

METODA WYZNACZANIA WSKAŹNIKA SUSZY TVDI
I JEGO ANALIZA STATYSTYCZNA NA PRZYKŁADZIE
KAMPINOSKIEGO PARKU NARODOWEGO

Jarosław Zawadzki, Karol Przeździecki

Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 20, 00-661 Warszawa
email: j.j.zawadzki@gmail.com

Streszczenie. Artykuł prezentuje sposób wyznaczania rozkładu przestrzennego wilgotności gleby za pomocą tzw. metody trójkąta, która opiera się na analizie wykresów rozrzutu LST (Land Surface Temperature) i VI (Vegetation Index). Na podstawie wykresu rozrzutu LST i VI można wyznaczyć tzw. temperaturowo-wegetacyjny indeks suszy, TVDI (z ang. Temperature-Vegetation Dryness Index), który jest dobrą miarą wilgotności gleby dostępnej dla roślin. Celem pracy jest szczegółowe przedstawienie i porównanie trzech wariantów metody trójkąta, służącej do wyznaczania wskaźnika suszy TVDI za pomocą dwóch różnych indeksów wegetacyjnych NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) i EVI (Enhanced Vegetation Index), ze szczególnym uwzględnieniem sposobu wyznaczania tzw. „krawędzi suchej” trójkąta. Wskaźnik suszy TVDI wyznaczono dla obszaru Kampinoskiego Parku Narodowego, otrzymując obiecujące i zgodne z literaturą wyniki. Ponadto została przeprowadzona szczegółowa analiza statystyczna wyników trzech różnych wariantów metody trójkąta. Warto zauważyć, że wilgotność gleby, a więc i jej badania, są niezwykle istotne zarówno z punktu naukowego jak i praktycznego punktu widzenia (np. zagrożenie pożarowe, rolnictwo).

Słowa kluczowe: obserwacje satelitarne lasów, wilgotność gleby, metoda trójkąta, indeksy wegetacyjne, TVDI, MODIS

WSTĘP

Wilgotność gleby oraz zawartość wody w pokrywie roślinnej są jednymi z kluczowych parametrów w modelowaniu procesów zachodzących na powierzchni Ziemi. Zdalne pozyskiwanie danych w paśmie czerwieni oraz bliskiej podczerwieni pozwalają na dobre oszacowanie stanu roślinności oraz gęstości pokrywy roślinnej za pomocą indeksów wegetacyjnych (ang. VI – Vegetation Indices) (Łukowski i Usowicz 2009, Nemani i in. 1993, Rouse i in. 1973). Natomiast obrazowanie

w paśmie podczerwieni termalnej daje możliwość określenia temperatury powierzchni Ziemi (z ang. LST – Land Surface Temperature) (Bisht i in. 2005). Niezwykle użyteczne, w badaniach wody w glebie dostępnej dla roślin, okazało się połączenie ze sobą obydwu rodzajów danych. Okazuje się, że obserwacje samych indeksów wegetacyjnych nie są wystarczające do monitorowania zmian wilgotności gleby na obszarze zalesionym. Wynika to głównie z opóźnienia czasowego, jaką wykazują wartości indeksów wegetacyjnych w porównaniu z wilgotnością gleby. Na przykład, na początku suszy rośliny jeszcze przez pewien czas są zielone. Połączenia tych danych wykonuje się przy pomocy tak zwanej metody trójkąta, która opiera się na analizie wykresów rozrzutu LST od VI, czyli temperatury powierzchni ziemi i wybranego indeksu wegetacyjnego (Sandholt in. 2002, Yang i in. 2008). Podstawowym powodem połączenia ze sobą temperatury powierzchni Ziemi oraz indeksów wegetacyjnych jest fakt, że temperatura powierzchni jest skorelowana z zawartością wilgoci, jednak jest również zależna od gęstości i kondycji pokrywy roślinnej. Temperatura powierzchni zależy, bowiem zarówno od intensywności ewaporacji (parowania z gleby), jak i transpiracji (parowania wody z naziemnych części roślin). Oba procesy występujące łącznie określa się mianem ewapotranspiracji. Kiedy intensywność ewaporacji wzrasta, temperatura gruntu spada, na skutek pobierania ciepła przez parującą wodę. Podobny efekt wywołuje transpiracja na terenach pokrytych roślinnością, której intensywność zależy od stopnia pokrycia terenu roślinnością, jej rodzaju, kondycji itd. W związku z tym największe wahania temperatury powierzchni mają miejsce na obszarach, na których nie występuje roślinność, która ma istotnie stabilizujący wpływ na temperaturę powierzchni. W oparciu o powyższe założenia i informacje, do określania wilgotności gleby, zarówno pokrytej jak i niepokrytej roślinnością, stosuje się wskaźnik TVDI (z ang. Temperature Vegetation Dryness Index) będący wskaźnikiem suszy wyznaczanym na podstawie danych satelitarnych otrzymywanych w paśmie widzialnym, bliskiej podczerwieni i podczerwieni termalnej. W literaturze anglojęzycznej istnieje wiele prac wykorzystujących ten wskaźnik (Wang i inni 2004, Li i inni 2008, Sun i inni 2008, Wang i in. 2010, Chen i in. 2011). W polskiej literaturze autorzy nie znaleźli przykładów zastosowań tej metodyki. Wskaźnik TVDI w niniejszej pracy był wyznaczany przy pomocy wspomnianej powyżej metody trójkąta na obszarze Kampinoskiego Parku Narodowego (KPN). Istnieje kilka modyfikacji tej metody, a na jej wyniki mają wpływ szczegóły związane z metodyką obliczeniową, rodzajem użytych wskaźników wegetacyjnych itp.

CEL PRACY

Celem artykułu jest przedstawienie sposobu wyznaczania wilgotności gleby na obszarze zalesionym za pomocą tzw. metody trójkąta, która opierając się na

analizie wykresów rozrzutu LST i VI prowadzi do wyznaczenia rozkładu przestrzennego wskaźnika suszy TVDI na badanym obszarze. W szczególności celem pracy jest prezentacja i porównanie trzech odmian tej metody za pomocą dwóch różnych indeksów wegetacyjnych: NDVI i EVI, ze szczególnym uwzględnieniem sposobu wyznaczania tzw. „krawędzi suchej” trójkąta, który jest istotny w systematycznych badaniach zdalnych zmian czasowych wilgotności gleby dostępnej dla roślin. W celu demonstracji metody zdecydowano się wyznaczyć rozkłady przestrzenne wskaźnika suszy TVDI na obszarze KPN.

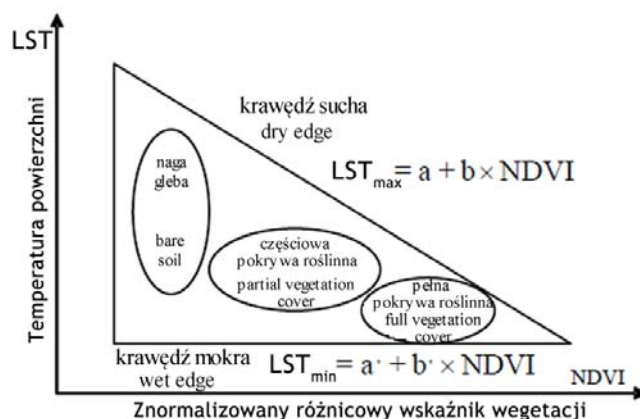
MATERIAŁ

Do badań wilgotności gleby wykorzystano dwa rodzaje danych satelitarnych pochodzących z spektrometri MODIS (ang. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) znajdującego się na pokładzie satelity Terra Amerykańskiej Agencji Kosmicznej (z ang. *National Aeronautics and Space Administration*). Ocena wilgotności gleby i monitoring zjawiska suszy na podstawie danych satelitarnych MODIS nie jest zagadnieniem nowym (Wan, Wang i Li 2004, Mallick, Bhattacharya i Patel 2009, Patel i in. 2008, Rhee, Im i Carbone 2010, Son i in. 2012), w Polsce brak jest jednak badań tego typu. Dane MODIS dostępne są bezpłatnie za pośrednictwem np. serwisu LP DAAC (ang. The Land Processes Distributed Active Archive Center). Zmienność przestrzenna wilgotności gleby na obszarach zalesionych, w dużych skalach badań jest znacznie mniejsza niż parametrów biofizycznych i obserwacje w średnich zdolnościach rozdzielczych są całkowicie wystarczające w większości przypadków. Należy również podkreślić, że wysokorozdzielcze obserwacje satelitarne związane są najczęściej z koniecznością pozyskania i obróbki dużych ilości danych, a jednocześnie charakteryzują się małą rozdzielczością czasową, ograniczaną np. okresem przelotu satelity, warunkami zachmurzenia, kosztami badań. Zależność między rozdzielczością przestrzenną i czasową zdjęć satelitarnych jest odwrotnie proporcjonalna, tzn. zdjęcia o dużej rozdzielczości przestrzennej poniżej 30 m są pozyskiwane dla tego samego obszaru co 2-4 tygodnie, natomiast zdjęcia średnio i nisko rozdzielcze 250 m - 1 km co 1-2 dni (Budzyńska i in. 2011). W przypadku niektórych zagadnień środowiskowych lepsze rezultaty uzyskuje się stosując zobrażenia średnio rozdzielcze zamiast wysokorozdzielczych (Mycke-Dominko 2003), ma to związek między innymi z uchwyceniem dynamiki procesu. Z kolei misje realizujące wielkoskalowe pomiary wilgotności gleby w zakresie promieniowania mikrofalowego posiadają bardzo niską zdolność rozdzielczą (Marczewski i in. 2009). Z tych powodów powszechnie uznaje się dane satelitarne o średnich zdolnościach rozdzielczych za bardzo wartościowe, ponieważ są one dostępne dość regularnie, często bezpłatnie, jako dostępne publicznie.

Pierwszym rodzajem wykorzystywanych danych był produkt (z ang. product) o oznaczeniu MOD11A2. Są to dane trzeciego poziomu przetworzenia (level-3, L3) o nazwie Land Surface Temperature & Emissivity, zawierający informacje o temperaturze powierzchni Ziemi i emisyjności. Przestrzenna zdolność rozdzielcza danych MOD11A2 wynosi 1 km, a czasowa 8 dni. Drugim rodzajem danych jest produkt o oznaczeniu MOD13A2. Są to również dane trzeciego poziomu przetworzenia. Zawierają one informacje o indeksach wegetacyjnych NDVI oraz EVI. Ich rozdzielczość przestrzenna jest równa 1 km, natomiast czasowa wynosi 16 dni. Oba wymienione wyżej rodzaje zastosowanych danych posiadają oryginalnie projekcję sinusoidalną.

METODY

Według rozważań teoretycznych, podstawowy wykres rozrzutu pomiędzy indeksem wegetacyjnym i temperaturą powierzchni Ziemi powinien mieć kształt trójkąta (Sandholt i in. 2002, Yang i in. 2008), stąd też wywodzi się nazwa metody. Dla danej wartości wskaźnika wegetacyjnego, punkty na krawędziach dolnej i górnej trójkąta, nazywanych odpowiednio „krawędzią moką” (z ang. wet edge) i „krawędzią suchą” (z ang. dry edge), reprezentują dwa skrajne (maksymalny i minimalny) przypadki stanu wilgotności gleby i ewapotranspiracji. Schemat wykresu rozrzutu LST i VI przedstawiony jest na rysunku 1. Jak można zauważyć największe wahania temperatury powierzchni mają miejsce na obszarach, na których brak jest roślinności, zaś najmniejsza tam, gdzie występuje gęsta roślinność, która stabilizuje temperaturę powierzchni.



Rys. 1. Schemat ideologiczny metody trójkąta

Fig. 1. Conceptual scheme of the triangle method

Na podstawie wcześniejszych prac można stwierdzić (Wan i in. 2004, Sun i in. 2012), iż zasadniczo istnieją dwa główne warianty obliczania indeksu suszy TVDI metodą trójkąta. W przypadku pierwszego wariantu krawędź mokra posiada współczynnik kierunkowy równy zero, odtąd będziemy ją nazywać metoda I. Drugi wariant można zrealizować na dwa sposoby, dlatego też poniżej będzie mowa o trzech metodach. W metodzie pierwszej „krawędź mokra” ma nachylenie zerowe, oznacza to, że po odrzuceniu punktów odstających na wykresie rozrzutu $LST(VI)$ rzędna „krawędzi mokrej” jest równa w przybliżeniu minimalnej temperaturze występującej w całym zakresie indeksu wegetacyjnego (ewentualnie może być wyznaczana jako średnia rzędnych najniższych położonych punktów). W przypadku metody II i III „krawędź mokra” posiada współczynnik kierunkowy różny od zera. W tym przypadku występuje zatem konieczność wyznaczenia obydwu krawędzi („mokrej” i „suchej”) ograniczających wykres rozrzutu, odpowiednio od dołu i od góry. Różnica pomiędzy dwoma tymi metodami polega na innym sposobie wyznaczenia współczynników kierunkowych krawędzi. W metodzie II współczynnik kierunkowy krawędzi wyznaczone są automatycznie za pomocą regresji liniowej, natomiast w metodzie III krawędzie te dopasowywano w sposób nadzorowany, drogą szczegółowej analizy wykresu rozrzutu i punktów odstających.

Jak już wspomniano wykres rozrzutu $LST(VI)$ ograniczony jest krawędziami „suchą” i „mokrą”. Obszar pomiędzy krawędziami przedstawia zaś stany pośrednie pomiędzy glebą suchą oraz będącą w stanie pełnego nasycenia wodą (saturacja ośrodka). W celu wyliczenia wskaźnika suszy TVDI na badanym obszarze należy najpierw wyznaczyć równania krawędzi „suchej” i „mokrej”.

Wskaźnik wyliczamy z poniższych wzorów:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}(VI)}{LST_{max}(VI) - LST_{min}(VI)} \quad (1)$$

gdzie: LST jest wartością temperatury powierzchni dla danego piksela, VI jest wartością indeksu wegetacyjnego dla tego piksela, $LST_{smin}(VI)$ oznacza wartość funkcji liniowej dla danej wartości VI na krawędzi „mokrej”, $LST_{smax}(VI)$ oznacza wartość funkcji liniowej dla danej wartości VI na krawędzi „suchej”:

$$LST_{max} = a_{max} + b_{max} \cdot VI \quad (2)$$

$$LST_{min} = const, \text{ lub } LST_{min} = a'_{min} + b'_{min} \cdot VI. \quad (3)$$

a_{min} , b_{min} , a'_{max} , b'_{max} we wzorach (2) i (3) oznaczają odpowiednio wyrazy wolne i współczynniki kierunkowe krawędzi „mokrej” oraz krawędzi „suchej”.

Wyznaczanie map rozkładu wskaźnika suszy TVDI z opisanych powyżej zdjęć satelitarnych składało się z szeregu czynności wstępnych oraz wymagało użycia różnych programów. Do zmiany projekcji z sinusoidalnej do układu UTM (Univer-

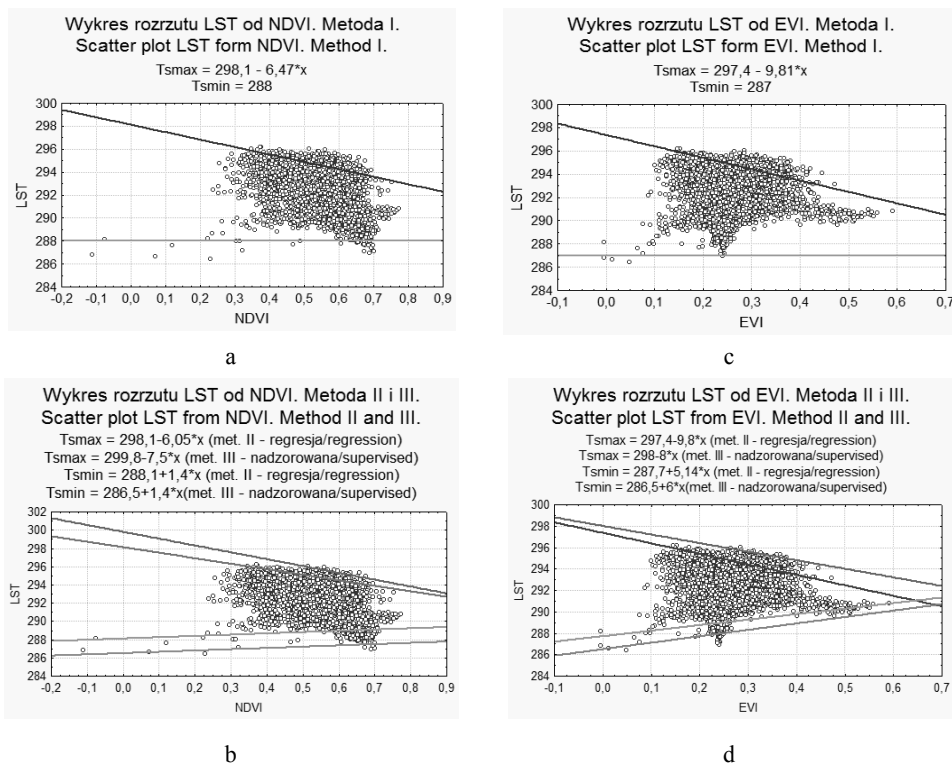
sal Transverse Mercator) oraz do wycięcia interesującego nas obszaru użyto programu MRT (ang. MODIS Reprojection Tool). W celu maskowania pikseli, zawierających błędy lub posiadających niezadowalającą jakość, użyto bezpłatnego programu LDOPE (ang. Land Data Operational Product Evaluation) przeznaczonego do analizy oraz oceny jakości produktów MODIS LAND (Roy, i inni 2002). Następnie, w oparciu o wzory (1)-(3) napisano skrypt w programie MATLAB służący do automatycznego wyznaczania krawędzi „suchej” i „mokrej” metodą regresji liniowej na wykresach rozrzutu LST(VI). Skrypt ten dzielił zakres zmienności VI na dowolnie wybraną liczbę przedziałów, a następnie w każdym przedziale wybierał spośród wszystkich punktów wykresu rozrzutu z danego przedziału, punkty posiadające najwyższą lub najniższą wartość LST (w zależności od rodzaju wyznaczanej krawędzi). Następnie tak wybrane punkty były aproksymowane funkcją liniową. Ze względu na występowanie punktów odstających (znajdujących się wyraźnie ponad „krawędzią suchą” lub pod „krawędzią mokrą”) metoda ta wymagała czasami nadzoru i podjęcia decyzji, które punkty należy potraktować jako nietypowe, co było istotą trzeciej metody. Rezultatem występowania punktów odstających było wychodzenie wartości wskaźnika TDVI poza teoretyczny zakres od 0 do 1, jednak po ich nadzorowanej eliminacji, problem ten był rozwiązywany. Zasadnicze obliczenia i wizualizacje wskaźnika zostały wykonane w programie Quantum Gis 1.8, natomiast analiza wyników została przeprowadzona w programie Statistica.

WYNIKI

W celu demonstracji metody wyznaczania wskaźnika suszy TVDI zdecydowano się na wyznaczenie go na obszarze obejmującym KPN i jego najbliższe okolice. Obszar parku obejmuje zakres szerokości geograficznych od 20,28°E do 20,88°E oraz długości geograficznych od 52,26°N do 52,41°N. Wskaźnik ten został obliczony dla okresu 16 dniowego od 07.04.2009 r. do 22.04.2009 r. Dzięki takiemu wyborowi obszaru badań zapewniono, że obszar badań obejmował tereny z różnym stopniem pokrycia terenu roślinnością, co jest korzystne podczas stosowania metody trójkąta (Sun i in. 2012). Warto podkreślić, że pomimo stosunkowo małej powierzchni badanego obszaru objął on aż 5656 pikseli TVDI, co daje podstawy do analiz statystycznych i wyznaczenia rozkładu przestrzennego (Dla porównania, ten sam obszar zajmuje zaledwie kilka pikseli SMOS) (Marczewski i in. 2009).

Rysunek 2a-d przedstawia wykresy rozrzutu LST(VI), gdzie VI to NDVI (lewa strona) lub EVI (prawa strona) otrzymane na badanym obszarze wraz z wyznaczonymi krawędziami „suchą” i „mokrą” trójkąta. Krawędzie na wykresach rozrzutu na rysunkach 2a i 2c zostały otrzymane za pomocą metody I, zaś na rysunkach 2b i 2d za pomocą metod II i III, odpowiednio krawędzie widoczne, jako wewnętrzne i zewnętrzne.

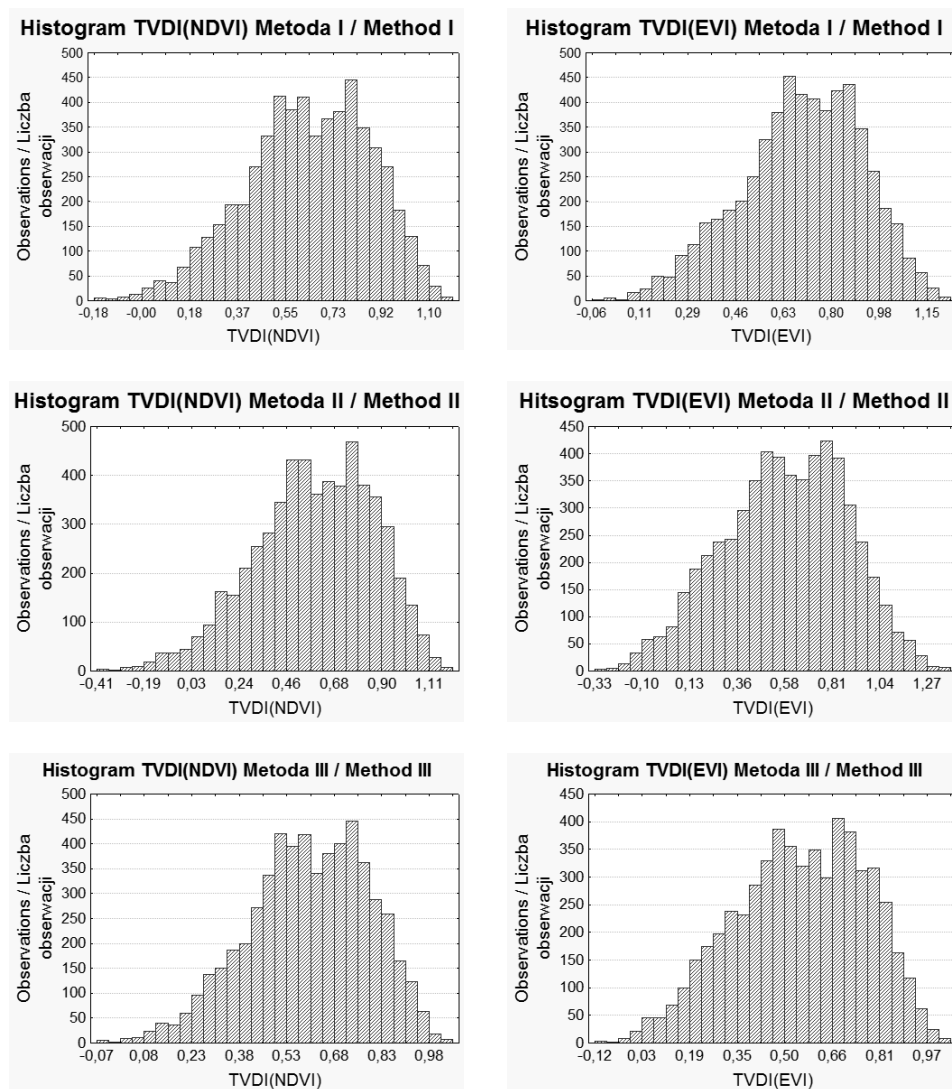
Na rysunku 2 można zaobserwować, że obszar trójkąta ograniczony krawędziami „suchą” i „mokrą” zmienia się istotnie w zależności od zastosowanej metody. W przypadku TVDI wyznaczonego metodą pierwszą, bardzo niewielka ilość pikseli będzie posiadała niskie wartości wskaźnika, w szczególności dla niskich wartości VI, co może powodować zawyżenie wyników i niedoszacowanie wilgotności gleby. Podobny, choć znacznie mniejszy efekt może przynieść metoda druga, na skutek uśredniającego działania regresji liniowej, co powoduje, że nadal nie wszystkie punkty wykresu rozrzutu w pobliżu krawędzi mokrej dla niskich wartości VI są wzięte pod uwagę. Jest to tym bardziej prawdopodobne, że wszystkie rozkłady TVDI mają wyraźną skośność lewostronną (rys. 3), czyli występuje większa liczba pikseli o wysokich wartościach TVDI niż o wartościach niskich.



Rys. 2. Wykresy rozrzutu LST(VI) (VI=NDVI, EVI) otrzymane na badanym obszarze wraz z wyznaczonymi krawędziami „suchą” i „mokrą” trójkąta. Rys. 2a, 2c metoda I. Rys. 2b, 2d metody II i III (odpowiednio krawędzie wewnętrzne i zewnętrzne)

Fig. 2. Scatter plots LST (VI) (VI = NDVI, EVI) obtained in the study area with the "dry" and "wet" edges of triangle. Fig. 2a, 2c method I. Fig. 2b, 2d methods II and III (inner and outer edges, respectively)

Na rysunku 3 przedstawione są histogramy rozkładów empirycznych indeksu TVDI wyznaczone trzema metodami dla obydwu analizowanych wskaźników wegetacyjnych, zaś w tabeli 1 przedstawiono najważniejsze statystyki opisowe .



Rys. 3. Histogramy rozkładu TVDI(NDVI) (strona lewa) oraz TVDI(EVI) (strona prawa) w Kampinoskim Parku Narodowym oraz jego okolicach otrzymane za pomocą trzech wariantów metody trójkąta

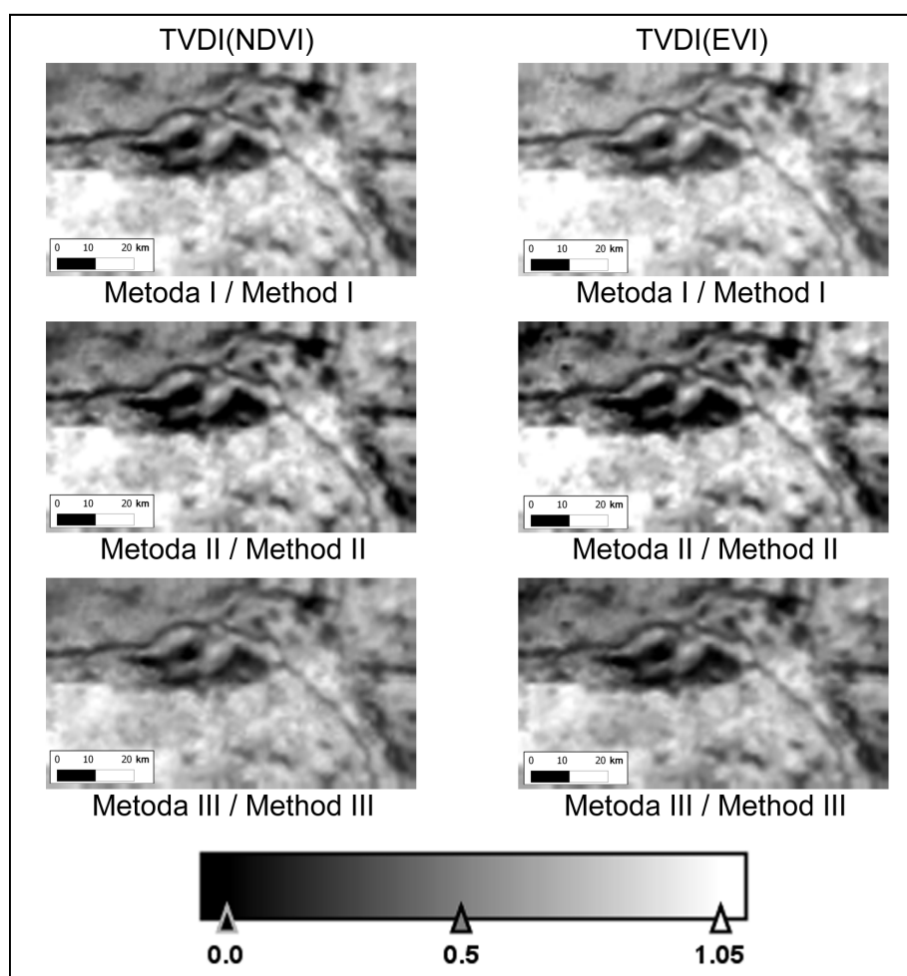
Fig. 3 Histograms of TVDI (NDVI) (left side) and TVDI (EVI) (right side) distributions in the Kampinoski National Park obtained using three variants of the triangle method

Tabela 1. Statystyki rozkładów TVDI(NDVI) oraz TVDI(EVI) w Kampinoskim Parku Narodowym oraz jego okolicach**Table 1.** Statistics of TVDI (NDVI) and TVDI (EVI) distributions in Kampinoski National Park and the surrounding area

Statystyka Statistic	Metoda I – Method I		Metoda II – Method II		Metoda III – Method III	
	TVDI(NDVI)	TVDI(EVI)	TVDI(NDVI)	TVDI(EVI)	TVDI(NDVI)	TVDI(EVI)
Średnia Mean	0,64	0,70	0,59	0,59	0,60	0,55
Mediana Median	0,65	0,71	0,60	0,60	0,61	0,56
Minimum Minimum	-0,18	-0,06	-0,41	-0,33	-0,07	-0,12
Maksimum Maximum	1,19	1,24	1,22	1,38	1,06	1,05
Dolny Kwartył Lower Quartile	0,48	0,56	0,41	0,38	0,48	0,40
Górny Kwartył Upper Quartile	0,82	0,86	0,79	0,81	0,74	0,72
Odch. Std Std. Dev.	0,24	0,22	0,27	0,30	0,19	0,21
Skośność Skewness	-0,35	-0,36	-0,40	-0,21	-0,35	-0,27
Kurtoza Kurtosis	-0,30	-0,26	-0,21	-0,47	-0,27	-0,57

Wartości głównych miar położenia: średniej i mediany są najwyższe dla pierwszej metody i najniższe dla metody trzeciej. Zaobserwowano, również, że wyznaczanie współczynników kierunkowych krawędzi trójkąta metodą regresji liniowej (metoda nienadzorowana) może czasami prowadzić do wykraczania poza teoretyczne wartości wskaźnika TVDI, a więc zakres od 0 do 1. W przypadku metody trzeciej, wykorzystującej dopasowanie nadzorowane wykroczenia te są bardzo nieznaczne. Zakres zmienności dla TVDI wyznaczonego przy pomocy NDVI wynosi (-0,07; 1,06), zaś dla TVDI wyznaczonego przy pomocy EVI (EVI) (-0,12; 1,05), co należy uznać za bardzo dobre dopasowanie do zakresu teoretycznego. W związku z zawężeniem zakresu zmienności w metodzie III zmniejsza się wyraźnie także odchylenie standardowe. Współczynnik skośności indeksu suszy TVDI będący miarą asymetrii rozkładu we wszystkich przypadkach przyjmują wartości ujemne, co świadczy o asymetrii lewostronnej.

Dla wszystkich omawianych metod kurtoza indeksu suszy TVDI przyjmuje wartości ujemne, co wskazuje na rozkład spłaszczony. Należy również zauważyć, że w przypadku metody drugiej i trzeciej, wartości kurtozy TVDI są znacznie mniejsze dla wskaźnika opartego o indeks wegetacyjny EVI, co wskazuje na bardziej równomierny rozkład. Rysunek 4 przedstawia rozkład przestrzenny indeksu suszy na badanym terenie, otrzymany trzema opisanymi powyżej wariantami metody trójkąta, dla obu wskaźników wegetacyjnych: NDVI i EVI.



Rys. 4. Mapy rozkładu TVDI(NDVI) (strona lewa) oraz TVDI(EVI) (strona prawa) w Kampinoskim Parku Narodowym otrzymane za pomocą trzech wariantów metody trójkąta

Fig 4. Spatial distribution maps of TVDI(NDVI) (left side) and TVDI (EVI) (right side) in Kampinoski National Park obtained using three variants of the triangle method

Jakość samego rysunku może wydawać się niska, jest to jednak spowodowane faktem iż wielkość obszaru to 101 na 56 pikseli. Analiza rozkładów potwierdza wnioski wynikające z analizy wykresów rozrzutu oraz statystycznej analizy indeksów suszy TVDI. Widać wyraźnie, że metoda I, zaniża wielkość obszarów wilgotnych w porównaniu z metodą II. Z kolei metoda III (nadzorowana) daje rozkład, w którym granice pomiędzy obszarami wilgotnymi i suchymi są mniej ostre w porównaniu z metodami II i III (obniżenie kontrastu generowanych map wskaźnika TVDI). Świadczy to o uzyskaniu bardziej realistycznych rozkładów wilgotności.

PODSUMOWANIE

Autorzy podjęli trudny temat związany ze zdalnym wyznaczeniem wilgotności gleby na obszarach zalesionych przy wykorzystaniu optycznych zdjęć satelitarnych MODIS/TERRA o średniej rozdzielczości przestrzennej. W pracy omówiono oraz przedyskutowano szczegóły obliczeniowe tzw. metody trójkąta służącej do wyznaczenia indeksu suszy gleby TVDI. Metoda ta daje możliwość systematycznego monitorowania wilgotności gleby na rozległych obszarach pokrytych zróżnicowaną roślinnością, w tym na terenach leśnych, oraz na znaczne obniżenie kosztów badań w stosunku do kosztów tradycyjnych, terenowych, badań wilgotności gleby. Dodatkowo metodę tę zaimplementowano przy wykorzystaniu otwartego lub powszechnie dostępnego oprogramowania, co dodatkowo zmniejsza koszty jej zastosowania. W pracy została przeprowadzona szczegółowa analiza statystyczna wyników trzech różnych odmian metody trójkąta. Analiza ta pozwoliła stwierdzić, że wyznaczenie krawędzi suchej i mokrej w sposób nadzorowany jest niekłopotliwe i pozwala na właściwe wyznaczenie indeksu suszy gleby TVDI. Planowane jest dalsze udoskonalenia tej metody, zaimplementowanie jej dla wyższych zdolności rozdzielczych przy użyciu zdjęć Landsat ETM+, a następnie LDCM oraz zastosowanie do analizy geostatystycznej wyników (Zawadzki 2002). Ponadto planuje się walidację otrzymanych wyników na podstawie danych naziemnych w celu przeliczenia wartości wskaźnika na bezwzględne jednostki wilgotności, np. $m^3 \cdot m^{-3}$. Pracę wykonano, w ramach współpracy Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej z KPN (decyzja nr DOn-0604/33/08). Niniejsze prace jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt "Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej".

PIŚMIENNICTWO

- Bisht G., Venturini V., Islam S., Jiang L., 2005. Estimation of the net radiation using MODIS data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97, 52-67.
- Budzyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., Turlej K., Małek I., Bartold M., 2011. Monitoring przyrodniczy bagien Biebrzańskich z zastosowaniem teledetekcji. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 11, 39-64.

- Chen, C., Son, N., Chang, L., Chen, C., 2011. Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data. *Applied Geography*, 31(2), 463-475.
- Li, Z., Wang, Y., Zhou, Q., Wu, J., Peng, J., Chang, H., 2008. Spatiotemporal variability of land surface moisture based on vegetation and temperature characteristics in Northern Shaanxi Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 72, 974-985.
- Lukowski, I., Usowicz, B., 2009. Analiza indeksów wegetacji LAI i FCOVER dla wybranych obszarów zachodniego Polesia. *Acta Agrophysica*, 14(3), 629-638.
- Mallick, K., Bhattacharya, B., Patel, N., 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1327-1342.
- Marczewski, W., Zawadzki, J., Przeździecki, K., Szymankiewicz, K., 2009. Soil moisture monitoring at the Kampinowski National Park, Poland for validating SMOS. <http://swex.cbk.waw.pl/>
- Mycke-Dominko, M., 2003. Teledetekcyjna metoda kategoryzacji zagrożenia pożarowego lasu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 13B, 451-455.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., 1993. Forest ecosystem process at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed Leaf Area Index estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2519-2539.
- Patel, N., Anapashsha, R., Kumar, S., Saha, S., Dadhwal, V., 2008. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 23-39.
- Rhee, J., Im, J., Carbone, G., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2875-2887.
- Rouse, J., Hass, R., Schell, J., Deering, D., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symp.*, 1, 309-317.
- Roy, D., Borak, J., Devadiga, S., Wolfe, R., Zheng, M., Descloitres, J., 2002. The MODIS Land Product Quality Assessment Approach. *Remote Sensing of Environment*, 83, 62-76.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224.
- Son, N., Chen, C., Chen, C., Chang, L., Minh, V., 2012. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 417-427.
- Sun, L., Sun, R., Li, X., Liang, S., Renhua, Z., 2012. Monitoring surface soil moisture status based on remotely sensed surface temperature and vegetation index information. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166-167, 175-187.
- Sun, W., Wang, P., Zhang, S., Zhu, D., Liu, J., Chen, J., 2008. Using the vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5133-5144.
- Wan, Z., Wang, P., Li, X., 2004. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 61-72.
- Wang, C., Qi, S., Niu, Z., Wang, J., 2004. Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30, 671-679.
- Wang, H., Li, X., Long, H., Xu, X., Bao, Y., 2010. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: a case study in China's Yongding River basin. *Catena*, 82, 135-145.

- Yang, X., Wu, J. J., Shi, P. J. i Yan, F., 2008. Modified triangle method to estimate soil moisture status with MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products. *The International Archives of the Photogrammetry*, 37, 555-560.
- Zawadzki, J., 2002. Badania korelacji przestrzennych zawartości wybranych pierwiastków śladowych w glebach Warszawy i okolic. *Ochrona Środowiska*, 24(4), 17-26.

METHOD FOR DETERMINING AND STATISTICAL ANALYSIS
OF TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS INDEX TVDI.
STUDY CASE KAMPINOSKI NATIONAL PARK

Jarosław Zawadzki, Karol Przeździecki

Department of Environmental Engineering, Warsaw University of Technology
ul. Nowowiejska 20, 00-661 Warszawa
email: j.j.zawadzki@gmail.com

Abstract. The paper presents a study on the determination of soil moisture using the so-called triangle method which is based on analysis of the scatter plots of LST (Land Surface Temperature) and VI (Vegetation Index). On the basis of LST-VI scatter plot the called temperature-vegetation drought index, TVDI (Temperature-Vegetation Dryness Index), can be determined, which is a good measure of the soil moisture available to plants. However, determination of such an index can be carried out in several manners and using different vegetation indices. The aim of the work was to present and compare three types of method for determining the TVDI index using two different vegetation indices, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index), with particular emphasis on determining the so-called "dry edge". The TVDI drought index was determined for the Kampinos National Park area. The authors obtained interesting results, consistent with the literature. In this paper the authors present in detail, and compare with each other, three methods of determining the TVDI index using two vegetation indices - NDVI and EVI, with particular emphasis on determining so-called "dry edge". In addition, a detailed statistical analysis of the results obtained by using three modifications of the triangle method was performed. It is worth to mention that soil moisture, and thus the measuring methods, are important from both the scientific and the practical point of view (e.g. risk of fire, agriculture).

Keywords: satellite observations of forests, soil moisture, triangle method, TVDI, MODIS