**Využití družicových snímků pro hodnocení růstu a predikci výnosu polních plodin**

Kumhálová, J.

Je obecně známo, že výnos plodin je ovlivněn různými faktory, které mohou být časově nezávislé (např. topografie, typ půdy a hloubka ornice) nebo jsou proměnné v čase, čili sezónní. Mezi proměnné či sezónní faktory ovlivňující růst a vývoj plodin pak náleží především počasí, přítomnost chorob a plevelů a v současné době tolik diskutované klimatické změny projevující se suchem či nadprůměrnými srážkovými událostmi, nebo i distribuce vláhy pomocí zavlažovacích zařízení (Bégue a kol., 2008).

Růst polních plodin či odhad jejich výnosu může být monitorován různými metodami. Jedna z těch nedestruktivních je využití spektrální odrazivosti zkoumaného porostu. Spektrální charakteristiky porostu lze získat použitím přístrojů umístěných na strojích (např. N sensor, CropSpec, Crop circle ACS, OptRX, ISARIA či GreenSeeker), přičemž některé přístroje jsou určeny pro ruční použití (např. GreenSeeker Handheld Crop Sensor, ruční spektrometry)(Galambošová a kol. 2016). Poslední dobou jsou velmi oblíbené bezpilotní prostředky s různou škálou kamer a s různým počtem a šířkou spektrálních pásem. Snímky z bezpilotních prostředků jsou užitečné především svým vysokým prostorovým rozlišením (až do několika cm/ pixel) a časovou flexibilitou jejich pořízení. Jejich alternativou pak mohou být družicové snímky. Snímky lze členit dle prostorového rozlišení (od velmi vysokého a vysokého - např. 30 cm/pixel, až po ty se středním a nízkým prostorovým rozlišením s velikostí pixelu v desítkách až jednotkách metru). Velmi důležitý parametr je také časové rozlišení, tedy údaj, jak často senzor pořizuje snímky daného území; a samozřejmě i spektrální rozlišení, které udává, ve kterých částech elektromagnetického spektra družice snímá, tedy počet a rozsah jednotlivých spektrálních pásem (Hunt a kol., 2013). Mezi tradiční družicové systémy patří Landsat. Jedná se o snímky v optické části spektra. Jejich benefit spočívá ve volné dostupnosti snímků (např. <https://earthexplorer.usgs.gov/>) s historickou návazností, která zaručuje prověřenost výsledků již po několik desetiletí. Snímky také obsahují více než 7 spektrálních pásem. Nevýhodou je pak jejich nízké až střední prostorové rozlišení (velikost pixelu 30 m) a frekvence snímání jednoho území cca 16 dní (Zhang a Pierce, 2013). V současné době se dají využít snímky z družice Landsat 8 s 11 spektrálními pásmy. Na systém družic Landsat navazuje program Copernicus s družicemi Sentinel. V optické části spektra snímá družice Sentinel 2 (se 13 spektrálními pásmy a prostorovým rozlišením od 10 m do 60 m pro individuální pásma, a časovým rozlišením cca 5 dní) (ESA, 2018); v mikrovlnné části spektra pak družice Sentinel 1. Tyto snímky jsou také volně dostupné (např. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Interpretace optických dat dosáhla v současnosti takové úrovně, kdy je možné na jejich základě vytvářet podklady pro konkrétní agrotechnické zásahy a lze je také relativně spolehlivě využít pro odhad výnosů. Informace z družice Sentinel 1 jsou bohužel zatím v této oblasti ve fázi vývoje a výzkumu, ačkoliv je z dat zřejmá jejich využitelnost pro zemědělskou praxi na základě vývojové křivky tzv. Radar Vegetation Indexu (např. Betbeder a kol., 2016).

Zásadní roli v interpretaci stavu porostů v rostlinné výrobě hraje tzv. spektrální křivka odrazivosti, která je projevem tzv. spektrálního chování zkoumaných povrchů, v tomto případě porostů. Křivky spektrálního chování mají pro daný typ povrchu typický průběh. Jakékoliv odchylky od tohoto standardního průběhu mohou naznačovat různé anomálie způsobené vlivem biotických či abiotických faktorů. Průběh spektrální křivky může tedy ovlivňovat jak fyzikální stav zkoumaného porostu (např. obsah vody), tak jeho chemické složení (např. obsah živin). Průběh spektrální křivky zpravidla také napovídá o aktuálním stavu porostu, který se může změnit, přičemž tento stav nemusí být znatelný pouhým pozorováním, tedy postižitelný lidským okem. Jelikož jsou družicové snímky pořizovány z velké výšky, chovají se tyto snímky jako kolmé. Z tohoto důvodu je snímán pouze povrch vegetačního pokryvu, tzn. v případě zemědělských plodin zpravidla horní listy (či květenství) v závislosti na fenologické fázi porostu. Lze tedy říci, že k popisu spektrálních vlastností vegetačního pokryvu (povrchu porostu) se využívá odrazových vlastností listů. Pro správné pochopení a interpretaci spektrální křivky odrazivosti hraje důležitou roli také geometrie povrchu porostu (výška rostlin, počet a distribuce listů, barva listů a v neposlední řadě také velikost a postavení listů), která může být do značné míry ovlivněna stresovými faktory. Je také potřeba brát v úvahu, že různé odrůdy zemědělských plodin mohou mít odlišné spektrální vlastnosti založené i na různém vlivu stresu a jejich odolnost vůči němu (Jacson a Ezra, 1985; Ehleringer a Forseth, 1980).

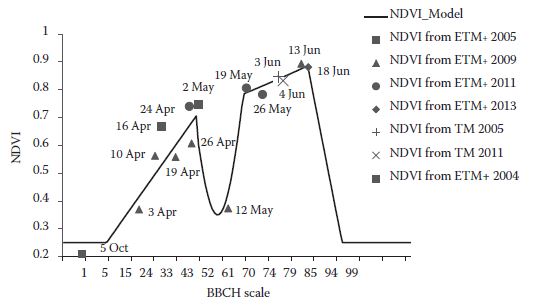
Jak již bylo řečeno, struktura a fyziologie porostu či jednotlivých rostlin ovlivňují jejich spektrální odrazivost, tedy množství odraženého záření. Snímky zobrazené ve viditelné části spektra (RGB) mohou poskytnout pouze omezenou informaci o stavu porostu. K tomu, abychom zjistili i to, co není detekovatelné pouhým okem, je potřeba využít kombinace jednotlivých spektrálních pásem dané datové sady v předem definovaném tvaru. Takovýmto kombinacím pásem se říká spektrální či vegetační indexy. Každý z indexů má svůj účel použití. Širokopásmové indexy využívají pásma z multispektrálních kamer a závisejí pak především na spektrálním rozlišení snímku. Spektrální indexy zpravidla obsahují kombinaci pásem, kde lze detekovat vysokou odrazivost (pásma GREEN a NIR), či pásma, kde dochází k absorpci elektromagnetického záření (např. pásmo RED) (Lukáš a kol., 2016).

Vegetační indexy lze dělit podle různých kritérií. Pro koncového uživatele, tedy agronoma, je nejvhodnější kritérium počet a rozsah spektrálních pásem, které lze využít, a především jejich účel využití. Každý z indexů hodnotí určité vlastnosti porostu, které jsou dány vlnovou délkou a rozsahem všech pásem, které vstupují do výpočtu. Je vždy na zpracovateli, který index si pro své hodnocení vybere. Zde je pak nutno brát v potaz, že každý index se hodí pro jiné hodnocení vlastností porostů. Tento fakt je podpořen i unikátními vlastnostmi stanoviště, kde jsou vybrané porosty hodnoceny. Do výsledné interpretace vyzkoumaného by se tedy měly zahrnout i všechny vnější vlivy, které mohou výsledek výpočtu ovlivnit. Z tohoto důvodu není vhodné striktně porovnávat výsledky výpočtů u různých pozemků, byť byl pro výpočet použit stejný index. Z unikátních vlastností každého pozemku či plodin vyplývá i cílené použití indexu. Tak jako se jeden index hodí pro výpočet vlastností určitých plodin, tak se pak nemusí hodit pro zjištění vlastností sledovaných porostů jiných plodin. To stejné platí i u fenologických fází, kdy např. může při raných fázích prosvítat půda, která může ovlivnit výsledek výpočtu. Je tedy vždy na zkušenosti a citlivém uvážení zpracovatele, který index použije. Scudiero a kol. (2016) tuto zásadu rozšiřuje i na správný výběr senzoru vhodného k pořízení snímku tak, aby se co nevíce vyhovělo geografickým podmínkám zkoumané oblasti.

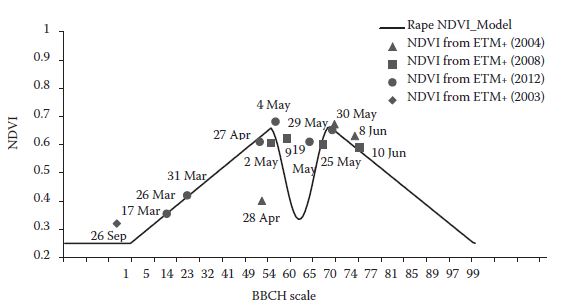
Každému výpočtu spektrálních indexů by mělo předcházet kvalitně provedené předzpracování obrazu, zejména atmosférické korekce na úroveň hodnot odrazivosti povrchu. Jedině tak lze dosáhnout jasně vypovídajících výsledků. Nejznámějším a nejprověřenějším vegetačním indexem je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI). NDVI byl poprvé použit autory Rouse a kol. (1974). Tento index pracuje se spektrálními pásmy RED (červené viditelné pásmo) a NIR (blízké infračervené pásmo). Index je velmi rozšířen napříč obory a pro různé účely hodnocení díky tomu, že velmi jednoduše dává představu o zdravotním stavu rostlin a stavu biomasy obecně (např. Julien a kol. 2011; Tornos a kol., 2014). Snímky z družic Sentinel 2 ale již nabízí plnohodnotnou a možná i lepší alternativu k tomuto léty prověřenému indexu, a to právě díky možnostem využití tří spektrálních pásem v tzv. oblasti red edge, která je citlivá na stresové projevy rostlin. Na rozdíl od indexu NDVI zde nedochází k tzv. efektu nasycení, což znamená, že hodnoty NDVI mohou při vysokých hodnotách listové plochy dosáhnout maximálního limitu (hodnoty 1) a již se pak dále výrazně nevyvíjí, ačkoliv porost vykazuje znatelné změny (např. Liu a kol., 2012).

Domínguez a kol. (2015) se ve své publikaci zabývali modelováním a popisem průběhu hodnot NDVI pšenice ozimé a řepky ozimé včetně jejich predikce vývoje růstu v závislosti na BBCH stupnici (fenologické fáze rostlin). V této studii byly záměrně vybrány takové strategické plodiny, které nepatří do stejného řádu, a mají různou spektrální odezvu. Právě odlišné spektrální chování vedlo k myšlence otestovat na jednotlivých snímcích různé metody atmosférických korekcí, jejichž nástroje jsou implementovány do komerčního SW ENVI (ENVI; verze 5.1-5.3, Excelis, Inc., McLean, VA, USA). NDVI bylo vypočítáno na snímcích, kde a) nebyla provedena atmosférická korekce; b) snímky byly převedeny pouze do odrazivosti TOA (Top of the Atmosphere), tedy odrazivost objektů měřenou sensorem na družici, kde hodnoty odrazivosti mohou být deformovány průchodem elektromagnetického záření atmosférou; c) Quick atmosférická korekce (QUAC); a d) atmosférická korekce označovaná jako Fast Line-of-sight Atmosheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). V posledních dvou možnostech se jedná o odrazivost měřenou na objektech (surface reflectance); tedy odrazivost, měřenou sensorem na družici, přičemž je zde do určité míry eliminován vliv atmosféry. V případě řepky ozimé se ukázalo, že jako nevhodnější metoda úpravy snímků je metoda atmosférické korekce FLAASH (tedy metoda, která pracuje s více proměnnými a měla by být nejpřesnější z uvedených). Záměrně byly testovány pouze snímky s řepkou ozimou. U pšenice ozimé nebylo potřeba atmosférické korekce testovat, jelikož pšenice ozimá je plodina, která stála u zrodu a vývoje implementace dálkového průzkumu Země do zemědělství a její chování je v tomto směru poměrně dobře prozkoumáno (např. Haboudane a kol. 2004). Tento fakt potvrzují i autoři Jongschaap a Schouten (2005), kteří ve své studii odhadovali produkci pšenice pomocí dálkového průzkumu Země, přičemž družicové snímky nekorigovali, ale účelově pracovali s digital number (DN) hodnotami originálních snímků.

Hlavním cílem zmíněné publikace však bylo vytvořit model vývoje hodnot NDVI během růstu pšenice ozimé a řepky ozimé, založené na sledování porostu pomocí stupnice BBCH. Aby se model co nevíce přiblížil reálnému stavu, bylo zapotřebí zpracovat co nejvíce snímků z různého období růstu během několika let. Tak, jako se liší vybrané plodiny v závislosti na příslušném řádu, kam plodiny náleží, tak se liší i grafy vystihující vývoj NDVI během jejich růstu. Křivky u obou modelů začínají na hodnotě 0,25, což je hodnota NDVI holé půdy sledovaného pozemku. Hodnoty NDVI u pšenice ozimé poté rostou až do fenologické fáze BBCH 49, kdy se začínají objevovat osiny. Poté začnou hodnoty NDVI prudce klesat vlivem snížené odrazivosti během metání a kvetení. Pokles hodnot je způsoben změnou struktury a barvy na povrchu porostu. Po ukončení fáze kvetení (BBCH 69) opět hodnoty NDVI rostou až do fáze BBCH 80 – dozrávání, kdy se mění barva porostu ze zelené na žlutou a odrazivost porostu opět začne klesat. Tento vývoj je v souladu se studiemi autorů Li a kol. (2015) a Franch a kol. (2015). Hodnoty NDVI u řepky ozimé rostou do fenologické fáze BBCH 60 – počátek kvetení. Zde dochází ke změně barvy ze zelené na žlutou a logicky se tak snižuje spektrální odrazivost povrchu porostu. Během této fáze může dojít k výkyvům hodnot NDVI, které mohou být způsobeny nestejnoměrným vývojem rostlin. Některé rostliny mohou být již v květu a některé ne. Tento případ se může objevit především na sklonitých pozemcích. Po odkvětu začne hodnota NDVI zase stoupat do fáze zrání, kdy se opět mění barva a hodnoty NDVI poté začnou opět klesat. Popsaný vývoj hodnot NDVI porostu řepky ozimé je v souladu s autory Pan a kol. (2013) nebo Zhu a kol. (2008). Modely vývoje hodnot NDVI jsou na obrázku 1 pro pšenici ozimou a na obrázku 2 pro řepku ozimou.



Obrázek 1 Vývoj hodnot normalizovaného diferenčního vegetačního indexu (NDVI) pšenice ozimé v závislosti na fenologické fázi označené BBCH stupnicí. Snímky jsou pořízené z družic Landsat 5 TM a Landsat 7 ETM+.



Obrázek 1 Vývoj hodnot normalizovaného diferenčního vegetačního indexu (NDVI) řepky ozimé v závislosti na fenologické fázi označené BBCH stupnicí. Snímky jsou pořízené z družic Landsat 7 ETM+.

Na základě modelů odhadů vývoje byl spočítán koeficient determinace mezi vytvořenými modely a reálnými NDVI hodnotami vypočítanými z družicových snímků. Pro řepku ozimou byl koeficient determinace 0,77; pro pšenici ozimou pak 0,93. Tyto hodnoty platí pro hladinu významnosti 0,05. Rozdíly mezi reálným stavem porostu a modely byly zjištěny např. i autory Jongschaap a Schouten (2005). Tito autoři připisují zjištěné rozdíly především různým obhospodařováním pozemků, jinými půdními podmínkami či odlišnými aplikacemi hnojiv.

Tento článek opět prokázal využitelnost družicových snímků Landsat i na úkor menšího prostorového rozlišení (30 m / pixel). V předložené studii byly s ohledem na termíny snímání využity snímky z družice Landsat 7 ETM+ a Landsat 5. Nevýhodou a stabilním problémem pro území České republiky je častá oblačnost, která limituje frekvenci použití družicových snímků. Dalším limitujícím faktorem bylo také použití snímků z družice Landsat 7 ETM+. Od 31. 5. 2003 je poškozen tzv. Scan Line Corrector na senzoru této družice, v důsledku čehož jsou snímky znehodnoceny pruhy na okrajích. Mohla tedy nastat situace, že i když byl snímek bezoblačný, tak přes zájmové území vedl zmíněný pruh. Tímto se velmi zúžil výběr snímků vhodných k hodnocení.

Jelikož je odhad výnosů polních plodin jeden z velmi důležitých cílů rostlinné produkce, zaměřuje se na přesnost jeho odhadů mnoho výzkumných týmů. Právě využití družicových snímků hraje v odhadu výnosu klíčovou roli. V literatuře, která se týká sledování zemědělských plodin pomocí metod dálkového průzkumu Země, bylo v mnoha případech uvedeno, že fenologické fáze pšenice po BBCH 69 (konec květu) jsou úzce spjaty s finálním výnosem zrna, přičemž v dobré shodě jsou zejména hodnoty NDVI z multitemporálních družicových snímků pořízených po fázi kvetení (Benedetti a Rossini, 1993; Zhang a kol., 2004; Du a Noguchi, 2017).

Odhad výnosů úzce souvisí s pojmem „výnosový potenciál“. Jedná se o výnos zemědělské plodiny, či její odrůdy, při pěstování za příznivých podmínek s dostatkem vody a živin a bez stresu způsobeným škůdci a chorobami. Pro jakoukoliv danou lokalitu a vegetační období je výnosový potenciál určen třemi faktory: a) slunečním zářením; b) teplotou; a c) dostupností vody. Neefektivní hospodaření se zemědělskou půdou může způsobit odchylky skutečného výnosu od potenciálních výnosů - výnosový rozdíl. Ten je definován jako rozdíl mezi výnosovým potenciálem a průměrnými výnosy zemědělců ve vztahu k určitému stanovenému prostorovému a časovému měřítku zájmu (Lobell a kol. 2009). Pro výpočet výnosového potenciálu se často využívají družicové snímky v různé formě a k různým účelům a slouží zde jako jedna z nezbytných proměnných. Maphanyane a kol. (2018) definovala ve své publikaci termín „normalized yield frequency map“, což ve své podstatě znamená mnohaletá výnosová mapa. Ve volném překladu je to výsledná výnosová mapa složená z výnosových map jednotlivých let, normalizovaná převedením absolutních hodnot výnosu na hodnoty relativní. Takováto mapa může být pro odhad výnosů velmi užitečná v porovnání s aktuálním snímkem přepočteným na spektrální index, a to nejlépe po odkvětu.

**Použitá literatura:**

Bégué, A., Todoroff, P. & Pater, J. (2008). Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? Precision Agriculture, 9, 161-171.

Benedetti, R., Rossini, P. (1993). On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. Remote Sens. Environ. 45, 311–326.

Betbeder, J., Fieuzal, R., Philippets, Y., Ferro-Famil, L. and Baup, F. (2016). Contribution of multiteporal polarimetric synthetic aperture radar data for monitoring winter wheat and rapeseed crops. Journal of Applied Remote Sensing, 10(2), 026020-1-19.

DOMÍNGUEZ, J.A., KUMHÁLOVÁ, J., NOVÁK, P. (2015). Winter oilseed rape and winter wheat growth prediction using remote sensing methods. Plant Soil and Environment, 61(9), 410-416.

Du, M., Noguchi, N. (2017). Monitoring of Wheat Growth Status and Mapping of Wheat Yield’s within-Field Spatial Variations Using Color Images Acquired from UAV-camera System. Remote Sensing 9, 289.

Ehleringer, J., Forseth, I. (1980). Solar tracking by plants. Science 210, 1094.

ESA, Sentinel-2, https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2, (accessed 4.9.2018).

Franch, B., Vermote, E.F., Becker-Reshef, I., Claverie, M., Huang, J., Zhang, J., Justice, C., & Sobrino, J. A. (2015). Improving the timeliness of winter wheat production forecast in the United States of America, Ukraine and China using MODIS data and NCAR growing degree day information. Remote Sensing of Environment, 161, 131–148.

GALAMBOŠOVÁ, J. (2016). Remote sensing methods to determine crop parameters suitable for variable rate Nitrogen application on small grain cereals. Scientific Monograph, Research Institute of Agricultural Engineering, p.r.i., Prague, Czech Republic.

Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algo­rithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment, 90, 337–352.

Hunt Jr. E.R., Doraiswamy P.C., McMurtrey J.E., Daughtry C.,S.,T., Perry E.M., Akhmedov B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21, 103-112.

Jackson, R.D., Ezra, C.E. (1985). Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. International Journal of Remote Sensing 6, 177-185.

Jongschaap, R. E. E., & Schouten, L. S. M. (2005). Predicting wheat production at regional scale by integration of remote sens­ing data with a simulation model. Agronomy for Sustainable Development, 25, 481–489.

Julien, Y., Sobrino, J. A., & Jimenez-Munoz, J.-C. (2011). Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13, 711–720.

Li, X. M., He, Z. H., Xiao, Y. G., Xia, X. C., Trethowan, R., Wang, H. J., & Chen, X. M. (2015). QTL mapping for leaf senescence-related traits in common wheat under limited and full irrigation. Euphytica, 203, 569–582.

Liu, F., Qin, Q., Zhan, Z. (2012). A novel dynamic stretching solution to eliminate saturation effect in NDVI and its application in drought monitoring. Chinese Geographical Science, 22(6), 683-694.

Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, Ch.B. (2009). Crop Yield Gaps:Their Importance, Magnitudes, and Causes. Annu. Rev. Environ. Resour., 34, 179-204.

Lukáš, J., Lněnička, P., Kroulík, M., Kumhálová, J., Sova, J., Madaras, M., Haberle, J., Urban, M., Hermuth, J., Nesvatba, Z., Friedlová, M., Pražan, R. & Souček, J. (2016). Možnosti využití bezpilotních prostředků v zemědělství, dokončení. Úroda, 64 (12), 63-66.

Maphanyane, J.G., Mapeo, R.B.M., Akinola, M.O. (2018). Handbook of research on Geospatial Science and Technologies. IGI Global, Hershey PA USA.

Pan Z., Huang J., & Wang F. (2013). Multi range spectral feature fitting for hyperspectral imagery in extracting oilseed rape planting area. International Journal of Applied Earth Observa­tion and Geoinformation, 25, 21–29.

Scudiero, E., Corwin, D.L., Wienhold, B.J., Bosley, B., Shanahan, J.F., Johnson, C.K. (2016). Downscaling Landsat 7 canopy reflectance employing a multi-soil sensor platform, Precision Agriculture 17, 53–73.

Tornos L., Huesca M., Dominguez J.A., Moyano M.C., Cicuendez V., Recuero L., Palacios-Orueta A. (2014). Assessment of MODIS spectral indices for determining rice paddy agricultural practices and hydroperiod. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101, 110–124.

Zhang, Q. & Pierce, J. F. (2013): Agricultural Automation: Fundamentals and Practices. CRC Press.

Zhang, F.,Wu, B., Luo, Z. (2004). Winter wheat yield predicting for America using remote sensing data. J. Remote Sens. 8, 611–617.

Zhu L., Xu J. F., Huang J. F., Wang F. M., Liu Z. Y., & Wang Y. (2008). Study on hyperspectral estimation model of crop vegetation cover percentage. Spectroscopy and Spectral Analysis, 28, 1827–1831. (In Chinese).

**Zpracoval**: doc. Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.