

mgr Sylwester Kamieniarz

PREDYKCJA ZAGROŻENIA OSUWISKOWEGO MIASTA KRAKOWA Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH I METOD GEOSTATYSTYCZNYCH

STRESZCZENIE ROZPRAWY

Głównym celem pracy było ilościowe oszacowanie zagrożenia osuwiskowego (H ; rozumianego jako prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska w określonym przedziale czasu i miejscu) na terenie miasta Krakowa z wykorzystaniem metod statystycznych w oparciu o narzędzia systemów informacji geograficznej i przedstawienie go w formie mapy. Na potrzeby realizacji tego zadania w pierwszej kolejności podjęto próbę identyfikacji osuwisk, które wykazywały aktywność w latach 1969 – 2019. Uzyskane wyniki posłużyły jako dane wejściowe do utworzenia modelu predykcyjnego prawdopodobieństwa czasowego wystąpienia osuwisk w przyszłości (TP). Model ten, będący składową czasową równania zagrożenia osuwiskowego, przygotowano z wykorzystaniem metod geostatystycznych. Podatność osuwiskową (LS), będącą składową przestrzenną równania, opracowano za pomocą sztucznych sieci neuronowych. Finalnie obydwie składowe przemnożono ze sobą uzyskując powierzchnię reprezentującą zagrożenie osuwiskowe, którą naniesiono na specjalnie przygotowany podkład topograficzny w skali 1:25 000.

Kraków znajduje się na obszarze 4 głównych jednostek tektonicznych: Karpat zewnętrznych na południu (jednostki podśląskiej), zapadliska przedkarpackiego obejmującego przeważającą część obszaru miasta oraz jego mezozoicznego podłoża reprezentowanego przez monoklinę śląsko-krakowską w części zachodniej, północno-zachodniej i fragment niecki miechowskiej w części północnej. Powoduje to zróżnicowanie rzeźby terenu oraz bezpośrednio warunkuje występowanie i typy osuwisk. Na terenie Krakowa udokumentowano dotychczas 369 osuwisk. Najwięcej z nich (168) występuje w południowej części miasta w rejonach Swoszowic, Zbydniowic, Wróblowic, Rajska, Kosocic i Soboniowic (dzielnica X). Są one bezpośrednio związane ze strefą nasunięcia karpackiego. Przewaga facji łupkowo-marglistych w obrębie jednostki podśląskiej oraz zaburzenia tektoniczne iłów miocenu allochtonicznego (jednostki zgłobickiej), w połączeniu z uwarunkowaniami morfologicznymi obszaru sprzyjają tworzeniu się powierzchniowych ruchów masowych. Duże nagromadzenie osuwisk (67) znajduje się

również w rejonie zrębu Lasu Wolskiego (dzielnica VII). Jest to między innymi związane z występowaniem zatok wypełnionych utworami ilastymi miocenu, które sięgają wyższych partii zrębu.

Powierzchniowe ruchy masowe na terenie Krakowa są przedmiotem badań od przeszło 60 lat. Pierwszą usystematyzowaną rejestrację przeprowadzono w latach 1969 – 1970, drugą w latach 2005 – 2007. Intensywne opady deszczu trwające od maja do sierpnia 2010 r. doprowadziły do uaktywnienia się wielu osuwisk, co skutkowało wystąpieniem licznych uszkodzeń lub zniszczeń zabudowy i infrastruktury. W wyniku tych zdarzeń, w latach 2011 – 2012 przeprowadzono trzecią rejestrację osuwisk. Ostatnią aktualizację wykonano w 2018 r.

Do identyfikacji osuwisk wykazujących aktywność w latach 1969 – 2019 wykorzystano dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego z listopada 2006 r. i lipca 2012 r. Te pierwsze wymagały uprzedniego odfiltrowania i klasyfikacji. Na podstawie tych danych wygenerowano numeryczne modele terenu oraz modele różnicowe. W wyniku przeprowadzonych analiz rozpoznano 65 dodatkowych osuwisk, które nie były zaznaczone w dotychczasowych rejestrach. Modele różnicowe pozwoliły na zidentyfikowanie 111 osuwisk, które wykazywały aktywność w latach 2006 – 2012. W 53 przypadkach stwierdzono związek aktywności z występowaniem nasypów niekontrolowanych w obrębie koluwiów lub bezpośredni sąsiedztwie skarpy głównej. Przeprowadzone badania uzupełniono o analizy materiałów archiwalnych (ortofotomap z lat 1970 – 2019, rejestrów, kart dokumentacyjnych osuwisk, publikacji). Ostatecznie ustalono, że spośród 434 osuwisk, 234 wykazywało aktywność w latach 1969 – 2019, z czego 89 miało związek z występowaniem nasypów niekontrolowanych. Najwięcej uaktywnionych osuwisk stwierdzono w południowej części miasta w rejonach Swoszowic, Zbydniowic, Wróblowic, Rajska, Kosocic i Soboniowic (dzielnica X).

Zestawiając przestrzennie otrzymane wyniki zauważono występowanie zależności odległości pomiędzy osuwiskami i ich aktywności. Dało to podstawy do zastosowania metod geostatystycznych do określenia prawdopodobieństwa wystąpienia osuwisk w przyszłości. Zaimplementowano technikę kriginu obszarowego dwumianowego, która opiera się na kriginu prostym i wykorzystuje do obliczeń dyskretne dane zliczeniowe. W obszarze badań utworzono siatkę poligonalną o wymiarach 500x500 m, którą następnie zredukowano do obszarów występowania osuwisk. Dla każdego poligonu określono ilość osuwisk oraz ilość

jednostek wykazujących aktywność w latach 1969 – 2019. Przygotowaną warstwę wykorzystano w module *Geostatistical Wizard* (ArcGIS) do konstrukcji modelu predykcyjnego. W rezultacie uzyskano powierzchnię reprezentującą prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska w ciągu kolejnych 50-ciu lat (*LS*). Uzyskano dobre dopasowanie do danych wejściowych niemniej w kilku rejonach (Podgórze, Bronowice Wielkie) otrzymane wartości prawdopodobieństwa wydają się nieco przeszacowane w kontekście regionalnym.

Z wagi na zróżnicowanie osuwisk na obszarze badań, do wyznaczenia podatności osuwiskowej zastosowano wielowarstwowy perceptron należący do klasy nieliniowych, jednokierunkowych i nadzorowanych sztucznych sieci neuronowych. Obliczenia wykonano w module *r. landslide*. Uczenie sieci przeprowadzono w oparciu o 8 warstw tematycznych (spadki terenu, ekspozycja zboczy, wysokość bezwzględna, wysokość względna, indeks zbieżności, utwory powierzchniowe, utwory podłoża podczwartorzędowego, odległość od nieciągłości tektonicznych. Do modelowania wykorzystano 434 punkty reprezentujące osuwiska oraz taką samą liczbę punktów z lokalizacjami bez osuwisk. Z utworzonego zbioru punktów 70% przeznaczono do fazy treningu, a po 15% do fazy walidacji i testu. W celu oceny wydajności sieci, na podstawie wyników fazy testu wykonano macierz błędu wraz z kalkulacją podstawowych miar statystycznych oraz przeprowadzono analizę ROC.

Około 22% powierzchni miasta stanowią tereny podatne na osuwanie ($LS > 0,05$). Pokrywają się z rejonami występowania osuwisk oraz obejmują obszary, w których one dotychczas nie wystąpiły. Najwięcej terenów podatnych na osuwanie znajduje się w dzielnicach X (54% powierzchni dzielnicy) i VII (47%). Tam też występują najczęściej obszarów o wysokiej podatności ($LS > 0,95$). Zaimplementowana do modułu analiza wrażliwości wskazała, że spośród warstw tematycznych wykorzystanych do modelowania największy wpływ na podatność osuwiskową mają spadki terenu, indeks zbieżności, odległość od nieciągłości tektonicznych oraz litologia podłoża podczwartorzędowego. W pierwszym przypadku zaobserwowano wyraźny wzrost podatności w przedziale nachyleń 3–13°. Najbardziej podatne są zbocza wklęsłe i proste. Wraz z oddalaniem się od uskoków i nasunięć podatność osuwiskowa maleje. Pod względem litologicznym najbardziej predysponowane do występowania ruchów masowych są zaburzone tektonicznie utwory ilasto-piaszczyste miocenu allochtonicznego, pstre margle węglowieckie i łupki pstre oraz warstwy gezwowe i łupki cieszyńskie górne.

Mnożąc obie składowe (*TP* i *LS*) zyskano powierzchnię reprezentującą zagrożenie osuwiskowe. Około 11% powierzchni Krakowa zajmują obszary, w których prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska w latach 2020 – 2070 przekracza wartość 0,2. Największe zagrożenie osuwiskowe występuje na południu miasta, we wschodniej części dzielnicy X, gdzie 11% jej powierzchni stanowią tereny o wartościach $H > 0,6$. Wysokie wartości zagrożenia wyznaczono również dla rejonu Lasu Libertowskiego oraz lokalnie w obrębie dzielnic IX, XI, XII i XIII. Duże prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska ($H = 0,4 - 0,6$) oszacowano dla okolic Zesławic.

Przeprowadzone badania wykazały, że numeryczne modele terenu oraz modele różnicowe są skutecznym narzędziem do identyfikacji osuwisk i obiektywnej oceny ich aktywności, jednak dopiero w połączeniu z badaniami terenowymi, innymi metodami zdalnymi oraz wnikliwą analizą materiałów archiwalnych dają najlepsze efekty. Nasypy niekontrolowane deponowane w obrębie koluwiów lub bezpośrednio przy granicach osuwisk (szczególnie w rejonach skarp głównych) są czynnikiem niekorzystnym i dodatkowo przyczyniają się do ich uaktywniania. Metody geostatystyczne mogą prowadzić do lokalnych przeszacowań wartości prawdopodobieństwa czasowego na obszarach występowania osuwisk rozproszonych, stanowiących pojedyncze wystąpienia niezwiązane z naturalnymi predyspozycjami danego obszaru do tworzenia się ruchów masowych. Z kolei sztuczne sieci neuronowe sprawdzają się przy wyznaczaniu podatności osuwiskowej na obszarach o skomplikowanych budowie geologicznej i rzeźbie terenu, gdzie występują zróżnicowane typy osuwisk.