

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Georóżnorodność z ArcGIS Desktop

Obliczanie różnorodności cząstkowej

Rzeźba terenu

Tomasz Bartuś

Na podstawie materiałów szkoleniowych ESRI
Wyłącznie do użytku wewnętrznego AGH

<http://home.agh.edu.pl/bartus>
07.03.2024 07:53:00

Różnorodności cząstkowe kryteriów opisujących rzeźbę terenu

Analiza rzeźby terenu jest jednym z najważniejszych aspektów badań środowiskowych i modelowań przestrzennych. W przeszłości badania morfometryczne wymagały długotrwałych prac terenowych, analiz map i zdjęć lotniczych (np. Horton 1945; Strahler 1957). Analogowa klasyfikacja form geomorfologicznych była bardzo pracochłonna, cechowała się wysokim subiektywizmem i brakiem powtarzalności. Współcześnie nauka pozyskała nowe, wydajne narzędzia pozwalające na znaczne usprawnienie i przyspieszenie analiz morfometrycznych. Dzięki powszechnej dostępności cyfrowych zdjęć lotniczych, satelitarnych, LIDAR¹ i innych oraz nowoczesnemu oprogramowaniu skomplikowane analizy zostały zobiektywizowane i zyskały wysoką wiarygodność i powtarzalność. Od wczesnych lat 70. ubiegłego stulecia bezpośrednim źródłem danych morfometrycznych są cyfrowe modele wysokościowe. Na ich podstawie obliczane są podstawowe i wtórne atrybuty morfometryczne² (Schmidt & Dikau 1999; Wilson & Gallant 2000; Weiss 2001; Blyth *i in.* 2004; Urbański 2011).

W opisie struktury krajobrazu i ocenie różnorodności rzeźby terenu uwzględnimy przestrzenną zmienność hipsometrii, ekspozycji, nachylenia i krzywizny stoków, a także zróżnicowanie podstawowych form morfologicznych (Tab. 1).

Tab. 1. Elementy i cechy krajobrazu rzeźby terenu

Cel oceny	Element krajobrazu	Cecha krajobrazu
morforóżnorodność	rzeźba terenu	hipsometria
		ekspozycja stoków
		nachylenia stoków
		krzywizna stoków
		podstawowe formy morfologiczne

¹ LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) – lotniczy skanowanie laserowe – jedna z najnowocześniejszych technik pozyskiwania danych służących tworzeniu cyfrowych modeli wysokościowych.

² Atrybuty morfometryczne (topograficzne) – zmienne ilościowe opisujące ukształtowanie powierzchni terenu. W literaturze są opisywane jako: podstawowe (*primary topographic attributes*), np.: nachylenie, ekspozycja i krzywizna stoków, oraz wtórne atrybuty topograficzne (*secondary topographic attributes*), np.: Slope Position Index (SPI), Topographic Wetness Index (TWI) i inne (Wieczorek & Żyszkowska 2011)

Dane

1. Numeryczny model terenu

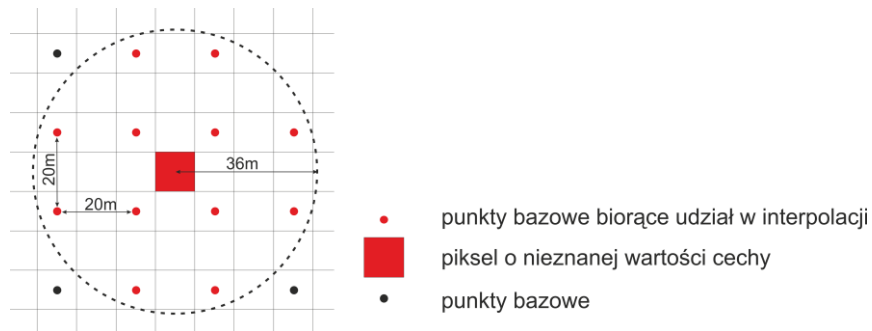
Numeryczne modele terenu (NMT) są cyfrowymi „obrazami” powierzchni Ziemi, które w sposób dyskretny przechowują informację o wysokości / głębokości przedstawianej powierzchni. W polskiej literaturze pod nazwą NMT ukryte są dwa anglojęzyczne terminy: *Digital Elevation Model* (DEM)³ oraz *Digital Terrain Model* (DTM)⁴ (Urbański 2011). Niezależnie od stosowanej terminologii NMT wnoszą do analiz morfometrycznych, środowiskowych, ekologicznych, hydrologicznych i innych najwięcej informacji (Moore i in. 1991; Blaszczyński 1997).

Do utworzenia numerycznego modelu terenu (NMT) OPN i jego okolic (zob. Ryc. 4) posłużyła regularna siatka bazowych punktów pomiarowych. Odstępy pomiędzy kolejnymi punktami były stałe i w obu kierunkach siatki prostokątnej wynosiły 20 m. Całkowita ich liczba wynosiła: 225 951, co odpowiada gęstości około 2510 punktów na jeden kilometr kwadratowy. Przybliżoną, rekomendowaną wielkość komórki podstawowej interpolowanej powierzchni określono zgodnie z metodyką przedstawioną przez Tomislava Hengla (2006) na 10 m. Odpowiada to gęstości interpolacji równej 4 pikselom przypadającym na jeden punkt bazowy. Do interpolacji wykorzystywano metodę odwrotnej odległości⁵ w odmianie *Inverse Squared Weighting Method* (Franke 1982). W obliczeniach wykorzystywano ruchome okno w kształcie koła o promieniu 36 m (Ryc. 1; Grohmann & Riccomini 2009). Zastosowane rozwiązanie pozwoliło na ekstrapolację wartości pikseli na podstawie 12 punktów bazowych. W celu zagwarantowania odpowiedniej liczby punktów bazowych potrzebnych do ekstrapolacji wartości pikseli położonych na krawędziach obszaru badań, interpolowana powierzchnia została powiększona i wykraczała poza fragment objęty właściwymi analizami. Numeryczny model terenu był generowany w środowisku ArcGIS Desktop.

³ Digital Elevation Model (DEM) – cyfrowy model terenu. W literaturze polskiej odpowiada mu cyfrowy model wysokościowy (CMW) (Urbański 2011).

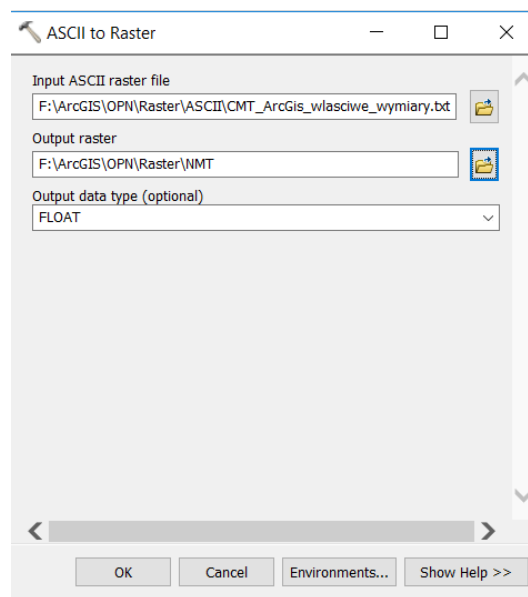
⁴ Digital Terrain Model (DTM) – cyfrowy model terenu, który często zawiera dodatkowo informacje o sposobie użytkowania Ziemi oraz warstwy pochodne DEM, takie jak nachylenie i ekspozycję stoków. W literaturze polskiej odpowiada mu tzw. numeryczny model teren (NMT) (Urbański 2011).

⁵ Metoda odwrotnej odległości IDW (*Inverse Distance Weighting*) to jedna z prostszych metod interpolacji dających jednocześnie dobre rezultaty. Jest oparta na założeniu, że wartość badanej cechy w danym punkcie jest zależna od wartości tej cechy w jej najbliższym otoczeniu (najbliższych punktach bazowych). Wartości mierzone w odległych punktach mają mniejsze znaczenie lub nie mają go wcale. W celu zwiększenia wagi wartości punktów bazowych położonych bliżej punktu centralnego stosowana jest odmiana metody nazywaną *Inverse squared weighting method*. Metoda IDW pozostawia niezmiennione, oryginalne wartości danych wejściowych w punktach bazowych. Analiza posiada wadę polegającą na tym, że wygenerowana powierzchnia ma charakter spłaszczony. Żaden z wyinterpolowanych punktów nie może mieć wartości wyższej od najwyższej wartości ani niższej od najniższej wartości spośród punktów bazowych biorących udział w obliczeniach (Franke 1982).



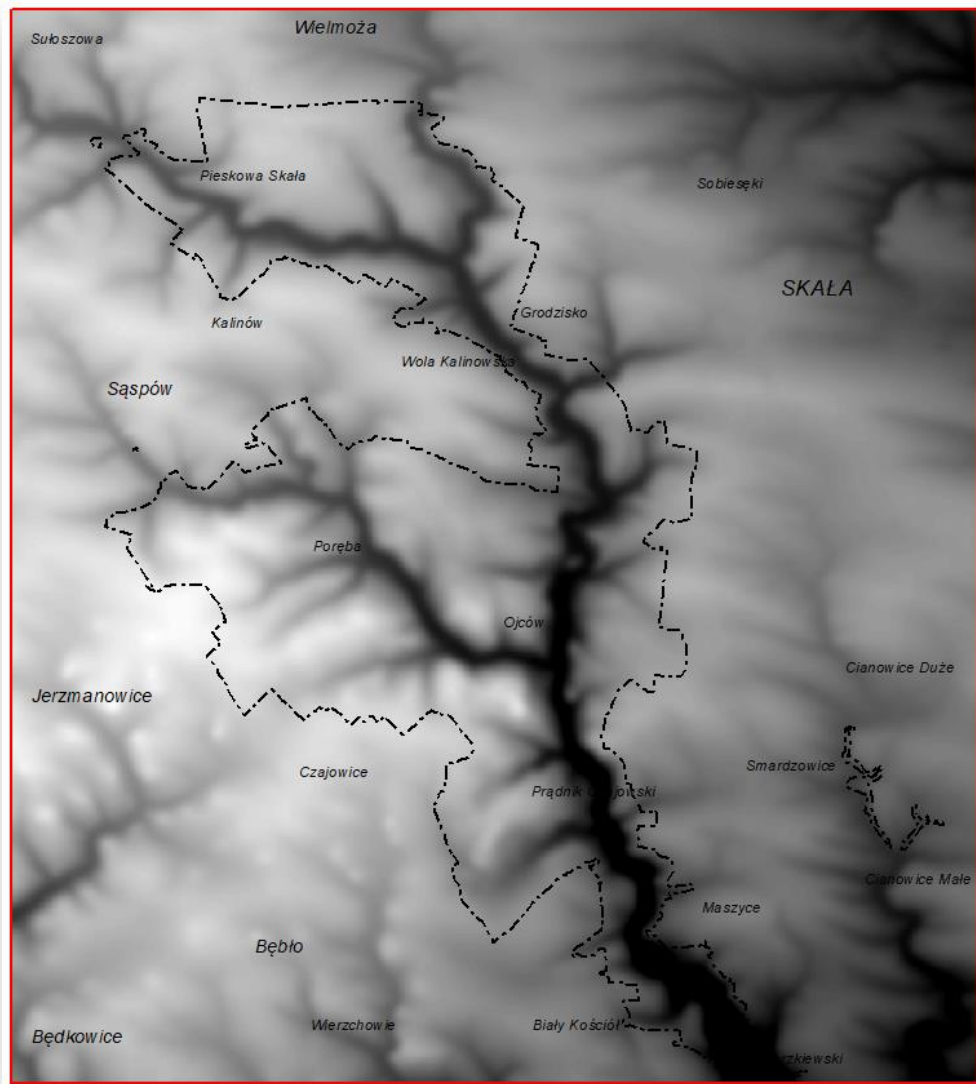
Ryc. 1. Wyznaczanie promienia interpolacji w metodzie IDW

- 1.1. W projekcie dysponujemy powierzchnią NMT w formacie ASCII. Aby ją zaimportować do formatu ESRI GRID wybierz *ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster > ASCII to Raster* (Ryc. 2).



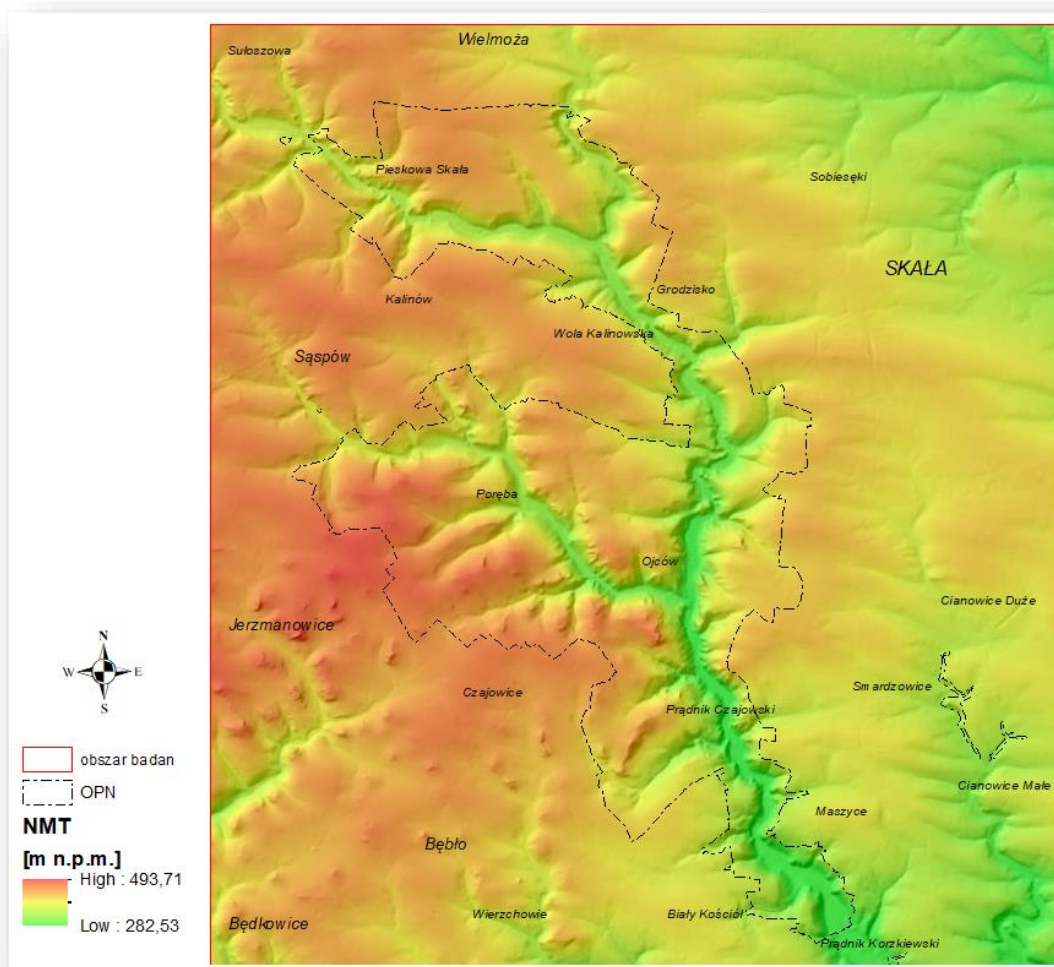
Ryc. 2. Okno dialogowe *ASCII to Raster* konwertujące plik NMT to postaci ESRI GRID

W wyniku działania narzędzia powstaje rastrowy obraz NMT (Ryc. 3).



Ryc. 3. Zaimportowany do projektu rastrowy NMT rejonu OPN i jego okolic

- 1.2. Aby poprawić czytelność mapy zmien skalę barw (*Color Ramp*) na gradient od zieleni do czerwieni (**Ryc. 4**).
- 1.3. We właściwościach warstwy (zakładka *Display*) zmien transparentność warstwy NMT na 40%.
- 1.4. Pod warstwę NMT z serwera WMTS Geoportalu dodaj cieniowany relief terenu (ISOK).
- 1.5. Ogranicz widoczność ramki danych do klasy `obszar_badan`. Robimy to we właściwościach ramki danych, zakładka *Data Frame*, pole *Clip Options*.



Ryc. 4. NMT rejonu OPN i jego okolic; w tle cieniowany relief terenu

2. Mapa ekspozycji stoków

Jednym z ważniejszych egzogenicznych czynników morfotwórczych jest położenie stoku względem kierunku padania promieni słonecznych, czyli tzw. ekspozycja solarna (dalej nazywana ekspozycją stoków). Obszary o monotonnej, poziomej morfologii są nasłonecznione w podobnym stopniu. Na obszarach o zróżnicowanej morfologii ekspozycja zboczy wpływa na ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni terenu i jest bezpośrednim powodem powstawania przestrzennej zmienności temperatury i wilgotności podłoża (Paszyński 1980, 2004; Paszyński *i in.* 1999; Kicińska *i in.* 2001). Ekspozycja stoków, obok zróżnicowania litologicznego oraz nachylenia zboczy, w największym stopniu wpływa na procesy wietrzenia fizycznego skał oraz jakość i intensywność procesów rzeźbotwórczych (Recha *i in.* 2001; Burnett *i in.* 2008). Do głównych efektów wietrzenia spowodowanego nasłonecznieniem zalicza się dezintegrację granulární, eksfoliację i dezintegrację blokową. W rzeczywistości, w strefie umiarkowanej, wychodnie skalne są często pokryte zwietrzeliną skalną i roślinnością, które zaburzają opisywane zjawiska i w znacznym stopniu spowalniają procesy

wietrzeniowe. Efektywne wietrzenie wskutek nasłonecznienia warunkują także: wysoki stopień nagrzania skał oraz wahania temperatury w trakcie ogrzewania i ochładzania.

Ekspozycja stoków w pewnym zakresie może wpływać na sposób i intensywność zmian morfologii na skutek zjawiska zamrozu. Gdy skały są uszczelinione lub porowate, puste przestrzenie są wypełnione wodą (opadową, roztopową lub z kondensacji mgły), a temperatura oscyluje wokół 0°C, w wyniku zamarzania i zwiększenia objętości lodu o około 9%, dochodzi do wzrostu ciśnienia i niszczenia spistości skał. Głównym efektem tego zjawiska jest rozpad blokowy. Produktem wietrzenia fizycznego tego typu jest zwietrzelina blokowo-ziarnisto-pylasta o charakterze glin. Intensywność zjawiska jest silnie uzależniona od litologii skał (Klimaszewski 1963). W umiarkowanych szerokościach geograficznych, poza obszarami wysokogóorskimi, zjawisko zamrozu zachodzi głównie w zimie i wiosną. W Polsce ze względu na dużą liczbę dni z przymrozkami (200 w roku 1990) istnieją warunki klimatyczne sprzyjające rozwojowi wietrzenia zamrozowego. Podlegają mu pozbawione pokrywy zwietrzelinowej, nagie wychodnie skalne.

Ekspozycja stoków, przez przestrzenną zmienność temperatury, wpływa także na intensywność parowania. Zjawisko to ma szczególne znaczenie na nagich wychodniach skał ilastych, np. iłowców, mułowców, glin, lessów lub margli. Utwory te w stanie wilgotnym cechują się znaczną spistością. Po odparowaniu wody rozpadają się na drobne okruchy lub tworzą na powierzchni wychodni charakterystyczne szczeliny dzielące powierzchnię na wieloboczne wklęsłe fragmenty. Powstające formy ułatwiają rozmywanie i modelowanie powierzchni (Klimaszewski 1963).

Na półkuli północnej, na północ od zwrotnika Raka (23°27' N), Słońce zawsze świeci od południowej strony. Za ciepłą ekspozycję (solarną) uważany jest kierunek południowo-zachodni. Skały są w ciągu dnia silnie nagrzewane, a w nocy, zwłaszcza w warunkach górskich, szybko ochładzane. Powoduje to, że w umiarkowanych szerokościach geograficznych nagie wychodnie skał eksponowane w tym kierunku, w pewnym zakresie, poddawane są temu rodzajowi wietrzenia (Klimaszewski 1963).

Ilość światła docierającego do powierzchni w istotny sposób wpływa także na wegetację (Davis & Goetz 1990; Bennie *i in.* 2006) i zróżnicowanie siedliskowe organizmów roślinnych i zwierzęcych (Stage 1976; Burnett *i in.* 1998).

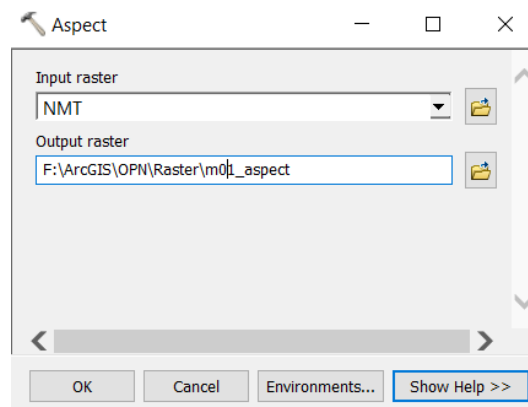
Przygotowanie zbioru nachyleń stoków do analizy różnorodności

- 2.1. Raster ekspozycji stoków stworzymy przy użyciu narzędzia *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Surface > Aspect*. Uruchom to narzędzie.

Uwaga:

Jeżeli pojawi się okno informujące o braku licencji na używanie narzędzi *3D Analyst* (lub inne), przejdź w menu głównym *Customize > Extensions* i włącz wymagany zestaw narzędzi.

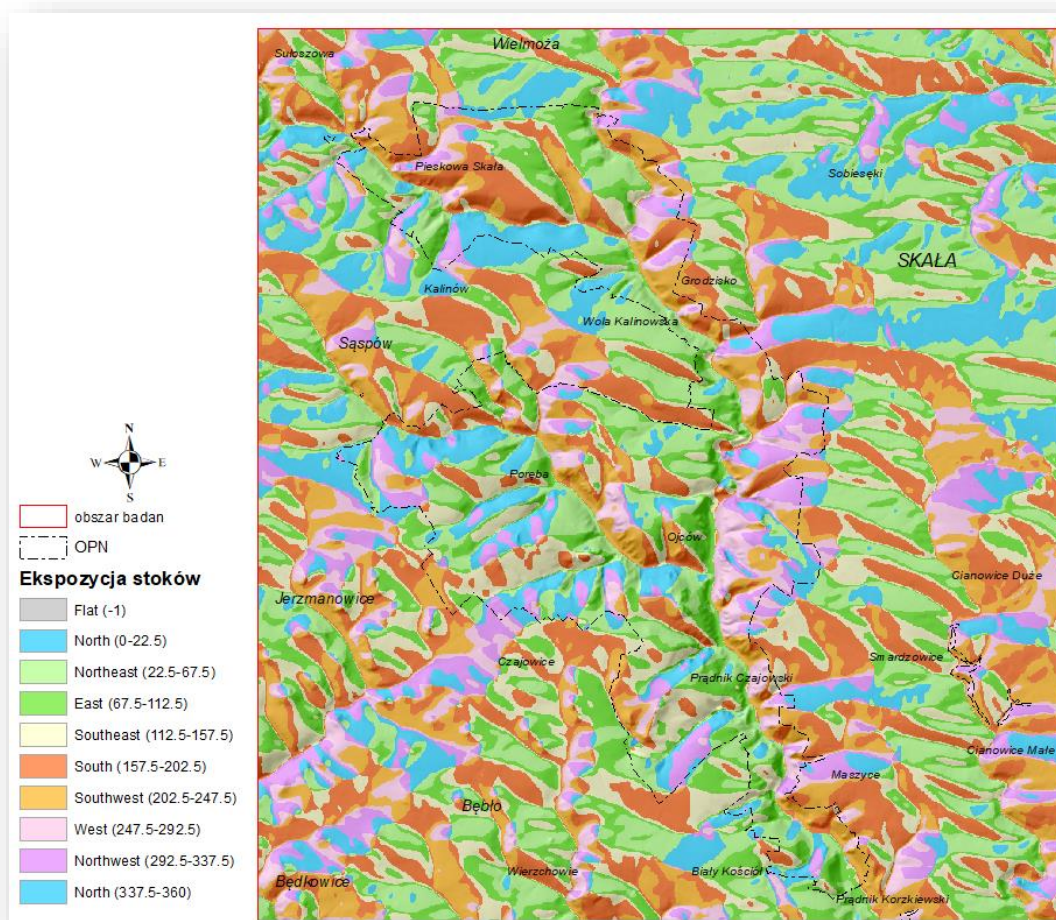
- 2.2. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź NMT (**Ryc. 5**).
- 2.3. Jako raster wyjściowy (*Output raster*) wprowadź m01_aspect.



Ryc. 5. Okno dialogowe *Aspect* generujące raster ekspozycji stoków

- 2.4. Naciśnij przycisk *OK*.

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy mapę ekspozycji stoków (**Ryc. 6**).



Ryc. 6. Ekspozycja stoków w OPN i jego okolicach

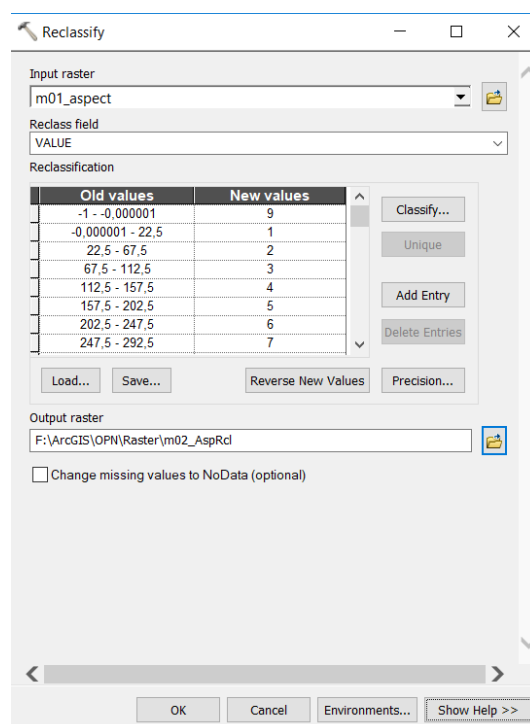
Aby móc dalej przetwarzać raster ekspozycji stoków musimy go skonwertować z danych typu zmiennoprzecinkowego (*float*) do całkowitych (*integer*).

- 2.5. Otwórz narzędzie *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Reclass > Reclassify*. Skonwertujemy nim dane zmiennoprzecinkowe do całkowitych.
- 2.6. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór `m01_aspect` (Ryc. 7).
- 2.7. Reklasyfikację rastra ekspozycji stoków przeprowadź wykorzystując dane z tabeli Tab. 2.

Tab. 2. Kategorie ekspozycji stoków

Zakres azymutów [°]	Ekspozycja	kod
<0,0; 22,5>	N	1
(22,5; 67,5>	NE	2
(67,5; 112,5>	E	3
(112,5; 157,5>	SE	4
(157,5; 202,5>	S	5
(202,5; 247,5>	SW	6
(247,5; 292,5>	W	7
(292,5; 337,5>	NW	8
(337,5; 360,0>	N	1
-1	obszary płaskie	9

- 2.8. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź m02_AspRcl, a następnie wciśnij przycisk OK.

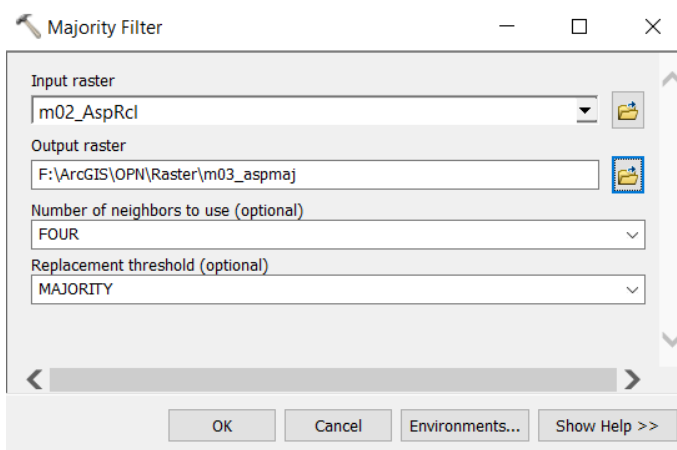


Ryc. 7. Reklasyfikacja wartości zmiennoprzecinkowych rastra ekspozycji stoków do wartości całkowitych

Otrzymany plik rastra m02_AspRcl nie różni się wyraźnie od pliku rastra m01_aspect (Ryc. 6). Jeśli jednak użyjemy narzędzia *Identify* (*Identyfikacja*) okaże się, że wartości atrybutu *Value* pikseli zostały zmienione z liczb zmiennoprzecinkowych na całkowite.

Aby pozbyć się różnego rodzaju artefaktów modelowania (pojedyncze piksele o odmiennej wartości atrybutu *Value* od przeważających pikseli otoczenia), dokonamy generalizacji obrazu.

- 2.9. Otwórz narzędzie *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Generalization > Majority Filter*.
- 2.10. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór m02_AspRcl.
- 2.11. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź m03_AspMaj (Ryc. 8).
- 2.12. Opcje generalizacji *Number of neighbors to use* (*Liczba użytych sąsiadów*) oraz *Replacement threshold* (*Próg zastępowania*) pozostaw bez zmian. Po więcej informacji na temat dostępnych opcji oraz samego narzędzia odsyłam do pracy Bartuś (2014b).

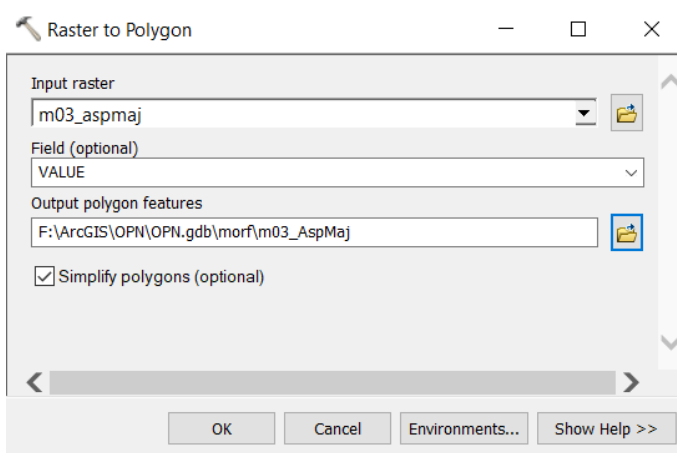


Ryc. 8. Generalizacja rastra ekspozycji stoków za pomocą narzędzia *Majority Filter*

Różnice w otrzymanym rastrze w porównaniu do rastra pierwotnego nie są duże ale pozwolą na ograniczenie liczby poligonów, które w następnym kroku będą wektoryzowane z danych rastrowych.

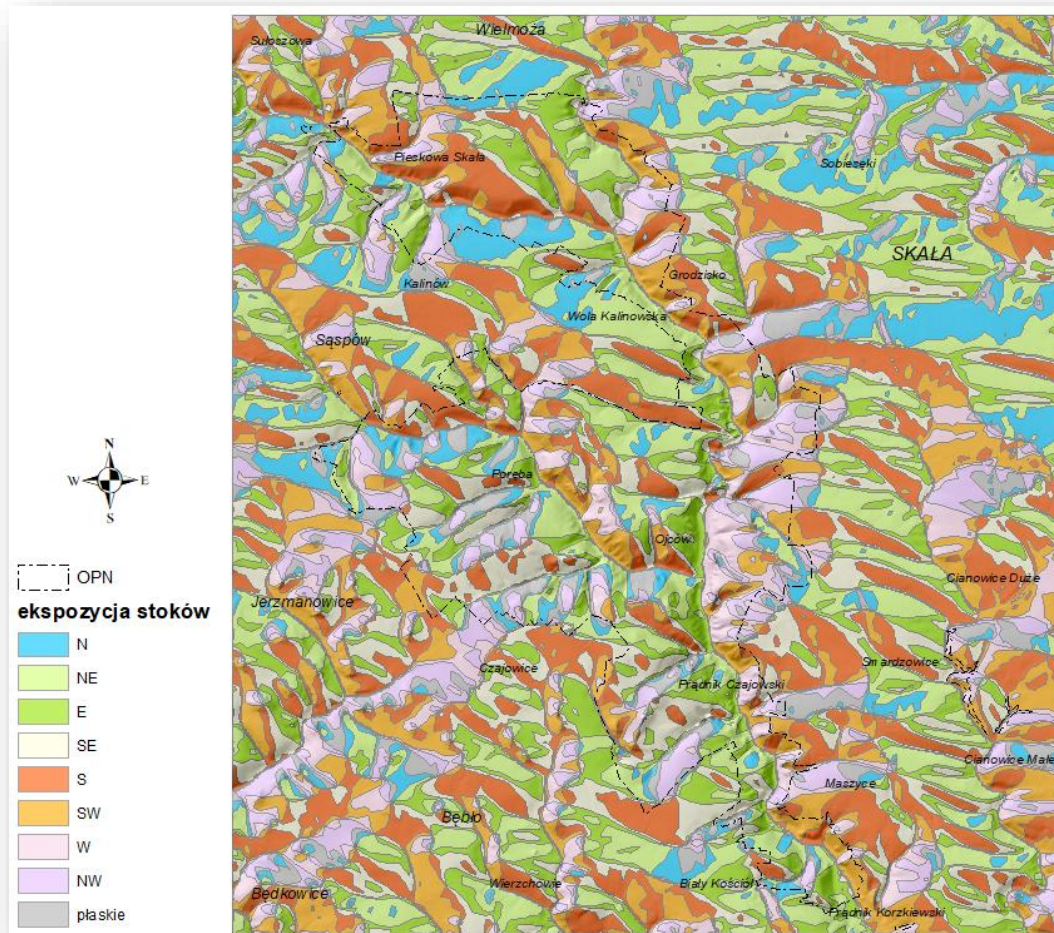
W ostatnim kroku tej części analizy opracujemy wektorową klasę ekspozycji stoków. Będzie nam ona potrzebna do oceny różnorodności rzeźby terenu.

- 2.13. W geobazie *OPN* utwórz zestaw danych *morf*. Będziemy w nim gromadzili wszystkie wektorowe dane dotyczące rzeźby terenu.
- 2.14. Uruchom narzędzie *ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*. Posłuży nam ono do wektoryzacji rastrowego zbioru ekspozycji stoków.
- 2.15. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór *m03_AspMaj*.
- 2.16. Jako wyjściową klasę poligonową (*Output Polygon Features*) wprowadź identyczną nazwę jak dla zbioru rastrowego czyli *m03_AspMaj* (Ryc. 9).



Ryc. 9. Okno dialogowe *Raster to Polygon* generujące wektorową klasę ekspozycji stoków

W wyniku działania narzędzia zostaje utworzona poligonowa klasa ekspozycji stoków *m03_AspMaj* (Ryc. 10).



Ryc. 10. Wektorowa klasa ekspozycji stoków; w tle cieniowany relief terenu

Opracowaną klasę ekspozycji stoków (Wieczorek & Żyszkowska 2011) będzie wykorzystana w analizach struktury krajobrazu i georóżnorodności rzeźby terenu oraz do utworzenia modelu zróżnicowania topoklimatycznego.

3. Mapa nachyleń stoków

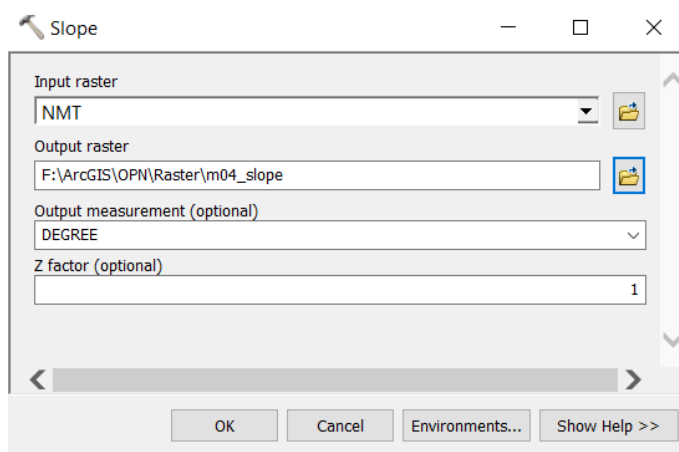
Nachylenie stoków stanowi jeden z najważniejszych czynników wpływających na postrzeganie krajobrazu. Jest definiowane jako kąt zawarty pomiędzy powierzchnią terenu a płaszczyzną poziomą i wyznaczany w kierunku największego spadku (Urbański 2011). Wielkość nachyleń stoków wpływa na rodzaj i dynamikę procesów morfotwórczych – denudacji i akumulacji. W zależności od natury zjawiska warunkuje ona jakość i intensywność ruchów masowych i spłukiwania (Klimaszewski 1963). Nachylenie stoków wpływa na ilość promieniowania słonecznego docierającego do eksponowanej powierzchni. Południowe stoki o nachyleniach około 30° absorbują o 30% promieniowania więcej w stosunku do powierzchni horyzontalnej, a do podobnych stoków o ekspozycji północnej dociera zaledwie o 10% promieniowania mniej niż do powierzchni poziomych (Kicińska i in. 2001). Nachylenie stoków jest także istotnym czynnikiem

wpływającym na wegetację roślin (Boligłowa & Znój 2003), reguluje sposób rolniczego użytkowania ziemi, zagospodarowania przestrzennego i warunkuje rozwój sieci komunikacyjnej.

Z praktycznego punktu widzenia klasy nachyleń stoków są wykorzystywane w analizach przestrzennych stref zagrożeń ruchami masowymi (np.: Traczyk 2000; Adams *i in.* 2003) do określenia skutków działania tych procesów (np.: Węzyk 2012), w analizach spływu powierzchniowego, stopnia uwilgocenia gleby, pokrycia roślinnością, zróżnicowania topoklimatycznego (np.: Paszyński 1980; Kicińska *i in.* 2001; Bartuś 2014a), do określenia jakości wegetacji (np.: Bennie *i in.* 2006), definicji klasy gruntów (np.: Witek 1973), różnorodności krajobrazowej (np.: Wilson & Gallant 2000) i innych.

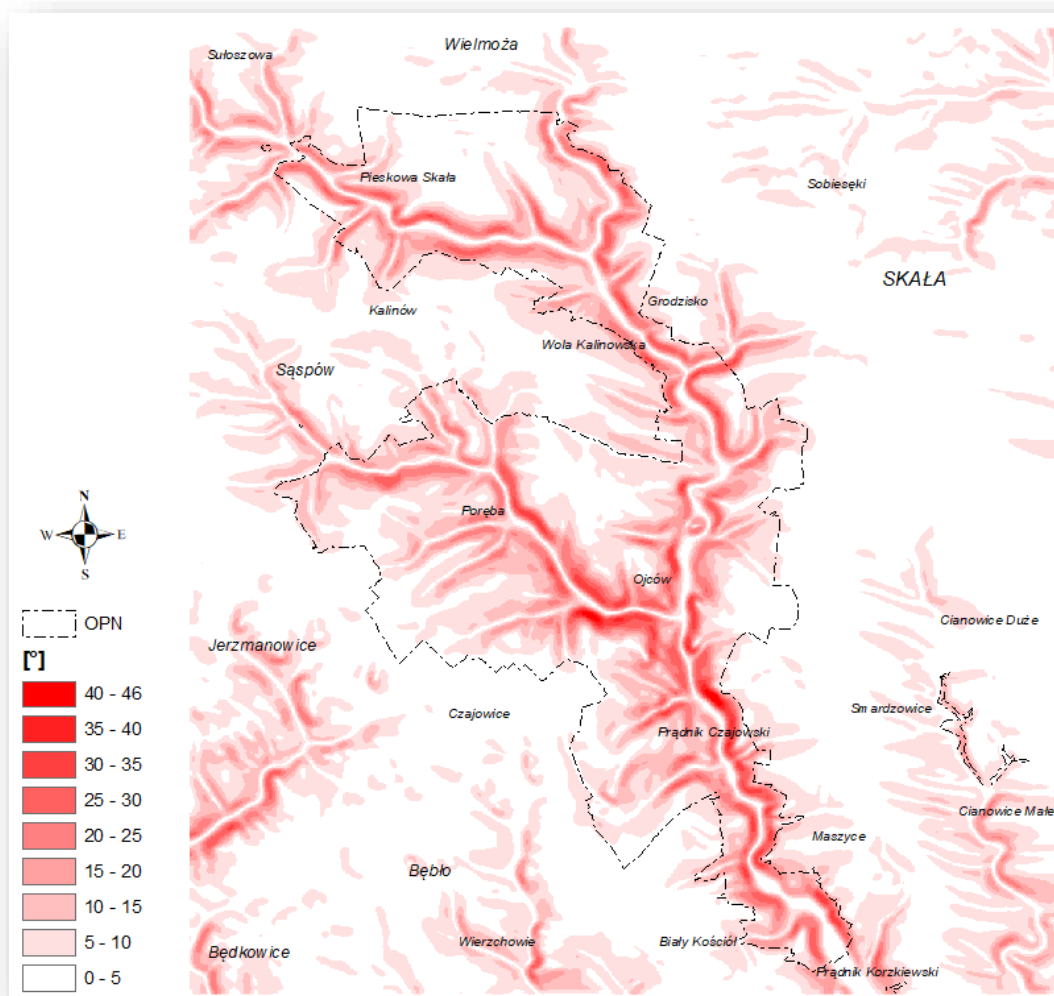
Przygotowanie zbioru nachyleń stoków do analizy różnorodności

- 3.1. Raster nachyleń stoków tworzymy przy użyciu narzędzia *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Surface > Slope*. Uruchom to narzędzie.
- 3.2. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź NMT (Ryc. 11).
- 3.3. Jako raster wyjściowy (*Output raster*) wprowadź m04_slope.
- 3.4. Jako jednostkę danych wyjściowych pozostaw stopnie DEGREE, a jako wartość jednostki 1.



Ryc. 11. Okno dialogowe narzędzia *Slope* generującego raster nachylenia stoków

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy raster nachyleń stoków (Ryc. 12).



Ryc. 12. Rastrowy model nachylenia stoków w OPN i jego okolicach; klasyfikacja 5-sopniowa

W warunkach terenowych percepcja nachylenia stoków jest utrudniona, dlatego w analizach zastosujemy klasyfikację uproszczoną, obrazującą przestrzenną zmienność trzech zasadniczych kategorii: obszarów płaskich i o niewielkim nachyleniu stoków (0–5°), o średnim nachyleniu (5–20°) oraz o stromym nachyleniu zboczy (20–46°⁶).

Aby móc przetwarzać raster nachyleń stoków, podobnie jak dla ekspozycji stoków musimy go skonwertować z typu danych zmiennoprzecinkowych do liczb całkowitych.

- 3.5. Otwórzmy narzędzie *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Reclass > Reclassify*. Posłuży nam ono do konwersji danych zmiennoprzecinkowych do danych całkowitych.
- 3.6. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór `m04_slope`.

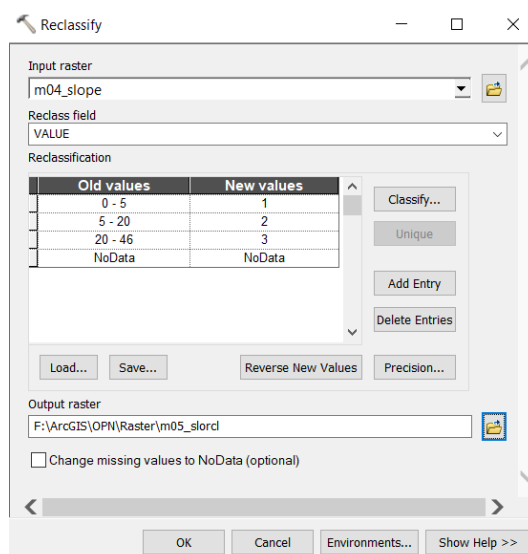
⁶ 46° to maksymalna obliczona wartość nachylenia stoków w analizowanym rastrze

- 3.7. Reklasyfikację rastra ekspozycji stoków przeprowadź wykorzystując dane z tabeli **Tab. 3**.

Tab. 3. Kategorie nachyleń stoków

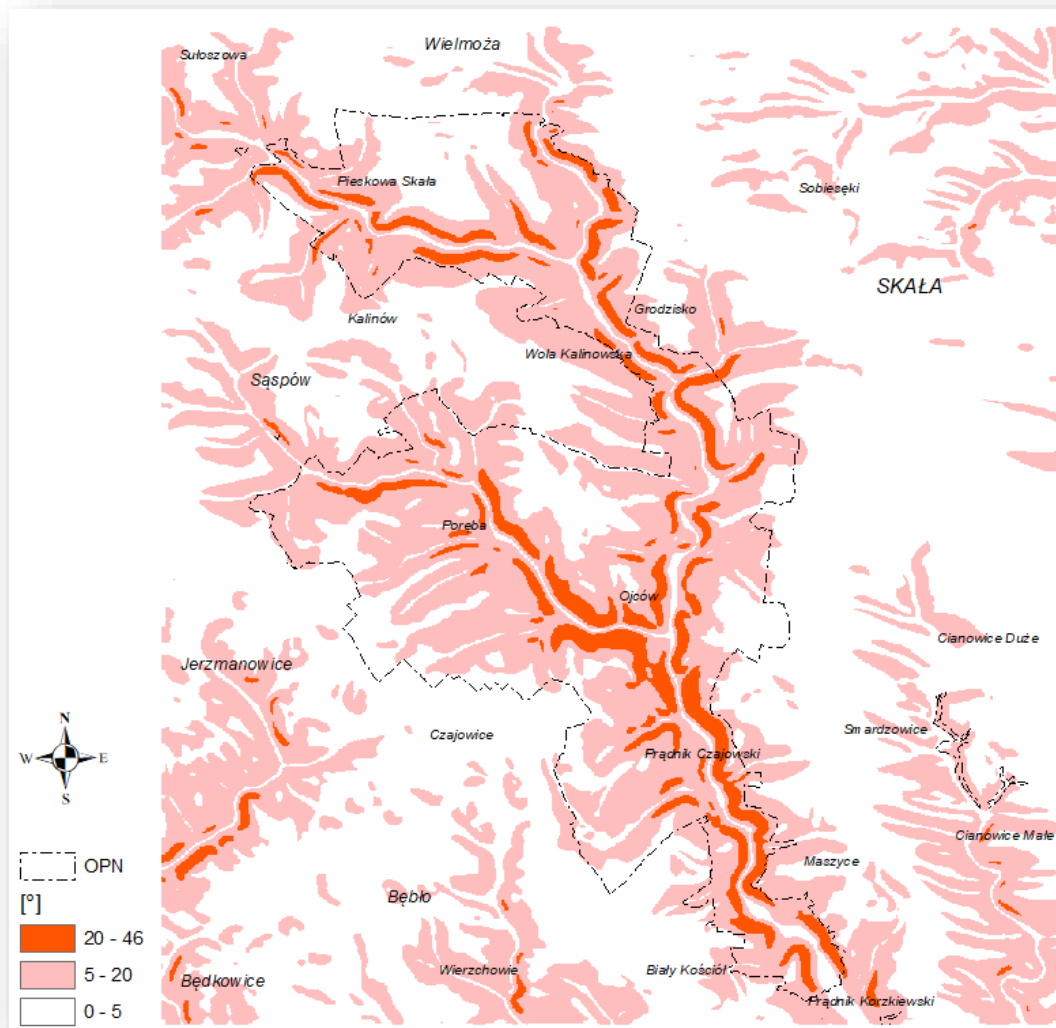
Nachylenie stoków [°]	kod
<0; 5>	1
(5; 20>	2
(20; 46>	3

- 3.8. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź `m05_SloRcl` (**Ryc. 13**), a następnie wciśnij przycisk **OK**.



Ryc. 13. Reklasyfikacja wartości zmiennoprzecinkowych rastra nachylenia stoków do wartości całkowitych

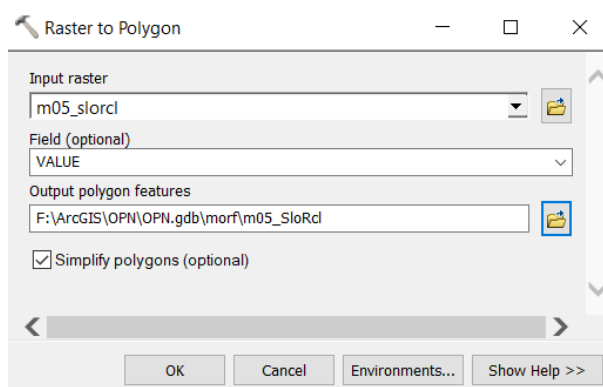
Otrzymany plik rastra `m05_SloRcl` nie różni się wyraźnie od pliku rastra `m04_slope` (**Ryc. 12**). Jeśli jednak użyjemy narzędzia *Identyfikuj* (*Identyfikacja*) okazuje się, że wartości pikseli zmienione zostały ze zmiennoprzecinkowego na całkowity.



Ryc. 14. Rastrowy model nachyleń stoków w OPN i jego okolicach; 3 kategorie

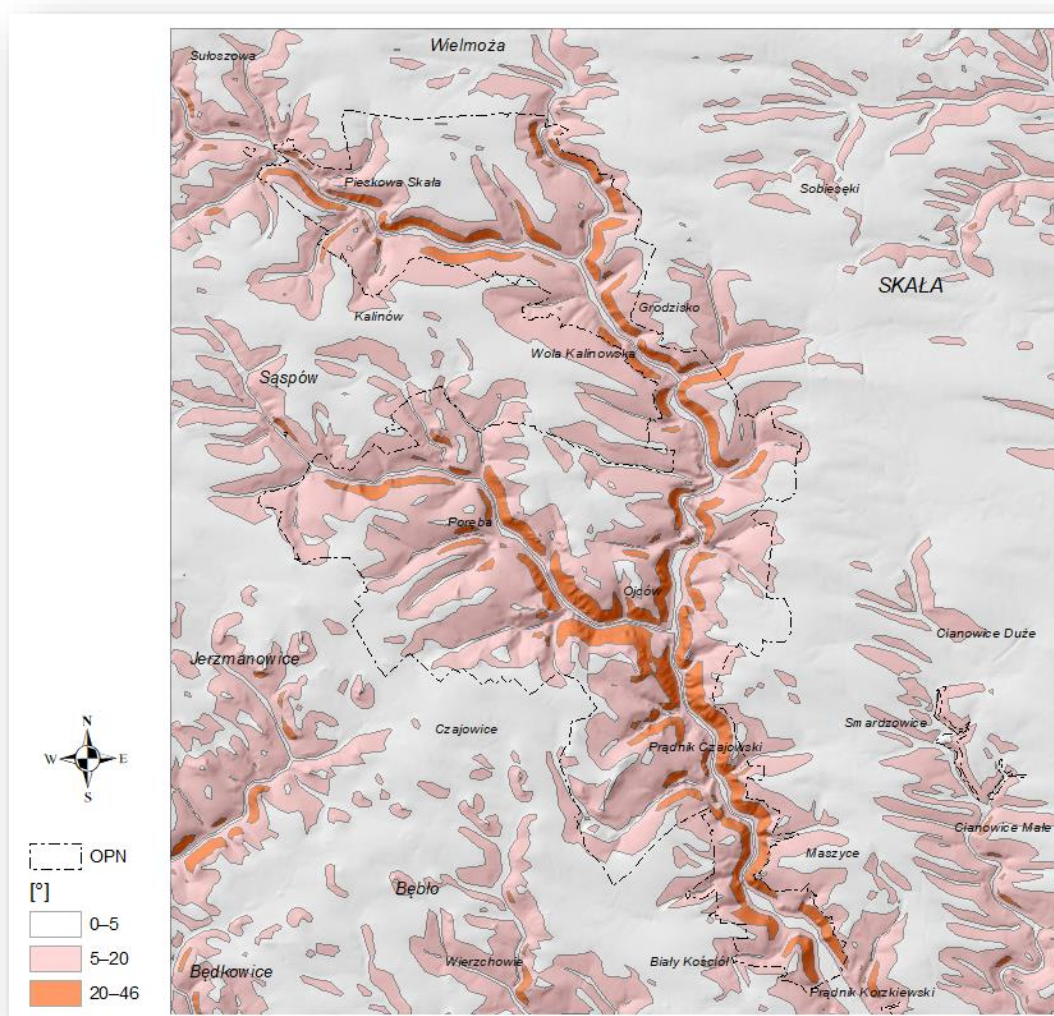
W ostatnim kroku tej części analizy opracujemy wektorową klasę nachyleń stoków. Będzie nam ona potrzebna do oceny jednego z kryteriów różnorodności rzeźby terenu.

- 3.9. Uruchom narzędzie *ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*. Z jego pomocą zwektoryzujemy rastrowy zbiór nachyleń stoków.
- 3.10. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór `m05_SloRc1`.
- 3.11. Jako wyjściową klasę poligonową (*Output polygon features*) wprowadź identyczną nazwę jak dla zbioru rastrowego czyli `m05_SloRc1` (Ryc. 15).



Ryc. 15. Okno dialogowe narzędzia *Raster to Polygon* wektoryzującego klasę nachyleń stoków

W wyniku działania narzędzia zostaje utworzona poligonowa klasa nachyleń stoków m05_SloRcl (**Ryc. 16**).



Ryc. 16. Wektorowa klasa nachyleń stoków; w tle cieniowany relief terenu

Opracowana klasa nachyleń stoków (Wieczorek & Żyszkowska 2011) będzie wykorzystywana w analizach różnorodności rzeźby terenu oraz do modelowania topoklimatycznego.

4. Mapy krzywizny stoków

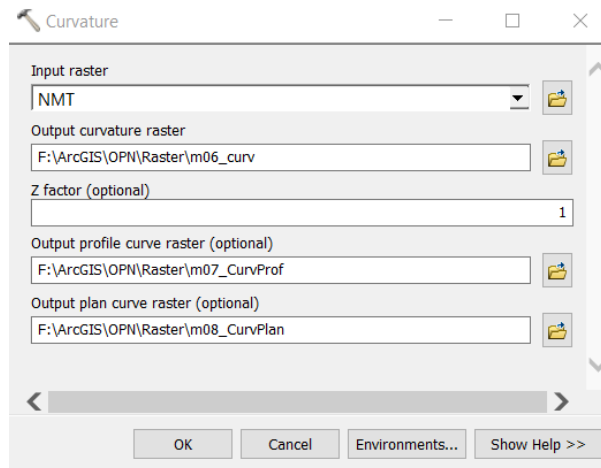
Krzywizna należy do grupy podstawowych atrybutów topograficznych i służy do opisu kształtu stoków (Wieczorek & Żyszkowska 2011). Współczesne oprogramowanie umożliwia wyznaczenie krzywizny planarnej (in. poziomic, *plan curvature*), wertykalnej (in. profilu, *profile curvature*) oraz krzywizny sumarycznej (całkowitej). Krzywizna planarna opisuje kształt poziomic na powierzchni poziomej. Pozwala ona na wyodrębnienie fragmentów zboczy mających tendencję do konwergencji (zbieżności) spływu powierzchniowego oraz obszarów powodujących jego dywergencję (rozbieżność). Atrybut przyjmuje wartości proporcjonalne do stopnia zakrzywienia powierzchni morfologicznej, ujemne dla dolin, dodatnie dla grzbietów oraz zbliżone do zera dla stoków prostych w planie. Krzywizna profilu opisuje zmianę nachylenia wzdłuż linii spływu i pozwala na określenie kształtu stoku. Atrybut przyjmuje wartości dodatnie dla stoków wklęsłych w profilu, ujemne dla stoków wypukłych w profilu oraz zbliżone do zera dla stoków prostych w profilu. Krzywizna sumaryczna nie opisuje zakrzywienia linii (poziomic bądź profilu) lecz wyznacza zakrzywienie płaszczyzny topograficznej. Tak jak poprzednio, atrybut może przyjmować wartości ujemne (dla obszarów wklęsłych) bądź dodatnie (dla obszarów wypukłych).

Przygotowanie zbiorów krzywizn stoków do analizy różnorodności

- 4.1. Rastry krzywizn stoków tworzymy przy użyciu narzędzia *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Surface > Curvature*. Uruchom to narzędzie.
- 4.2. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź NMT (Ryc. 17).

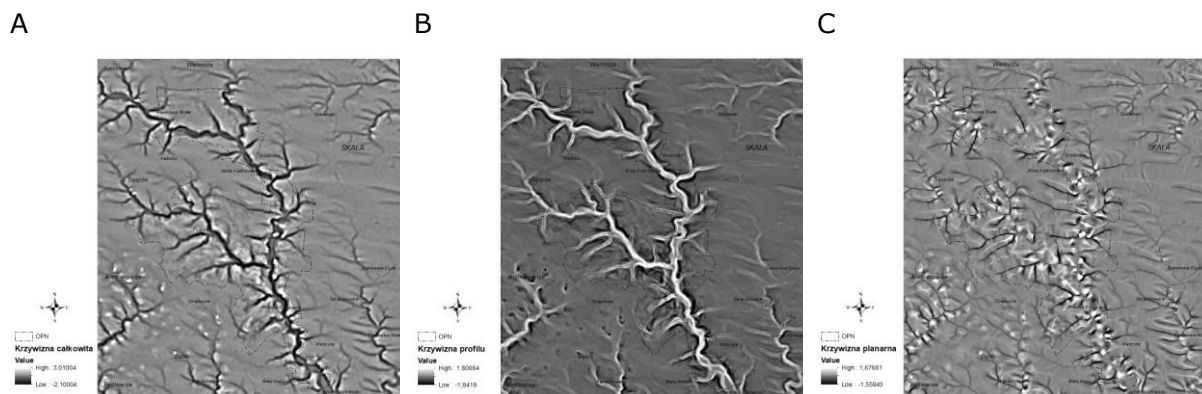
Narzędzie *Curvature* za jednym zamachem tworzy trzy pliki wynikowe:

- raster krzywizny całkowitej,
 - raster krzywizny wertykalnej (profilu),
 - raster krzywizny planarnej (poziomic).
- 4.3. Jako raster wyjściowy krzywizny całkowitej (*Output curvature raster*) wprowadź m06_curv.
 - 4.4. Jako raster wyjściowy krzywizny profilu (*Output profile curvature raster*) wprowadź m07_CurvProf.
 - 4.5. Jako raster wyjściowy krzywizny planarnej (*Output plan curvature raster*) wprowadź m08_CurvPlan.
 - 4.6. Pole *Z factor* pozostaw bez zmian.



Ryc. 17. Okno dialogowe narzędzia *Curvature* generującego rastry krzywizn: całkowitej, profilu i planarnej

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy trzy obrazy rastrowe krzywizn: całkowitej (Ryc. 18A), profilu (Ryc. 18B) i planarnej (Ryc. 18C).



Ryc. 18. Mapy krzywizn całkowitej (A), wertykalnej (B) i planarnej (C) OPN i jego okolic

Na obszarach płaskich i o niewielkim nachyleniu zboczy krzywizna stoków jest parametrem, którego percepcja jest ograniczona, dlatego w analizach różnorodności tej cechy krajobrazu wykorzystamy klasy przekształcone. Modyfikacje będą polegały na wykonaniu w ramach algebry map iloczynów przestrzennych z kategorią obszarów o nachyleniu 0–5°.

Utworzymy teraz binarny (dwumianowy) obraz rastrowy. Będzie się on składał z pikseli o wartości „0” – wyznaczających obszary o nachyleniu stoków 0–5° oraz z wartości „1” – wyznaczających obszary pozostałe. Będzie nam on potrzebny do wykonania iloczynów przestrzennych z mapami krzywizn planarnej i wertykalnej.

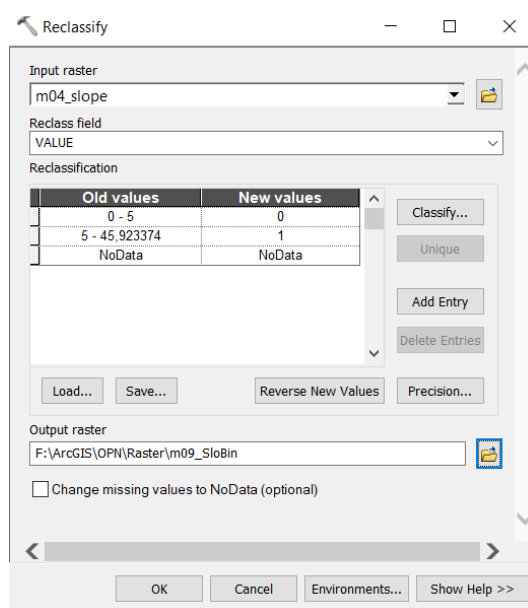
- 4.7. Wprowadź na scenę raster nachyleń stoków `m04_slope`.
- 4.8. W tabeli zawartości wejdź do właściwości rastra `m04_slope` i wybierz zakładkę *Symbolology*. Sklasyfikuj wartości pikseli do dwóch klas: 0–5° oraz 5–46°.

- 4.9. Otwórzmy narzędzie *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Reclass > Reclassify*. Posłuży nam ono do konwersji danych zmiennoprzecinkowych do binarnych danych całkowitych „0” lub „1”.
- 4.10. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór `m04_slope` (Ryc. 19).
- 4.11. Reklasyfikację rastra ekspozycji stoków przeprowadź wykorzystując dane z tabeli Tab. 4. Dla obszarów płaskich lub o niewielkim nachyleniu stoków wybieramy wartość „0”, a dla pozostałych obszarów „1”. Wykorzystamy to w dalszym ciągu analizy podczas tworzenia iloczynów przestrzennych z rastremi krzywizn planarnej i wertykalnej.

Tab. 4. Kategorie ekspozycji stoków

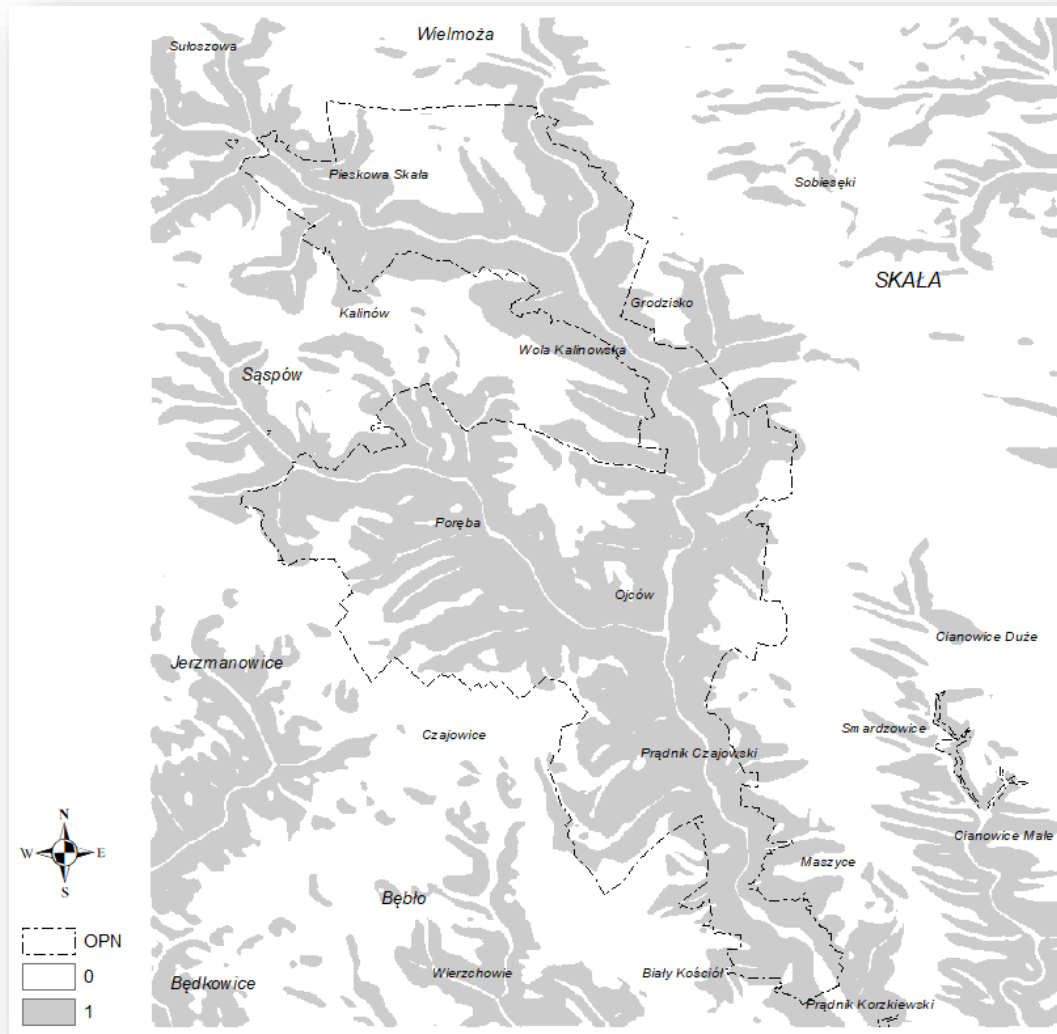
Zakres azymutów [°]	kod
<0; 5>	0
(5; 46>	1

- 4.12. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź `m09_sloBin`, a następnie wciśnij przycisk *OK*.



Ryc. 19. Reklasyfikacja wartości nachyleń stoków do dwóch poziomów „0” (obszary o nachyleniu stoków 0–5°) i „1” (obszary pozostałe)

W wyniku reklasyfikacji otrzymujemy obraz składający się z dwóch kategorii pikseli „0” i „1” (Ryc. 20).



Ryc. 20. Binarna mapa nachyleń stoków OPN i jego okolic; 0 – obszary o nachyleniu stoków 0–5°, 1 – obszary o nachyleniu stoków 5–46°

Nadszedł czas aby wykonać iloczyn przestrzenne map krzywizn planarnej (Ryc. 18 C) i wertykalnej (Ryc. 18 B) z binarną klasą nachyleń stoków (Ryc. 20). Sens operacji nazywanej też logiczną koniunkcją tłumaczy Ryc. 21.

2	3	3	2
1	4	2	4
2	5	1	5
4	1	3	6

×

0	0	0	0
1	0	0	1
0	0	1	1
0	1	1	1

=

0	0	0	0
1	0	0	4
0	0	1	5
0	1	3	6

Ryc. 21. Przykład iloczynu przestrzennego (koniunkcji) dwóch warstw rastrowych – jednej z wartościami pikseli całkowitymi oraz drugiej w wartościach binarnych

4.13. Z lokalizacji *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator* uruchom kalkulator rastrow.

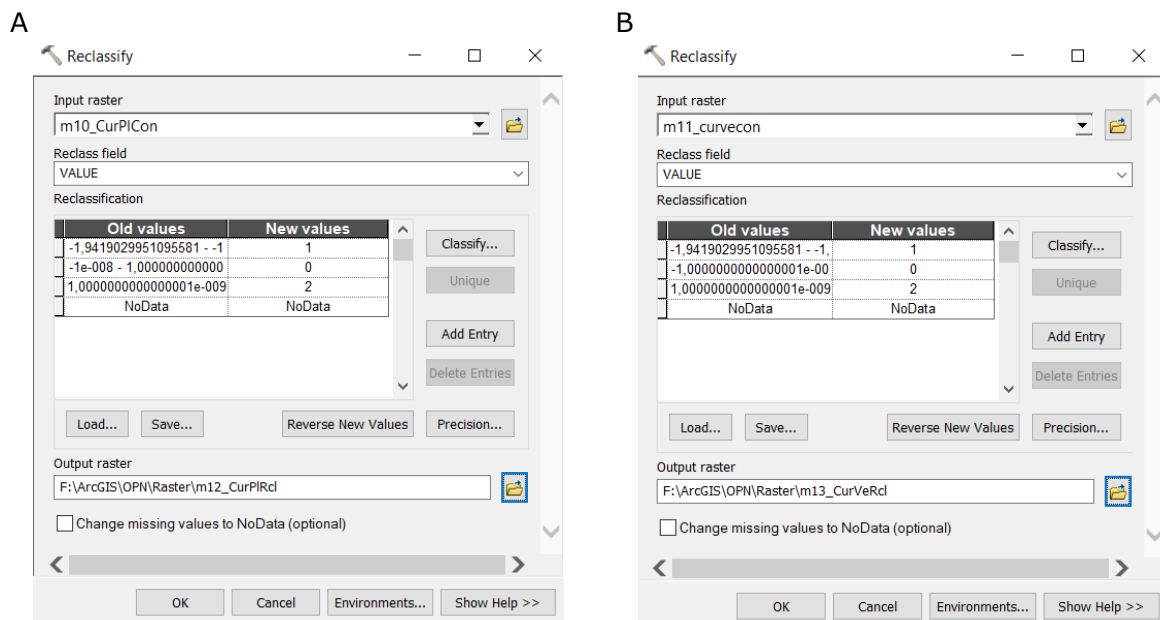
Hybrydowe mapy krzywizny planarnej (Ryc. 23A) oraz wertykalnej (Ryc. 23B) należy teraz zreklasyfikować do trzech poziomów wartości całkowitych „0” – oznaczających obszary płaskie lub o niewielkim nachyleniu zboczy 0–5° oraz „1” – oznaczających stoki wypukłe w profilu (dla krzywizny profilu) albo stoki mające tendencję do konwergencji spływu powierzchniowego (dla krzywizny planarnej) oraz „2” – oznaczających stoki wklęsłe w profilu (dla krzywizny profilu) albo stoki mające tendencję do dywergencji spływu powierzchniowego (dla krzywizny planarnej) (Tab. 5).

Tab. 5. Docelowe kategorie map krzywizn planarnej i wertykalnej

Mapa	Wartości atrybutów		Interpretacja
	przed klasyfikacją	po klasyfikacji	
krzywizny profilu	0	-	stoki proste w profilu
	ujemne	1	stoki wypukłe w profilu
	dodatnie	2	stoki wklęsłe w profilu
	-	0	obszary płaskie lub o niewielkim nachyleniu zboczy 0–5°
krzywizny poziomic	0	-	stoki płaskie w planie
	ujemne	1	stoki mające tendencję do konwergencji spływu powierzchniowego (np. doliny)
	dodatnie	2	stoki mające tendencję do dywergencji spływu powierzchniowego (np. grzbiety)
	-	0	obszary płaskie lub o niewielkim nachyleniu zboczy 0–5°

- 4.16. Otwórzmy kolejno w tabeli zawartości rastry `m10_CurPlCon` i `m11_CurVeCon` wejdźmy do zakładki *Symbology* i utwórzmy kompozycje złożone z trzech poziomów: liczb ujemnych, „0” oraz wartości dodatnich (zob. granice przykładowych klas poniżej).
 - `(-999; -0,0000000001>`
 - `(-0,0000000001; 0,0000000001>`
 - `<0,0000000001; 999>`
- 4.17. Otwórzmy narzędzie *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Reclass > Reclassify*. Posłużmy nam ono do konwersji danych zmiennoprzecinkowych do wartości całkowitych 0, 1 lub 2 (Tab. 5).
- 4.18. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź najpierw zbiór `m10_CurPlCon` (Ryc. 24A).
- 4.19. Reklasyfikację rastra krzywizny planarnej przeprowadź wykorzystując dane z tabeli Tab. 5.
- 4.20. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź `m12_CurPlRcl`, a następnie wciśnij przycisk *OK*.
- 4.21. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź teraz zbiór `m11_CurVeCon` (Ryc. 24B).

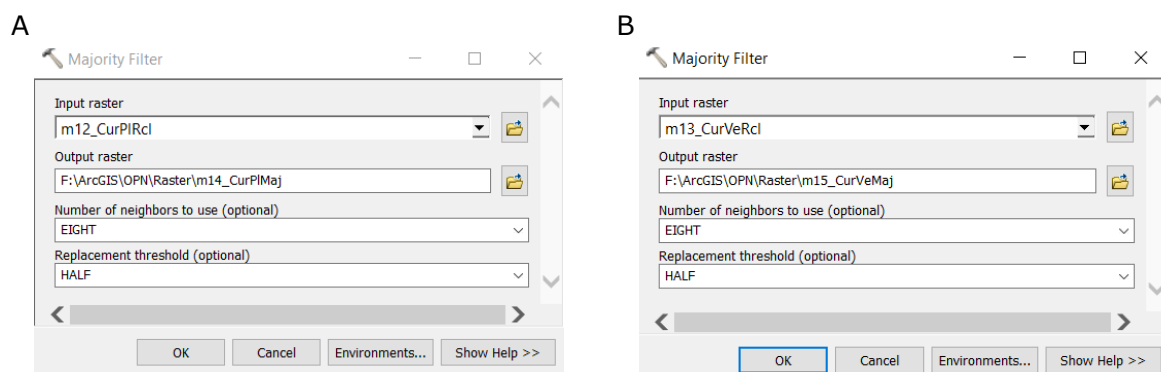
- 4.22. Reklasyfikację rastra krzywizny profilu przeprowadź wykorzystując dane z tabeli **Tab. 5**.
- 4.23. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź m13_CurVeRcl a następnie wciśnij przycisk OK.



Ryc. 24. Okna dialogowe reklasyfikacji rastrów krzywizny planarnej (A) i wertykalnej (B) do trzech kategorii „0”, „1” i „2”

Przed konwersją danych do postaci wektorowej, aby pozbyć się artefaktów, dokonamy jeszcze generalizacji obu utworzonych obrazów.

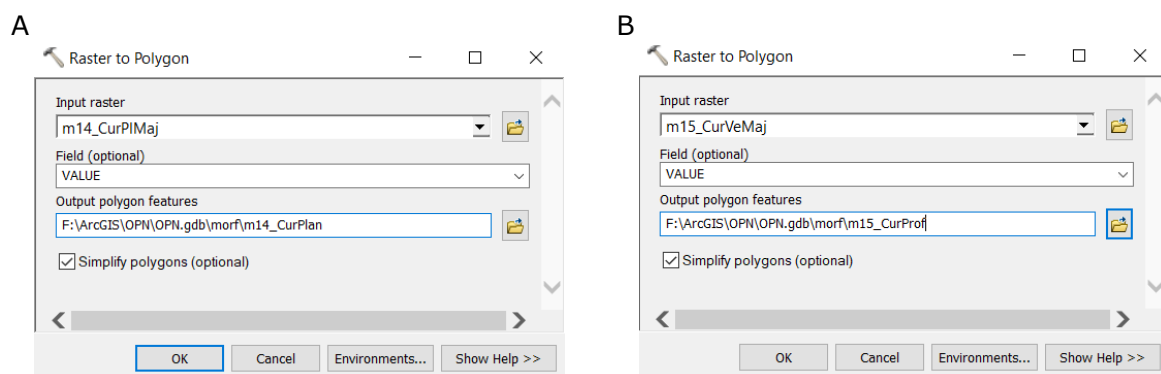
- 4.24. Otwórz narzędzie *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Generalization > Majority Filter*.
- 4.25. Najpierw jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź m12_CurPlRcl (**Ryc. 25A**).
- 4.26. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź zbiór m14_CurPlMaj.
- 4.27. Opcje generalizacji *Number of neighbors to use* (*Liczba użytych sąsiadów*) zmień na EIGHT, a *Replacement threshold* (*Próg zastępowania*) na HALF (zob. **Bartuś 2014b**).
- 4.28. Teraz jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór m13CurVeRcl (**Ryc. 25B**).
- 4.29. Jako raster wynikowy (*Output raster*) wprowadź zbiór m15CurVeMaj.
- 4.30. Opcje generalizacji *Number of neighbors to use* (*Liczba użytych sąsiadów*) zmieniamy na EIGHT, a *Replacement threshold* (*Próg zastępowania*) na HALF.



Ryc. 25. Okna dialogowe generalizacji rastrów krzywizny planarnej (A) i wertykalnej (B) za pomocą narzędzia *Majority Filter*

Ostatnim krokiem tej części analizy będzie wektoryzacja rastrów.

- 4.31. Uruchom narzędzie *ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*.
- 4.32. Najpierw jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór m14_CurPlMaj (Ryc. 26A).
- 4.33. Jako wyjściową klasę poligonową (*Output Polygon Features*) wprowadź nazwę m14_CurPlan, a następnie naciśnij przycisk OK.
- 4.34. Teraz jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź zbiór m15_CurVeMaj (Ryc. 26B).
- 4.35. Jako wyjściową klasę poligonową (*Output Polygon Features*) wprowadź nazwę m15_CurProf, a następnie naciśnij przycisk OK.

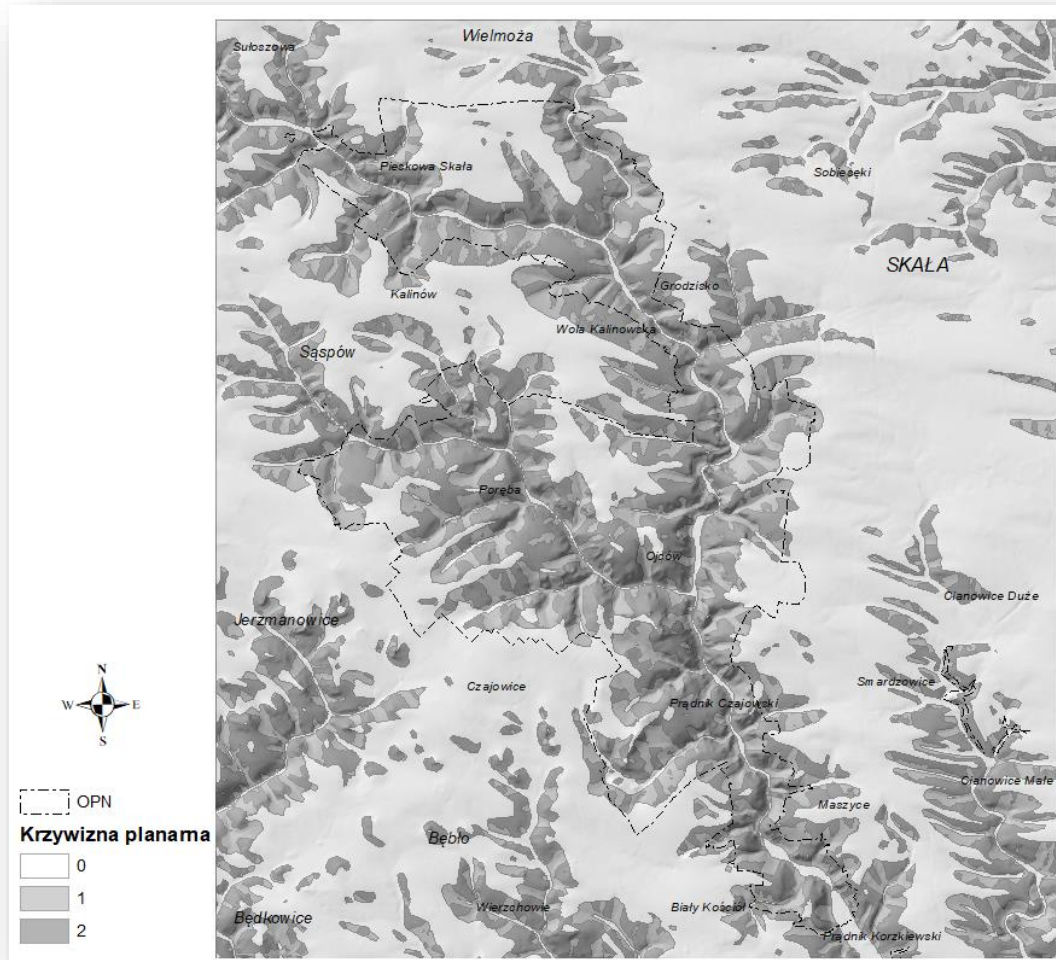


Ryc. 26. Okna dialogowe *Raster to Polygon* wektoryzujące klasy krzywizny planarnej (A) oraz wertykalnej (B)

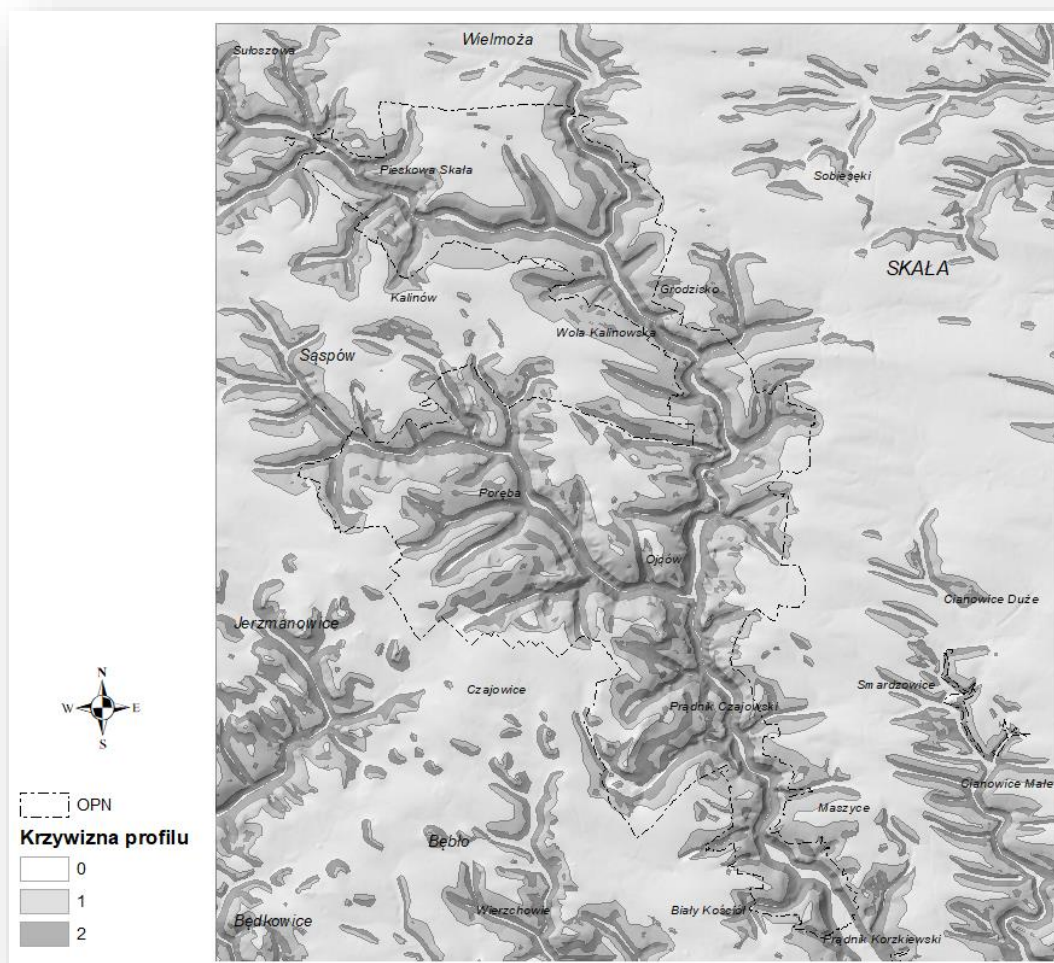
W wyniku działania narzędzia zostają utworzone poligonowe klasy krzywizny planarnej (m14_CurPlan) oraz wertykalnej (m15_CurProf).

Utworzone mapy, pomimo nazywania ich dalej klasami krzywizn, nie są nimi *sensu stricto*, lecz są hybrydą tych klas i klasy obszarów płaskich i o niewielkim nachyleniu zboczy. Utworzone klasy składają się z dyskretnych kategorii stoków o tendencji do konwergencji i dywergencji spływu powierzchniowego (dla krzywizny planarnej – Ryc. 27)

oraz stoków wklęsłych bądź wypukłych (dla krzywizny wertykalnej – Ryc. 28) i obszarów płaskich i o niewielkim nachyleniu zboczy. W trakcie modelowania zróżnicowania topoklimatycznego będzie wykorzystywana klasa krzywizny całkowitej.



Ryc. 27. Krzywizna planarna stoków w OPN i jego okolicach; 0 – obszar płaski lub o niewielkim nachyleniu zboczy; 1 – obszar z tendencją do konwergencji spływu powierzchniowego; 2 – obszar z tendencją do dywergencji spływu powierzchniowego; w tle cieniowany relief terenu



Ryc. 28. Krzywizna wertykalna stoków w OPN i jego okolicach; 0 – obszar płaski lub o niewielkim nachyleniu zboczy; 1 – stok wypukły w profilu; 2 – stok wklęsły w profilu; w tle cieniowany relief terenu

5. Mapa wybranych form rzeźby terenu

Klasyfikacja form geomorfologicznych jest jednym z typowych zadań realizowanych z zastosowaniem GIS. Zaawansowane aplikacje, wykorzystując wybrane atrybuty topograficzne (Schmidt & Dikau 1999), metody klasyfikacji oraz algebrę map, generują mniej lub bardziej złożone modele form morfologicznych (Hengl & Reuter 2009). Wśród najczęściej wykorzystywanych narzędzi pozwalających na ich tworzenie należy wymienić: skrypt *Generic landforms* dla aplikacji Ilwis (Hengl i in. 2003; Kasprzak & Traczyk 2010), rozszerzenie *Landform* dla pakietu GeoMedia Professional (Klingseisen i in. 2008) oraz zastosowany tutaj – *Topographic Position Index* (TPI) dla pakietu ArcGIS (Jenness 2006).

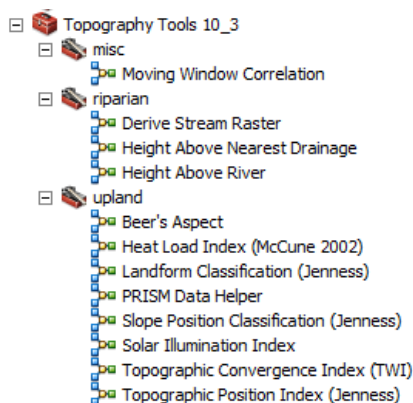
Instalacja Topography Toolbox

Uwaga:

Będziemy potrzebowali licencji na *Spatial Analyst*. Jeśli to konieczne moduł *Spatial Analyst* należy aktywować w ArcMap: *Customize > Extensions > Spatial Analyst*.

- 5.1. Pobierz narzędzie [Topography Tools](#).
- 5.2. Skopiuj narzędzie do folderu, w którym będziesz je przechowywał (np. ...\\OPN\\ArcToolbox\\).
- 5.3. W ArcToolbox kliknij ppm *ArcToolbox* i wybierz *Add Toolbox...* (*Dodaj zestaw narzędzi...*), a następnie dodaj narzędzie.

W wyniku instalacji, w oknie *ArcToolbox* pojawi się nowa skrzynka narzędziowa **Topography Tools 10_3** z zawartością jak na [Ryc. 29](#).



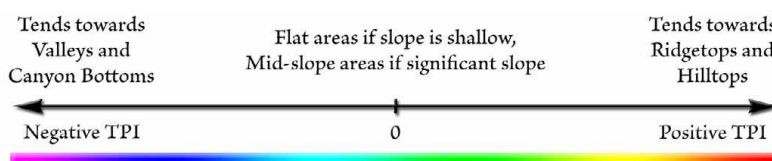
Ryc. 29. Zestaw narzędzi z pakietu *Topography Tools*

Topograficzny indeks pozycji (TPI)

Topograficzny indeks pozycji (TPI) jest geomorfometrycznym algorytmem obliczeniowym wykorzystywanym do klasyfikacji najważniejszych form morfologicznych. Został opracowany w 2001 roku przez [Andrew Weiss](#) (2001). Charakteryzuje się on pomysłowym i prostym algorytmem obliczeniowym. W największym zarysie polega on na określeniu różnic pomiędzy oryginalną powierzchnią NMT, a wyliczoną powierzchnią uśrednionych wysokości. Do analizy wykorzystywane są obrazy rastrowe. Generowanie powierzchni uśrednionej przebiega półautomatycznie. Dla każdej komórki podstawowej (piksela) tej powierzchni, obliczana jest wartość przeciętna z komórek znajdujących się w pewnym jej otoczeniu, które dalej nazywane będzie sąsiedztwem lub skalą obserwacji. Wykorzystuje się tutaj technikę ruchomego okna. Na wstępie określa się kształt i wielkość wspomnianego sąsiedztwa. Może mieć ono formę kwadratu, koła, pierścienia, wycinka koła lub być nieregularne – zdefiniowane przez badacza. Następnie na pierwszą komórkę analizowanej powierzchni, nakładana jest maska zdefiniowanego sąsiedztwa i w oparciu o dane znajdujące się w jej wnętrzu dokonywane są niezbędne obliczenia. Po ich wykonaniu maska zostaje przesunięta na kolejną komórkę i algorytm ulega powtórzeniu. Obliczenia dokonywane są w kolejnych obszarach analizowanego rastra, aż do wyczerpania całej jego powierzchni.

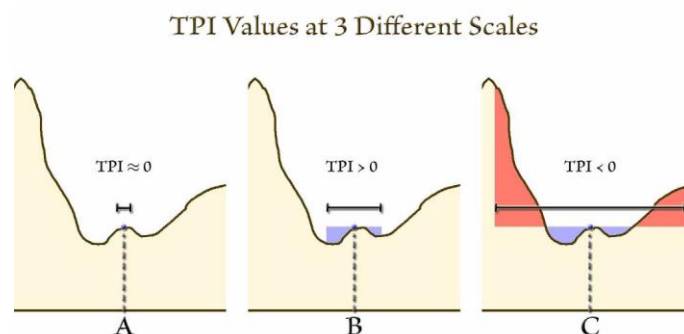
Atrybuty TPI komórek mają wartości ujemne wtedy gdy analizowana komórka leży niżej od średniej wysokości komórek swojego sąsiedztwa (obszary o reliefie wklęsłym:

doliny, kaniony, zagłębienia terenu, Ryc. 30). Dodatkowo wartości atrybutu TPI wskazują na wyższe położenie komórki względem swego sąsiedztwa (obszary o reliefie wypukłym: wzgórza, grzbiety). Wartości TPI zbliżone do zera informują nas, że analizowany wycinek powierzchni NMT jest podobny do powierzchni uśrednionej. Z sytuacją taką możemy mieć do czynienia w obszarach płaskich albo na stokach, na których średnia wysokość komórek analizowanego sąsiedztwa jest równa wysokości komórki obliczanej. W wyniku przeprowadzonych obliczeń, powstaje nowa, rastrowa warstwa informująca nas jak bardzo wysokość w danym miejscu odbiega od lokalnej średniej.



Ryc. 30. Zmienność indeksu TPI

Indeks TPI jest bardzo czuły na wielkość sąsiedztwa analizowanej komórki. Ten sam punkt, w zależności od przyjętej skali obserwacji może zostać różnie zinterpretowany, np., lokalne niewielkie wzniesienie znajdujące się wewnątrz doliny (Ryc. 31), jeżeli zastosujemy bardzo wąski promień sąsiedztwa, może zostać zinterpretowane jako obszar płaski. Jeżeli jednak przyjmimy większą, ale niewykraczającą poza szerokość doliny skalę obserwacji, analizowany obszar zostanie zinterpretowany jako obszar wyniesiony. Jeżeli jednak zwiększymy skalę obserwacji na tyle aby objęła swym zasięgiem przeciwległe stoki doliny, obszar zostanie sklasyfikowany jako wklęsły.

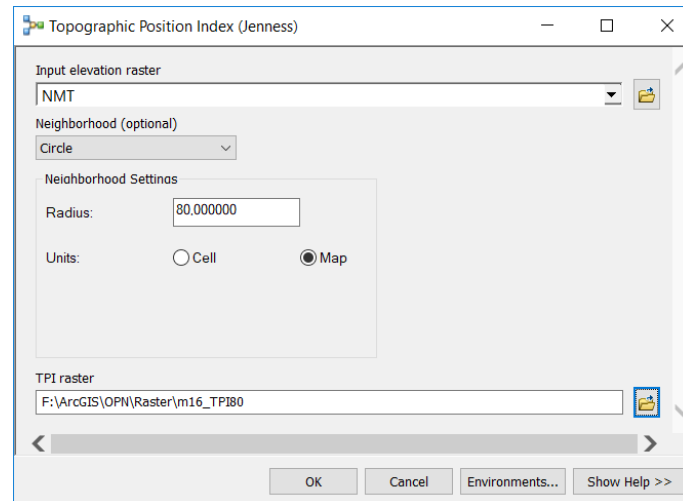


Ryc. 31. Zależność wyników interpretacji morfologicznej od skali obserwacji

Duże znaczenie w analizach ma także kształt obszaru zliczania. Niezależnie od problemów interpretacyjnych, zróżnicowanie skali obserwacji wpływa na możliwość rejestracji mniejszych bądź większych struktur morfologicznych (Jenness 2006). Im zastosujemy mniejszą skalę obserwacji, tym mniejsze struktury powierzchni terenu będziemy w stanie rozpoznać, a później je sklasyfikować.

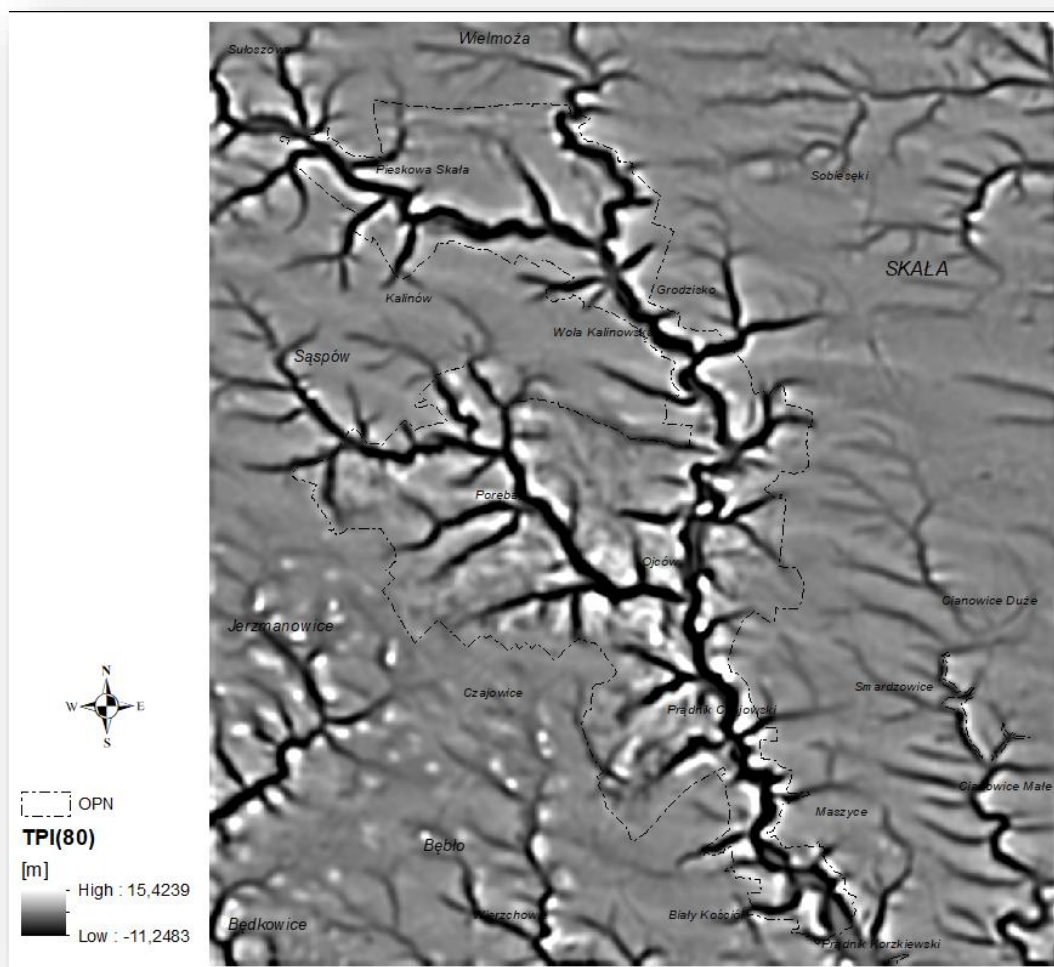
- 5.4. W *ArcToolbox* odszukajmy zainstalowany zestaw narzędzi *Topography Tools 10_3* i z zestawu *upland* wybierzmy narzędzie *Topographic Position Index* (Jenness).

- 5.5. W oknie dialogowym *Topographic Position Index (Jenness)*, jako zbiór danych wejściowych (*Input elevation raster*) wprowadźmy posiadany NMT (Ryc. 32).
- 5.6. Jako obszar zliczania wybierzmy koło o promieniu 80 m w jednostkach mapy czyli w metrach.
- 5.7. Jako raster wyjściowy (*TPI raster*) wprowadź m16_TPI80, po czym naciśnij przycisk OK.



Ryc. 32. Okno dialogowe *Topographic Position Index (Jenness)*

W wyniku działania narzędzia uzyskujemy obraz zmienności indeksu $TPI_{(80)}$ (Ryc. 33).



Ryc. 33. Mapa zmienności indeksu TPI dla promienia sąsiedztwa równego 80 m



Wartości indeksu na mapie zmieniają się w granicach od -11,24 do 15,42. Wartości indeksu obliczone dla każdego piksela obrazu informują jak bardzo wysokość danego piksela odbiega od lokalnej średniej i w którym kierunku (w górę czy w dół) (zob. wyżej). Teraz musimy zająć się klasyfikacją wartości indeksu TPI.

Klasyfikacja wartości indeksu TPI

W literaturze znanych jest wiele podziałów elementów rzeźby, które pod względem morfometrycznym mogą być przydatne do klasyfikacji indeksu TPI. Dla analiz wykorzystujących systemy GIS i bazujących na NMT szczególnie użyteczne są te, które klasyfikują elementy morfologiczne według ich względnego położenia (doliny, stoki, wzgórza itp.) (Wood 1942; Dalrymple *i in.* 1968; Ruhe & Walker 1968; Hugget 1975; Pennock *i in.* 1987; Speight 1990; MacMillan & Pettapiece 2000). Większość z takich klasyfikacji powstało w wyniku badań empirycznych, modelowań lub studiów krajobrazowych. Aplikacja *Topography Tools* klasyfikuje formy terenu według podziału Speighta (1990) (Tab. 6).

Tab. 6. Klasyfikacja form morfologicznych uwzględniająca pozycję topograficzną (Speight 1990)

Nazwa klasy	Klasy pozycji topograficznej	Przykładowe profile terenowe
Wierzchołek (crest)	Obszar wyniesiony, cechujący się pozytywną krzywizną planarną i / lub wertykalną	wierzchołek
Depresja: otwarta, zamknięta (depression: open, closed)	Obszar obniżony, cechujący się negatywną krzywizną planarną i / lub wertykalną; zamknięte – zawierające lokalne minimum wysokości; otwarte – rozciągające się na jednej i tej samej wysokości lub obniżające się	depresja
Spłaszczenie (flat)	Obszary o nachyleniu <3%	grzbiet spłaszczenie
Stok (slope)	Element powierzchniowy o średnim nachyleniu >1%; dzielony na podstawie względnego położenia na podkategorie: stok prosty, stok górny, środkowy, dolny	wzniesienie stok prosty spłaszczenie depresja
Stok prosty (simple slope)	Obszar występujący poniżej wierzchołka lub spłaszczenia oraz powyżej spłaszczenia lub depresji	wzniesienie stok prosty depresja
Górny stok (upper slope)	Obszar występujący poniżej wierzchołka lub spłaszczenia ale nie występujący nad spłaszczeniem lub depresją	wzniesienie górny stok środkowy stok dolny stok depresja
Środkowy stok (mid slope)	Obszar nie sąsiadujący od góry z wierzchołkiem lub spłaszczeniem oraz nie sąsiadujący od dołu ze spłaszczeniem bądź depresją	wzniesienie górny stok środkowy stok dolny stok spłaszczenie depresja
Dolny stok (lower slope)	Obszar nie sąsiadujący od góry z wierzchołkiem lub spłaszczeniem ale sąsiadujący od dołu ze spłaszczeniem lub depresją	wzniesienie górny stok dolny stok depresja

Wzgórek (<i>hillock</i>)	Złożony element, w który krótkie elementy stokowe sąsiadują z wąskimi wzniesieniami (<40 m)	
Grzbiet (<i>ridge</i>)	Złożony element, w który krótkie elementy stokowe sąsiadują z wąskimi wzniesieniami (>40 m)	

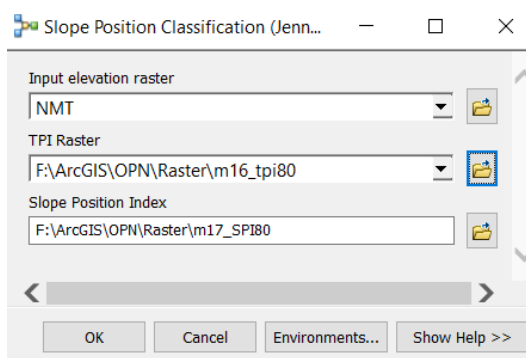
W celu wyodrębnienia form rzeźby terenu dokonuje się klasyfikacji całego zakresu zmienności indeksu TPI. Wskazuje się wartości progowe, które utworzą granice przedziałów, charakterystyczne dla odpowiednich form morfologicznych. Wartości TPI powyżej wyznaczonego progu wyznaczają wierzchołki wzgórz lub górskie szczyty, natomiast wartości TPI poniżej innego progu mogą być klasyfikowane jako doliny lub inne zagłębienia terenu. Wartości TPI zbliżone do 0 mogą być zaklasyfikowane jako płaskie równiny (jeśli nachylenie jest zbliżone do 0°) lub jako obszary o pewnym nachyleniu (jeśli nachylenie jest powyżej pewnego kąta granicznego). W praktyce najbardziej rozpowszechnionym sposobem wyznaczania wartości progowych stała się metoda zaproponowana przez [Weissa \(2001\)](#), która wykorzystuje wartości odchylenia standardowego wysokości punktów znajdujących się w sąsiedztwie obliczanej komórki ([Tagil & Jenness 2008](#)). W przedstawianym sposobie wartości progowe wyznaczone są więc na podstawie zróżnicowania komórek znajdujących się w sąsiedztwie, a nie na podstawie samych wartości indeksu TPI. Zastosowanie przedstawionej metody powoduje, że komórki rastra mające taką samą wartość wskaźnika TPI mogą zostać sklasyfikowane jako różne formy morfologiczne ([Jenness 2006](#)). Podstawowa klasyfikacja [Weissa \(2001\)](#) dokonuje podziału wskaźnika TPI na sześć kategorii, automatycznie wyznaczając takie podstawowe formy morfologiczne jak: doliny, dolne części stoków, spłaszczenia, środkowe i górne części stoków oraz grzbiety. Jak wynika z [Tab. 7](#), dla dwóch kategorii (spłaszczenia i środkowe części stoków) przyjęto identyczne warunki klasyfikacyjne. Wartości TPI bliskie 0 oznaczają, że wysokość analizowanej komórki jest zbliżona do średniej wysokości komórek sąsiednich. Z taką sytuacją najczęściej możemy się spotkać, gdy komórka położona jest na części płaskiej analizowanej powierzchni lub gdy jest położona w środkowej części stoku. Łatwym sposobem na odróżnienie tych dwóch sytuacji jest sprawdzenie nachylenia w tym punkcie. Jeśli jest ono bliskie mniejsze bądź równe 5° , to komórka jest prawdopodobnie położona na płaskiej powierzchni. Wartość nachylenia większa od 5° oznacza, że analizowany piksel jest położony na stoku.

Tab. 7. Klasyfikacja zmienności wskaźnika TPI według Weiss'a (2001)

Nazwa kategorii	Wartości graniczne TPI	Warunki dodatkowe
Dolina	$TPI < -1 SD$	–
Dolna, wklęsła część stoku	$-1 SD \leq TPI < -0,5 SD$	–
Splaszczanie	$-0,5 SD \leq TPI \leq 0,5 SD$	nachylenie $\leq 5^\circ$
Środkowa część stoku	$-0,5 SD < TPI < 0,5 SD$	nachylenie $> 5^\circ$
Górna, wypukła część stoku	$0,5 SD < TPI \leq 1 SD$	–
Grzbiet, wierzchołek	$TPI > 1 SD$	–

gdzie SD – lokalne odchylenie standardowe wysokości

- 5.8. Z *Toolbox* wybierz narzędzie klasyfikacji wg. Weiss'a (2001) – *Slope Position Classification* (Jenness).
- 5.9. Uzupełnij dane wejściowe geoprzetwarzania. Jako raster danych wejściowych wysokości (*Input elevation raster*) wprowadź NMT, a jako *TPI Raster* – raster indeksu TPI wygenerowaną z zastosowaniem promienia sąsiedztwa 80 m – m16_TPI80 (Ryc. 34).



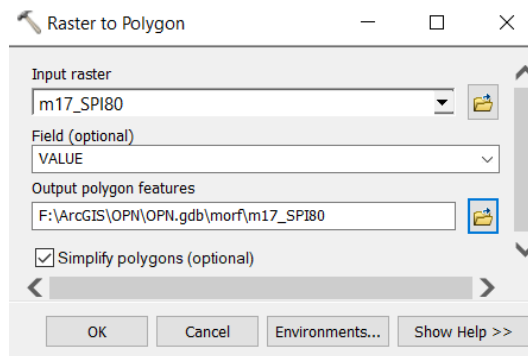
Ryc. 34. Okno dialogowe narzędzia klasyfikacji indeksu TPI wg podziału Weiss'a (2001)

- 5.10. Klasę wynikową klasyfikacji zapiszmy w folderze z naszymi rastrowymi, pod nazwą m17_SPI80.

W wyniku klasyfikacji na ekranie pojawia się rastrowa klasa form morfologicznych. Zmieńmy jej styl na standardowy dostarczony przez producentów oprogramowania.

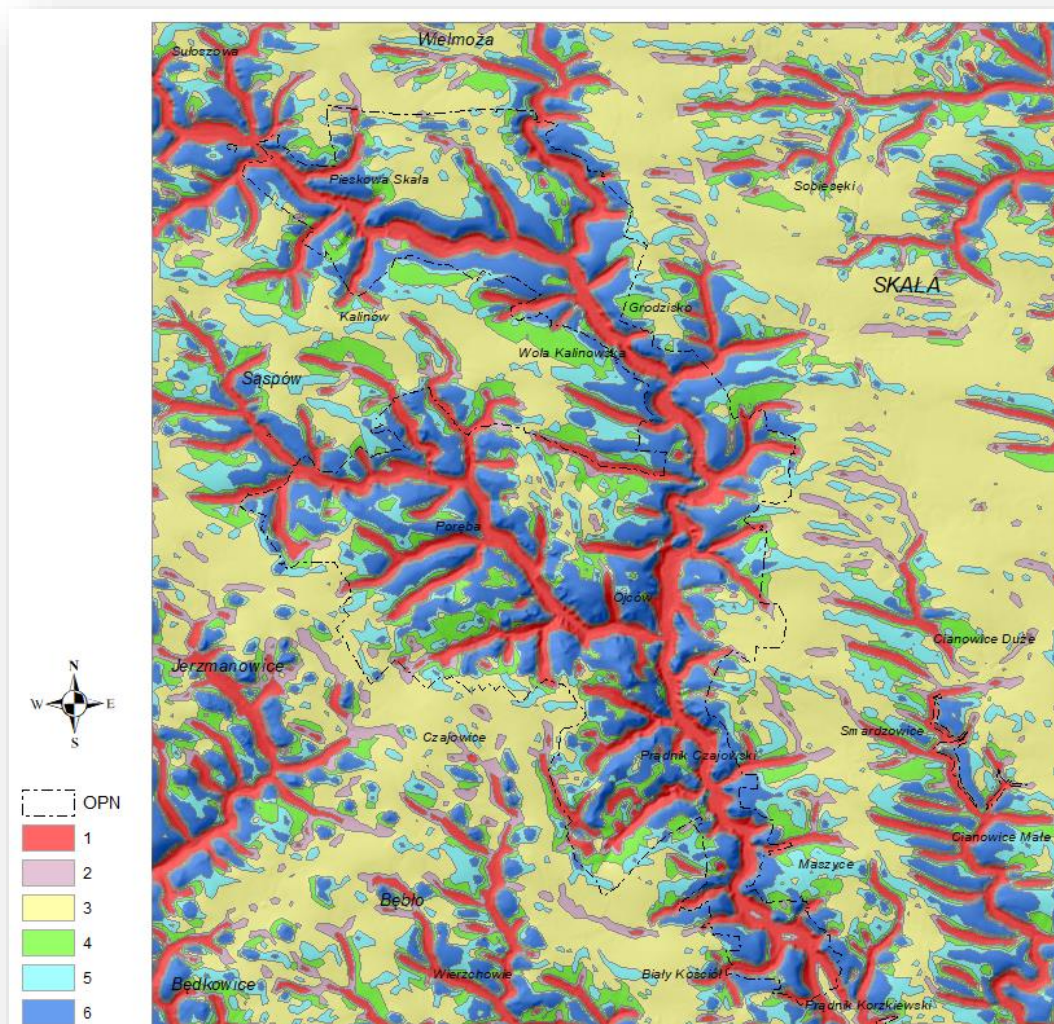
- 5.11. Wejdźmy do właściwości warstwy m17_SPI80 i z menu *Symbology* wybierzmy ikonkę z folderem (*Import...*). Jeszcze raz kliknijmy na podobną ikonkę i z lokalizacji instalacji narzędzi TPI wybierzmy plik stylu *Slope Position Classification.lyr*.

W wyniku przeprowadzonej symbolizacji otrzymujemy rastrowy model podstawowych form rzeźby terenu (Ryc. 35).



Ryc. 36. Okno dialogowe *Raster to Polygon* wektoryzujące klasę modelu podstawowych form rzeźby terenu

W wyniku wektoryzacji utworzona została poligonowa klasa zmienności podstawowych form rzeźby terenu (Ryc. 37).



Ryc. 37. Model zmienności podstawowych form rzeźby terenu rejonu OPN. 1 – doliny, 2 – dolne części stoków, 3 – wypłaszczenia wierzchwinowe, 4 – środkowe części stoków, 5 – górne części stoków, 6 – grzbiety

Opracowany model geomorfologiczny będzie wykorzystywany w analizie struktury krajobrazu, analizie różnorodności rzeźby terenu oraz w modelowaniu topoklimatycznym.

Analizy georóżnorodności

W ramach analiz należy wyznaczyć wskaźniki georóżnorodności z Tab. 8. Wyniki należy zamieścić w klasie wybranej siatki analitycznej. Należy dokonać bonitacji punktowej. Podczas klasyfikacji bonitacyjnej należy konsekwentnie używać jednej metody np. równych przedziałów. Ocenę różnorodności cząstkowych sprowadzamy do pięciu stopni: 1 – różnorodności brak; 2 – różnorodność mała; 3 – różnorodność średnia; 4 – różnorodność duża; 5 – różnorodność bardzo duża. Różnorodności cząstkowe poszczególnych elementów krajobrazu w kolejnym etapie analizy będą podlegały sumowaniu. W końcowym etapie badań posłużą do oceny georóżnorodności całkowitej.

Tab. 8. Kryteria geologiczne analizy georóżnorodności

Cel oceny	Element krajobrazu	Cecha krajobrazu	Kryterium oceny	Symbol
morforóżnorodność	rzeźba terenu	hipsometria	deniwelacja ($Z_{max}-Z_{min}$)	ΔZ
		ekspozycja stoków	liczba jednostek kierunków ekspozycji stoków	Lj_{ekspoz}
			liczba kategorii kierunków ekspozycji stoków	Lt_{ekspoz}
			entropia zróżnicowania ekspozycji stoków	$SHDI_{ekspoz}$
		nachylenia stoków	zróżnicowanie nachyleń stoków ($N_{max}-N_{min}$)	ΔN
			liczba jednostek nachyleń stoków	Lj_{nachyl}
			liczba kategorii nachyleń stoków	Lt_{nachyl}
			entropia zróżnicowania nachyleń stoków	$SHDI_{nachyl}$
		krzywizna stoków	liczba jednostek krzywizny planarnej	Lj_{plan}
			liczba kategorii krzywizny planarnej	Lt_{plan}
			entropia zróżnicowania krzywizny planarnej	$SHDI_{plan}$
			liczba jednostek krzywizny profilu	Lj_{profil}
			liczba kategorii krzywizny profilu	Lt_{profil}
			entropia zróżnicowania krzywizny profilu	$SHDI_{profil}$
		podstawowe formy morfologiczne	liczba jednostek form rzeźby terenu	Lj_{SPI}
			liczba kategorii form rzeźby terenu	Lt_{SPI}
			entropia zróżnicowania form rzeźby terenu	$SHDI_{SPI}$

Bibliografia

- Adams J.D., Visser R.J.M., Prisley S.P., 2003. Modeling Steep Terrain Harvesting Risks Using GIS. *Austro2003: High Tech Forest Operations for Mountainous Terrain, October 5–9, 2003, Schladeggl – Austria*, 1–13.
- Bartuś T., 2014a. Model zmienności topoklimatycznej rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego. *Prądnik. Prace i Materiały Muzeum W. Szafera*, 24, 25–46.
- Bartuś T., 2014b. Raster images generalization in the context of research on the structure of landscape and geodiversity. *Geology, Geophysics and Environment*, 40(3), 271–284.
- Bennie J., Hill M.O., Baxter R., Huntley B., 2006. Influence of slope and aspect on long-term vegetation change in British chalk grasslands. *Journal of Ecology*, 94, 355–368. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2006.01104.x 94.
- Błaszczyszynski J.S., 1997. Landform characterization with geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(2), 183–191.
- Blyth E.M., Finch J., Robinson M., Rosier P., 2004. Can soil moisture be mapped onto the terrain. *Hydrology & Earth System Sciences*, 8(5), 923–930.
- Boligłowa E., Znój K., 2003. Wpływ nachylenia stoku na zdrowotność i plonowanie owsa w siewie czystym i w mieszanym. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 229, 221–227.
- Burnett B.N., Meyer G.A., McFadden L.D., 2008. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 113, F03002. DOI:10.1029/2007JF000789.
- Burnett M.R., August P.V., Brown J.H. jr., Killingbeck K.T., 1998. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity I. A patch-scale perspective. *Conservation Biology*, 12, 363–370. DOI: 10.1111/j.1523-1739.1998.96238.x
- Dalrymple J., Long R., Conacher A., 1968. A hypothetical nine-unit land- surface model. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 12, 60–76.
- Davis F.W., Goetz S., 1990. Modeling vegetation pattern using digital terrain data. *Landscape Ecology*, 4(1), 69–80.
- Franke R., 1982. Scattered data interpolation: tests of some methods: *Mathematics of Computation*, 38(157), 181–200.
- Grohmann C.H., Riccomini C., 2009. Comparison of roving-window and search-window techniques for characterising landscape morphometry. *Computers&Geosciences*, 35(10), 2164–2169.
- Hengl T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32, 1283–1298.
- Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P., 2003. *Digital terrain analysis in ILWIS*. Lecture notes and user guide. ITC, Enschede, Netherlands.
- Hengl T., Reuter H.I. (ed.), 2009. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 33, Elsevier.
- Horton R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275–370.
- Hugget R.J., 1975. Soil landscape systems: A model of soil Genesis. *Geoderma*, 13, 22.
- Jenness J., 2006. *Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. Jenness Enterprises. URL: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm> (11.12.2019).

- Kasprzak M., Traczyk A., 2010. Geomorfometria granitowej części Karkonoszy. Geomorphometry of granitic part of Karkonosze Mts. *Landform Analysis*, 13, 33–46.
- Kicińska B., Olszewski K., Żmudzka E., 2001. Uwagi o wykorzystaniu klasyfikacji J. Paszyńskiego do kartowania topoklimatycznego (z doświadczeń Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego). W: Kuchcik M. (red.), *Współczesne badania topoklimatyczne. Dokumentacja geograficzna*, 23, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Warszawa, 143–151.
- Klimaszewski M., 1963. *Geomorfologia ogólna*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Klingseisen B., Metternicht G., Paulus G., 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environmental Modelling and Software*, 23(1), 109–121.
- MacMillan R.A., Pettapiece W.W., 2000. *Alberta Landforms: Quantitative morphometric descriptions and classification of typical Alberta landforms*. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Semiarid Prairie Agricultural Research Centre, Swift Current, SK, Technical Bulletin No. 2000-2E.
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R., 1991. Digital terrain modeling – a review of hydrological, geomorphological and biological applications, Special Issue: Digital Terrain Modelling in Hydrology. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30.
- Paszyński J., 1980. Metody sporządzania map topoklimatycznych. W: Kluge M. (red.), *Metody opracowań topoklimatycznych*. Dokumentacja Geograficzna, 3, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa, 13–28.
- Paszyński J., 2004. Wymiana energii na powierzchni czynnej jako podstawa klasyfikacji topoklimatycznej. *Acta Agrophysica*, 3(2), 351–358.
- Paszyński J., Miara K., Skoczek J., 1999. Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego. Dokumentacja Geograficzna, 14, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.
- Pennock D.J., Zebarth B.J., De Jong E., 1987. Landform classification and soil distribution in Hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 40(3–4), 297–315.
- Recha J.A., Reeves R.W., Hendrick D.M., 2001. The influence of slope aspect on soil weathering processes in the Springerville volcanic field, Arizona. *CATENA*, 43(1), 49–62.
- Ruhe R.V., Walker P.H., 1968. Hillslope models and soil formation II: open systems. W: *Proceedings of 9th Congress of the International Soil Science Society*, vol. 4. International Soil Science Society, Adelaide, Australia, 551–560.
- Schmidt J., Dikau R., 1999. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – semantics, methods, future needs. W: Dikau R., Saurer H. (ed.), *GIS for Earth Surface Systems*. Gebrueder Borntraeger, Berlin, 154–173.
- Speight J.G., 1990. Landforms. W: McDonald R.C. (ed.), *Australian Soil and Land Survey Field Handbook*. Second Edition. Inkata Press, Melbourne, 9–57.
- Stage A.R. 1976. Notes: An Expression for the Effect of Aspect, Slope, and Habitat Type on Tree Growth *Forest Science*, 22(4), 457–460.
- Strahler A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.

- Tagil S., Jenness J., 2008. GIS-based automatic landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 12, 910-921.
- Traczyk A., 2000. Modelowanie procesów spełzywania gruntu w Karkonoszach. *Opera Corcontica*, 37, 143-149.
- Urbański J., 2011. *GIS w badaniach przyrodniczych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Weiss A., 2001. *Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation*. ESRI User Conference, San Diego, CA (URL: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf (11.12.2019)).
- Wężyk P., Drzewiecki W., Wójtowicz-Nowakowska A., Pierzchalski M., Mlost J., Szafrńska B., 2012. Mapa zagrożenia erozyjnego gruntów rolnych w Małopolsce na podstawie klasyfikacji OBIA obrazów teledetekcyjnych oraz analiz przestrzennych GIS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, 403-420.
- Wieczorek M., Żyszkowska W., 2011. Geomorfometria – parametry morfometryczne w charakterystyce rzeźby terenu. *Polski Przegląd Kartograficzny*, 43(2), 130-144.
- Wilson J.P., Gallant J.C., 2000. Digital terrain analysis. W: Wilson J.P., Gallant J.C. (ed.), *Terrain analysis*. New York, Wiley, 1-27.
- Witek T., 1973. *Mapy glebowo-rolnicze oraz kierunki ich wykorzystania*. Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, seria P(18), Puławy.
- Wood A., 1942. The development of hillside slopes. *Proceedings of the Geological Association*, 53, 128-140.