

## **Cechy metryczne barchanów Sahary Zachodniej i obniżenia Khargi**

**Katarzyna Biejat\***

*Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa*

### **Wprowadzenie**

Cechy metryczne barchanów analizowane są już od ponad 50 lat (Finkel 1959). Ich kształt zależy od wielu czynników, m.in.: siły i kierunku wiatru, składu mineralogicznego materiału wydmowego, genezy oraz cech metrycznych podłoża, rodzaju i gęstości szaty roślinnej, a także stopnia wilgotności osadów wydmowych, osadów podłoża oraz powietrza.

Badania, których celem była analiza zmienności cech metrycznych barchanów, zostały przeprowadzone w grudniu 2007 r. na terenie Sahary Zachodniej oraz w kwietniu 2008 r. na terenie obniżenia Khargi w Egipcie. Obydwa obszary charakteryzują się występowaniem wiatru o bardzo małej zmienności kierunku w ciągu całego roku. Zmierzone 53 barchany, których wysokość wynosiła od 0,7 m do 19,27 m. Wszystkie zbadane wydmy należą do form swobodnych występujących w różnej fazie rozwoju, począwszy od fazy inicjalnej po zgrzybiałą. Pomiarów wykonano tachimetrem elektronicznym typu Total Station, dzięki czemu uzyskano bardzo dokładne wyniki. Umożliwiło to porównanie cech metrycznych badanych form z cechami barchanów na innych obszarach na świecie, których wyniki pomiarów dostępne są w literaturze (Finkel 1959, Hesp 1998, Sauer mann 2000, Andreotti i in. 2002, Lima i in. 2002, Hermann 2004, Hermann i in. 2005). Ze względu na kształt barchanów ich podstawowe cechy metryczne są ze sobą ściśle powiązane (Finkel 1959). Umożliwia to dość dokładne obliczenie wszystkich parametrów w przypadku, gdy pomiar któregoś z nich nie jest możliwy. Przedstawione w niniejszym artykule cechy metryczne form oraz wybrane zale-

żności pomiędzy nimi umożliwiają ocenę jednorodności kształtu form na różnych obszarach. Jest to niezmiernie istotne dla oceny zagrożenia, jakie stanowią przemieszczające się wydmy. Wiadomo bowiem, że najważniejszymi cechami wpływającymi na szybkość przemieszczania się barchanów są ich wielkość i kształt.

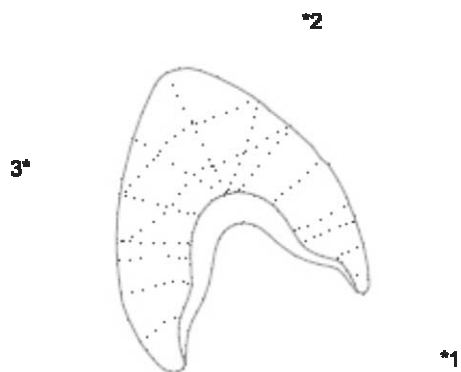
### **Metody**

Pomiary cech metrycznych barchanów wykonano za pomocą lustrowego tachimetru elektronicznego Total Station (Leica TCR407 Power), umożliwiającego pomiar z dokładnością do 7 sekund kątowych, co daje dokładność liniową pomiaru 2 mm + 2 ppm. Dla każdej wydmy zmierzono średnio około 250 punktów, wzdłuż charakterystycznych linii (obwód, krawędzie, grzbiety, oś symetrii wydmy) oraz w miejscach, w których dochodziło do widocznych w terenie zmian kształtu badanych form. W zależności od wielkości mierzonej wydmy, pomiarów dokonywano z dwóch lub trzech stanowisk, będących osnową dla tworzonego obrazu wydmy (ryc. 1).

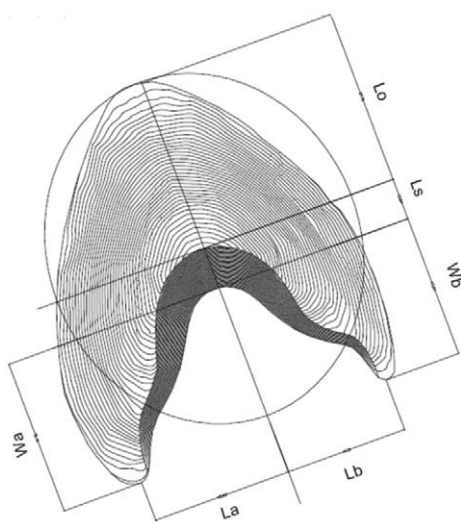
Wykonanie pomiaru jednego punktu polega na ustawieniu prostopadle do podłoża tyczki z lustrem odbijającym wiązkę lasera wysyłanego z tachimetru. Wiązka powraca do urządzenia zapisującego 3 rzędne: odległość od osnowy (stanowiska) do mierzonego punktu w układzie współrzędnym (x, y) oraz wysokość punktu (z). Każda z wydm zapisana jest w oddzielnym układzie współrzędnych, z wyznaczoną północą geograficzną. Zmierzone punkty wykorzy-

\* e-mail: kbiejat@gmail.com

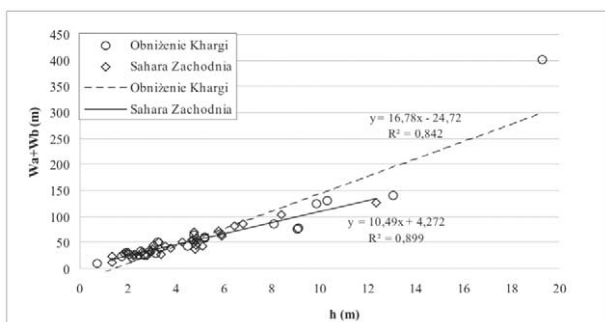
stano do interpolacji powierzchni wydmy, a w rezultacie do wygenerowania trójwymiarowego obrazu barchanów. Stworzony w ten sposób model przestrzenny wydmy, po wyznaczeniu osi symetrii (na podstawie osi wyznaczonej w terenie oraz osi wyznaczonej geometrycznie na podstawie modelu wydmy), pozwala określić główne parametry form (wg Finkela 1959): długość stoku dowietrznego ( $L_o$ ) i zawietrznego ( $L_s$ ), długości ( $L_a$ ,  $L_b$ ) i szerokości ( $W_a$ ,



Ryc. 1. Punkty pomiarowe i stanowiska dla przykładowej wydmy



Ryc. 2. Model barchanu z wyznaczoną osią symetrii. Literami zaznaczono główne cechy metryczne (wg Finkela 1959)



Ryc. 3. Zależność szerokości ramion ( $W_a + W_b$ ) od wysokości formy ( $h$ ) z uwzględnieniem najwyższej zbadanej wydmy

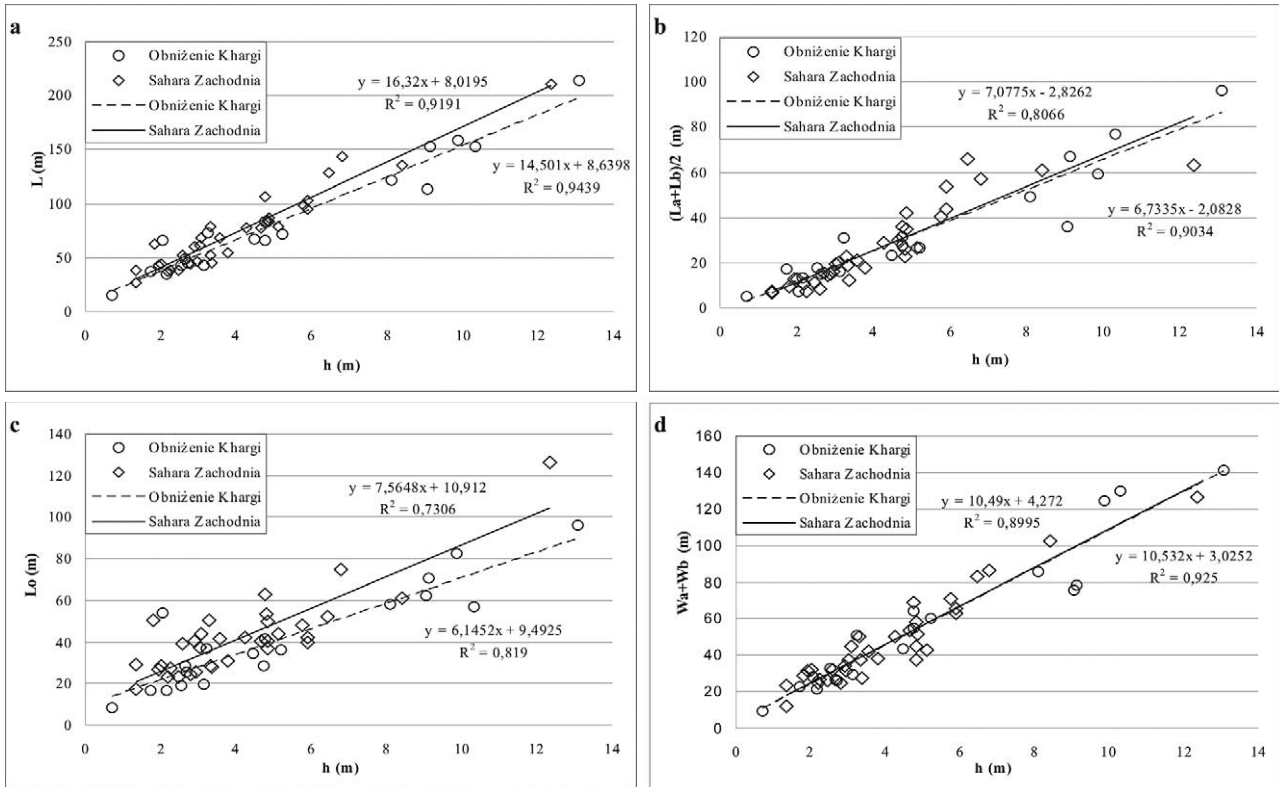
$W_b$ ) ramion oraz wysokość wydmy ( $h$ ) (ryc. 2). Przeanalizowano zależności pomiędzy wysokością wydmy a jej długością całkowitą, długością stoku dowietrznego, długością oraz szerokością ramion. Dodatkowo, wykorzystując program *Winkalk*, obliczono objętość wydmy. Uzyskane parametry wykorzystano do wzajemnych korelacji, które wykonano, obliczając równanie regresji metodą najmniejszych kwadratów. Dla lepszego porównania form obliczono również średnie nachylenie stoku zawietrznego i dowietrznego, obliczone wzdłuż osi symetrii wydmy.

Na podstawie przeprowadzonych korelacji cech metrycznych form występujących w obniżeniu Khargi stwierdzono, że w przypadku najwyższej wydmy uzyskane wyniki znacznie odbiegają od wyznaczonej linii trendu (ryc. 3). Barchan ten jest zbyt duży, przekształca się w wydmy złożoną, tracąc cechy typowe dla barchanów, dlatego też został wyłączony z rozważań.

## Wyniki

Przeprowadzone dokładne pomiary umożliwiły określenie zróżnicowania kształtu barchanów, występującego zarówno na poszczególnych obszarach, jak również pomiędzy nimi. Na obydwu obszarach badań wynik korelacji wybranych cech metrycznych analizowanych barchanów jest w przybliżeniu zgodny z wynikami przedstawionymi przez Finkela (1959). Na podstawie przeprowadzonej analizy można generalnie stwierdzić, że wraz z rozwojem barchanów proporcjonalnie zwiększają się poszczególne wymiary form. Występują one w dość ścisłej korelacji, pokazanej w postaci zależności liniowej (ryc. 4). Współczynnik korelacji wysokości wydmy do jej długości całkowitej jest bardzo silny i niemal tożsamy na obydwu obszarach (ryc. 4a). Zależność szerokości ramion od wysokości barchanów jest również bardzo duża (ryc. 4d). Nieco mniejsza zależność występuje w przypadku związku wysokości formy i długości ramion (ryc. 4b), a najmniejsza dotyczy związku wysokości wydmy i długości stoku dowietrznego (ryc. 4c). Wartości poszczególnych współczynników korelacji są na obydwu obszarach zbliżone do siebie. Uzyskane wyniki wskazują zatem, że niezależnie od obszaru proces kształtowania się stoku dowietrznego cechuje się największym zróżnicowaniem i najprawdopodobniej związany jest z innymi niż wielkość form czynnikami. Autorka przypuszcza, że najślabsza uzyskana korelacja dotycząca stoku dowietrznego na obszarze Sahary Zachodniej związana jest z występowaniem tam stosunkowo zwartej szaty roślinnej.

Na podstawie analiz linii regresji na dwóch badanych obszarach stwierdzono także różną wartość przyrostu całkowitej długości wydmy oraz długości stoku dowietrznego w stosunku do przyrostu wysokości wydmy (ryc. 4a, 4c). Szybszy przyrost długości zanotowano w przypadku form występujących na Sa-



**Ryc. 4.** Zależność od wysokości formy ( $h$ ): a) długości całkowitej ( $L=Lo+Ls+(La+Lb)/2$ ); b) długości ramion  $(La+Lb)/2$ ; c) długości stoku dowietrzego ( $Lo$ ); d) szerokości ramion ( $Wa+Wb$ )

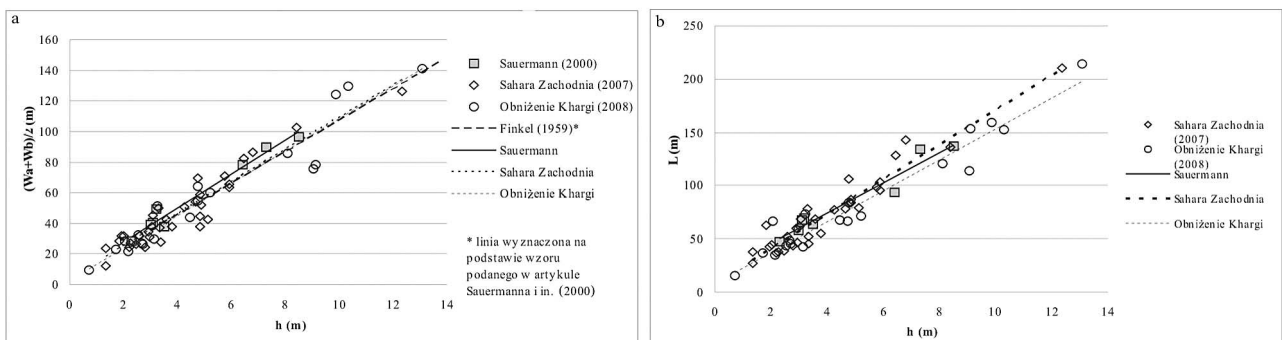
harze Zachodniej. Dla 10-metrowej wydmy na Saharze Zachodniej jej długość całkowita wynosiłaby 170 m, natomiast w przypadku obniżenia Khargi – 150 m (ryc. 4a). Wyniki takie mogą być związane z odmiennymi cechami teksturalnymi osadów wydmy, choć nie można wykluczyć wpływu nawet nieznacznych różnic cech fizycznogeograficznych w obydwu rejonach.

Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu w pomiarach tachimetru elektronicznego, możliwe było bardzo precyzyjne obliczenie kąta naturalnego zsywu stoku zawietrzego barchanów. Stwierdzono, że kąt ten zawiera się w przedziale od  $34,16^\circ$  do  $37,38^\circ$  na obszarze Sahary Zachodniej i od  $32,85^\circ$  do  $38,72^\circ$  na obszarze obniżenia Khargi, a więc jego nachylenie na terenie obniżenia Khargi osiąga nieco większe war-

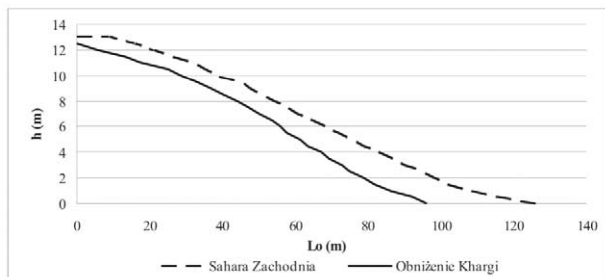
tości niż dotychczas opisywane w literaturze (Barczuk, Dłużewski 2002, Embabi 2000, Marks 1992).

## Dyskusja i wnioski

Badania dotyczące cech metrycznych barchanów prowadzone były na wielu obszarach pustyni gorących, między innymi w Peru – Finkel, Hastenrath, Lettau i Lettau, Hastenrath, na pustyni Namib – Slattery (Sauermann i in. 2000), w Kalifornii – Long i Sharp (Hesp i in. 1998) oraz Norris (1996), w Mauretanii – Coursin (Andreotti i in. 2002), na Saharze Zachodniej – Sauermann i in. (2000). Analiza wyników uzyskanych przez tych autorów wskazuje na zbliżony kształt form na poszczególnych obszarach. Porównując uzyskane dzięki korelacji cech metrycznych



**Ryc. 5.** Zależność od wysokości formy: a) szerokości ramion ( $Wa+Wb$ ), b) długości całkowitej ( $L$ )



**Ryc. 6.** Profile stoku dowietrznego barchanu z Sahary Zachodniej i obniżenia Khargi

linie regresji, stwierdzić należy jednak niewielkie zróżnicowanie niektórych parametrów (ryc. 5a, b). Również na badanych obszarach analiza cech metrycznych barchanów wskazuje na różnice, choć nieznaczne, w kształcie form. Na Saharze Zachodniej poszczególne długości form – długość całkowita, ramion oraz stoku dowietrznego – są większe dla wydmy o tej samej wysokości niż w przypadku barchanów obniżenia Khargi. Dodatkowo stwierdzono, że w stosunku do obszaru obniżenia Khargi na Saharze Zachodniej w trakcie rozwoju barchanów długości poszczególnych elementów form zwiększają się szybciej niż ich wysokość.

Zróżnicowanie kształtu barchanów związane jest z odmiennymi w obrębie poszczególnych pól wydmywnych czynnikami wpływającymi na rozwój tych form. Porównując te czynniki dla Sahary Zachodniej i obniżenia Khargi, za najbardziej zróżnicowane należy uznać trzy z nich: skład mineralogiczny – dominacja węglanowego materiału wydmywnego w przypadku Sahary Zachodniej i kwarcowego w przypadku obniżenia Khargi (Barczuk, Dłużewski 2002), średnia wilgotność powietrza – około 80% dla Sahary Zachodniej i 11% dla obniżenia Khargi (Martyn 2000) oraz występowanie krzewiastej roślinności na obszarze Sahary Zachodniej i zupełny brak szaty roślinnej na terenie obniżenia Khargi. Z różnicą długości stoku dowietrznego w wydmach o tej samej wysokości związane są również zmiany nachylenia stoku dowietrznego. Dłuższe stoki barchanów Sahary Zachodniej mają mniejsze nachylenie niż stoki barchanów obniżenia Khargi (ryc. 6). Może to wynikać z potencjalnie mniejszej kompaktacji materiału węglanowego.

Nieznaczne różnice w wynikach pomiarów przeprowadzonych tymi samymi metodami na obszarze Sahary Zachodniej przez Sauermanna w 1999 r. oraz autorkę w 2007 r. widoczne w przebiegu linii regresji, przedstawiające stosunek szerokości lub długości ramion do wysokości wydmy, mogą wynikać z większej dojrzałości form związanej z różnicą czasu dokonywanych pomiarów, jak również z liczby oraz różno-

rodności badanych form, w 1999 r. zmierzono 8 wydym, natomiast w 2007 – 34. Większa liczba oraz różnorodność form pod względem wielkości pozwalają na wyznaczenie linii regresji z nieco większą precyzją.

Mimo mijającego właśnie półwiecza badań dotyczących rozwoju barchanów, a w szczególności badań cech metrycznych tych form, nadal istnieje wiele niewyjaśnionych kwestii. Wydaje się, że dzięki coraz dokładniejszym przyrządom pomiarowym możliwe stanie się poznanie zmienności kształtu barchanów w kolejnych fazach rozwoju. Doskonalenie wiedzy na temat tego zagadnienia będzie niezwykle przydatne w badaniach szybkości przemieszczania się tych form. Pozwoli to z pewnością na większą precyzję w ocenie zagrożeń, jakie związane są z rozwojem barchanów.

## Literatura

- Andreotti B., Claudin P., Douady S. 2002. Selection of dune shapes and velocities. P. 1: Dynamics of sand, wind and barchans. *The European Physical Journal*, B 28: 321–339.
- Barczuk A., Dłużewski M. 2002. Wpływ cech teksturalnych na tempo rozprzestrzeniania się wybranych form wydmywnych obniżenia Khargi. *Warsztaty Geomorfologiczne, Egipt 5–22.04.2002*, WGiSR UW, SGP.
- Embabi N.S. 2000. Sand dunes in Egypt. *Sedimentary Geology of Egypt*, s. 45–87.
- Finkel H.J. 1959. The barchans of Southern Peru. *J. Geology*, 67: 614–647.
- Herrmann H., Sauermann G. 2000. The shape of dunes. *Physica*, A, 283: 24–30.
- Herrmann H.J., Sauermann G., Schwaemmle V. 2005. The morphology of dunes. *Physica*, A, 358: 30–38.
- Hesp P.A., Hastings K. 1998. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans. *Geomorphology*, 22: 193–204.
- Lima A.R., Sauermann G., Herrmann H. 2002. Modeling of dune field. *Physica*, A, 310: 487–500.
- Marks L. 1992. Osady i formy rzeźby eolicznej. [W:] L. Lindner. *Czwartorzęd. Osady, metody badań, stratygrafia*. PAE, Warszawa, s. 208–224.
- Martyn D. 2000. *Klimaty kuli ziemskiej*. PWN, Warszawa.
- Norris R.M. 1966. Barchan dunes of Imperial Valley, California. *Journal of Geology*, 74: 292–306.
- Sauermann G., Rognon P., Poliakov A., Herrmann H. 2000. The shape of the barchan dunes of Southern Morocco. *Geomorphology*, 36: 47–62.