értékek variabilitása csökken. Ebből adódóan a nitrogénellátottság pontosabb becsléséhez az alacsonyabb NDVI értékű növény-állományokban a mérési szám növelése szükséges.

Az eredmények értékelése során figyelembe kell venni, hogy a vizsgálatokat lucerna-állományban végeztük, melyben a talaj reflektanciája kevésbé befolyásolja az NDVI-mérés eredményét, mint a nyitottabb növénykultúrákban. Véleményünk szerint a vizsgálatokat más kultúrákban is célszerű elvégezni, ugyanis az optimális mérési magasság növénykultúránként változhat annak függvényében, hogy milyen mértékű a növényborítottság.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció elkészítését a Nemzeti Technológiai Program (NKTH 00 210/2008), a MTA-DE Földművelési és Területfejlesztési Kutatócsoport és a TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KONV-2010-0007 támogatta.

IRODALOM

- Arregui, L. M.–Lasa, B.–Lafarga, A.–Iraneta, I.–Baroja, E.–Quemada, M.*: 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 24. 2: 140–148.
- Ángyán, J.*: 1985. Nagyüzemi árukukorica-termesztés - A kukoricatermesztés területi elhelyezése. [In: Menyhért Z. (szerk.) A kukoricatermesztés kézikönyve.] Mezőgazdasági Kiadó. Budapest. 199–228.
- Berenguer, P.–Santiveri, F.–Boixadera, J.–Lloveras, J.*: 2009. Nitrogen fertilisation of irrigated maize under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 30. 3: 163–171.
- 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.
- Cartelat, A.–Cerovic, Z. G.–Goulas, Y.–Meyer, S.–Lelarge, C.–Prioul, J.–L.–Barbottin, A.–Jeuffroy, M.–H.–Gate, P.–Agati, G.–Moya, I.*: 2005. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*. 91. 1: 35–49.
- Castelli, F.–Contillo, R.–Miceli, F.*: 1996. Non-destructive determination of leaf chlorophyll content in four crop species. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 177. 4: 275–283.
- 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.
- Dobermann, A.–Ping, J. L.–Adamchuk, V. I.–Simbahan, G. C.–Ferguson, R. B.*: 2003. Classification of Crop Yield Variability in Irrigated Production Fields. *Agronomy Journal*. 95. 5: 1105–1120.
- 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.
- Gastal, F.–Lemaire, G.*: 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. 53. 370: 789–799.
- Hikosaka, K.–Terashima, I.*: 1996. Nitrogen partitioning among photosynthetic components and its consequence in sun and shade plants. *Functional Ecology*. 10. 3: 335–343.
- Houlès, V.–Guéris, 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.
- Jia, L.–Buerkert, A.–Chen, X.–Roemheld, V.–Zhang, F.*: 2004. Low-altitude aerial photography for optimum N fertilization of winter wheat on the North China Plain. *Field Crops Research*. 89. 2–3: 389–395.
- 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.
- Lemaire, G.–Gastal, F.*: 1997. N uptake and distribution in plant canopies. [In: Lemaire, G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops.*] Springer-Verlag, Berlin. 3–45.
- Lemaire, G.–Gastal, F.–Salette, J.*: 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. *Proceedings of the XVI. International Grassland Congress*. Nice. France. 179–180.
- 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.–Hodgen, P. J.–Freeman, K. W.–Melchiori, R.–Arnall, D. B.–Teal, R. K.–Mullen, R. W.–Desta, K.–Phillips, S. B.–Solie, J. B.–Stone, M. L.–Caviglia, O.–Solari, F.–Bianchini, A.–Francis, D. D.–Scheepers, J. S.–Hatfield, J. L.–Raun, W. R.:* 2005. Plant-to-Plant variability in corn production. *Agronomy Journal*. 97. 6: 1603–1611.
- 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.
- Minolta Camera Co. Ltd.:* 1989. Chlorophyll meter SPAD-502. Instruction Manual. Radiometric Instruments Divisions. Osaka. Minolta. 22.
- 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.
- Perry, E. M.–Davenport, J. R.:* 2007. Spectral and spatial differences in response of vegetation indices to nitrogen treatments on apple. *Computers and Electronics in Agriculture*. 59. 1–2: 56–65.
- Plant, R. E.:* 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30. 1–3: 9–29.
- 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.
- Raun, W. R.–Solie, J. B.–Martin, K. L.–Freeman, K. W.–Stone, M. L.–Johnson, G. V.–Mullen, R. W.:* 2005. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. *Journal of Plant Nutrition*. 28. 1: 173–182.
- 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.
- Scheepers, J. S.–Francis, D. D.–Vigil, M.–Below, F. E.:* 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 23. 17–20: 2173–2187.
- Senders, V. L.:* 1958. Measurement and statistics. Oxford University Press. New York.

- Taylor, S. L.–Payton, M. E.–Raun, W. R.:* 1999. Relationship between mean yield, coefficient of variation, mean square error and plot size in wheat field experiments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 30. 9–10: 1439–1447.
- Tucker, C. J.:* 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8. 2: 127–150.
- 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.

A szerzők levelezési címe – Address of the authors:

Dr. Vig Róbert–Dr. Dobos Attila
MTA-DE Földművelési és Területfejlesztési Kutatócsoport
Debrecen
Böszörményi út 138.
H-4032

Dr. Nagy János
Debreceni Egyetem AGTC
Földhasznosítási, Műszaki és Területfejlesztési Intézet
Debrecen
Böszörményi út 138.
H-4032