

Katarzyna Biejał

Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Zakład Geomorfologii
kbiejał@uw.edu.pl

**ZMIENNOŚĆ KSZTAŁTU WYDM GWIAŹDZISTYCH
W OBSZARACH O BIMODALNYM REŻIMIE WIATRU**

Star dune shape variability in the area of bimodal wind regime

Abstract: Contemporary morphological changes of star dunes are observed mainly in certain parts of these dunes. They occur as lateral migration of crestlines of dune arms and modifications of inclination of their slopes. The aim of the research was to determine annual variability of shapes of compound and complex star dunes in bimodal wind regime. Precise measurements of 5 star dunes were performed with use of GPS RTK in March, 2011, and March, 2012, on Erg Chebbi (Morocco). Based on these measurements, 3D models of the dunes were created, which in turn, allowed for calculation of annual magnitude and direction of crestlines migration of star dune main arms. The results show that the resultant drift direction was in accordance with long-term regime of active wind in the study area. Both, the resultant drift direction and its magnitude were similar in all studied dunes. Variability of star dune shapes occurred to be independent from their stage of development (size of a dune) or its type. The most important feature determining morphodynamics of the star dune arms are: i) the angle between the arms and the active wind, and ii) slope inclination of the arms.

Key words: Star dune, bimodal wind regime, dune shape variability, Erg Chebbi, Morocco
Słowa kluczowe: wydmy gwiaździste, bimodalny reżim wiatru, zmienność kształtu, Erg Chebbi, Maroko

WPROWADZENIE

Wydmy gwiaździste (*pyramidalne*) należą do jednych z najwyższych oraz największych form akumulacji eolicznej (Wasson, Hyde 1983, Lancaster 1995, Laity 2008, Liu i in. 2011). Ich wysokość wynosić może powyżej 300 m (Breed, Grow 1979, Lancaster 2009), a objętość nawet kilkadziesiąt milionów metrów sześciennych. Wydmy gwiaździste stanowią około 8,5% wszystkich złożonych form akumulacji eolicznej, występujących na pustyniach piaszczystych (Fryberger,

Goudie 1981). Według dotychczasowych badań uważa się, że występują one w obszarach o złożonym reżimie wiatru, charakteryzujących się dużą dostawą materiału. Ich występowanie łączone jest również często z barierami topograficznymi, mającymi wpływ na zróżnicowanie reżimu wiatru (Wilson 1973, Breed, Grow 1979, McKee 1982, Lancaster 1983, 1989, Laity 2008). Obszary ich występowania charakteryzują się wskaźnikiem zmienności wiatru wydmotwórczego (RDP/DP) mniejszym niż 0,35 (Fryberger 1979, Wasson, Hyde 1983).

W literaturze przedmiotu mowa jest o możliwości występowania i rozwoju wydm gwiaździstych również w obszarach charakteryzujących się bimodalnym reżimem wiatru, gdzie dwa kierunki dominującego wiatru są przeciwstawne (Lancaster 1995, Laity 2008). Jednak dotychczas brak wyników badań dotyczących kształtu wydm gwiaździstych w obszarach o takim reżimie wiatru.

Celem badań było określenie długookresowej (rocznej) zmienności kształtu wydm gwiaździstych, w obszarze o bimodalnym reżimie wiatru.

Obszarem występowania takich form, będących w różnych etapach rozwoju, charakteryzującym się bimodalnym reżimem wiatru jest Erg Chebbi, położony w południowo-wschodnim Maroku.

STAN BADAŃ

Wydmy gwiaździste dzieli się na trzy typy: prosty (ang. *simple*), złożony (ang. *compound*) oraz zespolony (ang. *complex*) (Breed, Grow 1979). Wszystkie dotychczasowe badania dotyczące wydm gwiaździstych przeprowadzone były na jednej, maksymalnie dwóch formach typu prostego występujących w danym obszarze. Wydmy gwiaździste typu złożonego oraz zespolonego jak dotychczas nie były poddane badaniom (Liu i in. 2011).

Z dotychczasowych badań wynika, że w rozwoju wydm gwiaździstych bardzo istotną rolę odgrywają wielkość wydmy, prędkość, kierunek i czas trwania wiatru o największej częstości oraz wtórny przepływ strumienia powietrza (Nielson, Kocurek 1987, Lancaster 1995, Liu i in. 2011). Badania nad rozwojem i dynamiką wydm gwiaździstych były dotychczas prowadzone na niewielką skalę. Przeprowadzone obserwacje terenowe oraz analizy zdjęć satelitarnych wskazują na zmienność kształtu wydm gwiaździstych głównie w ich wierzchowinowej części, powyżej $\frac{3}{4}$ wysokości wydmy (Liu i in. 2011). Wyniki dotychczasowych badań dotyczących rozkładu prędkości wiatru w obrębie wydmy gwiaździstej wskazują, że prędkość ta po stronie dowietrznej stopniowo wzrasta od podstawy do grzbietu wydmy. Prędkość przepływu powietrza w obrębie linii grzbietowej ramienia głównego może być nawet 4-krotnie większa niż u podstawy wydmy. Ze względu na niewielką częstość wiatru o prędkość powyżej wartości krytycznej niezbędnej do poderwania ziarna występującej przy podstawie

wydm, zmienność jej kształtu w tej części jest znikoma (Tsoar i in. 1985, Lancaster 1989, Wang i in. 2005).

Zmiany kształtu wydm gwiazdzistych, związane z sezonową zmiennością prędkości i kierunku wiatru wydmotwórczego, widoczne są głównie w postaci lateralnego przemieszczania się krawędzi ramion, zmienności długości ramion oraz zmiany nachylenia ich stoków, zgodnie z aktualnym kierunkiem wiatru wydmotwórczego (Tsoar i in. 1985, Nielson, Kocurek 1987, Lancaster 1989, Zhang i in. 2000). W morfodynamice form eolicznych, w szczególności wydm gwiazdzistych, bardzo istotny jest kąt pomiędzy kierunkiem wiatru wydmotwórczego a kierunkiem przebiegu krawędzi ramion wydmy. Za wartość graniczną wpływającą na zmianę morfodynamiki ramion wydm uznaje się kąt 30° (Tsoar 1983, Wang i in. 2005). Na skutek oddziaływania wiatru wydmotwórczego o kierunku powyżej tej wartości, na stoku zawietrznym powstaje wsteczna komórka cyrkulacyjna decydująca o przemieszczeniu się ramienia wydmy w stronę zawietrzną (Wang i in. 2005). Poniżej wartości 30° – wsteczna komórka cyrkulacyjna nie powstaje. Wiatr wydmotwórczy nie powoduje wówczas lateralnego przemieszczania się ramion wydmy lecz prowadzi do ich wydłużania.

Zmiany kształtu wydm gwiazdzistych w obszarach o bimodalnym reżimie wiatru nie zostały dotychczas zbadane (Zhang i in. 2000, Wang i in. 2005, Laity 2008, Liu i in. 2011).

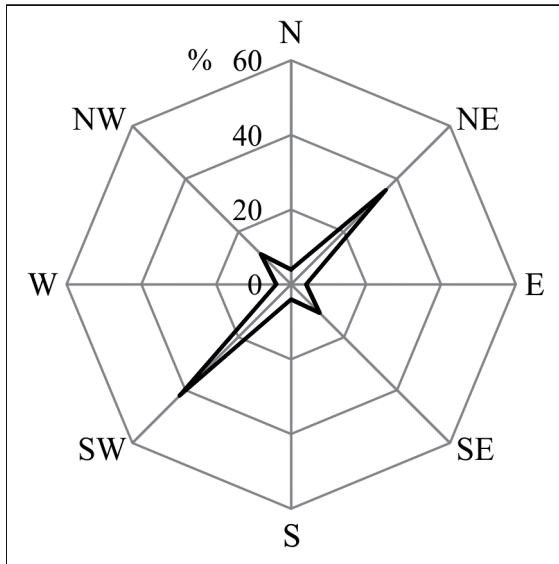
METODY I OBSZAR BADAŃ

Erg Chebbi, położony w południowo-wschodnim Maroku, jest polem wydmowym o powierzchni około 110 km^2 . W jego skład wchodzi wydm gwiazdziste typu złożonego (ang. *compound*) i zespolonego (ang. *complex*) oraz wydmy poprzeczne. Wysokość względna wydm gwiazdzistych nie przekracza tam 100 m , natomiast rozpiętości ramion może wynosić nawet ponad 2 km .

Rejon Ergu Chebbi charakteryzuje się bimodalnym reżimem wiatru o dwóch najczęściej występujących kierunkach – NE i SW (Benmohammadi 2001, Banall i in. 2003) (ryc. 1). W rejonie Ergu Chebbi wskaźnik zmienności kierunku wiatru wydmotwórczego RDP/DP wynosi poniżej $0,35$, a więc jest zgodny z dotychczasowymi wynikami badań dla obszarów występowania wydm gwiazdzistych (Fryberger 1979).

Badania szczegółowe przeprowadzono w marcu 2011 roku oraz marcu 2012 roku. W okresie badań wyróżniono trzy sezony o zmiennej energii wiatru wydmotwórczego, które w rejonie Ergu Chebbi charakterystyczne są również dla wielolecia. Sezon o wysokiej energii wiatru trwał od marca do końca czerwca, sezon o średniej energii wiatru – od lipca do końca września, sezon o niskiej energii wiatru – od października do końca lutego. Badania terenowe

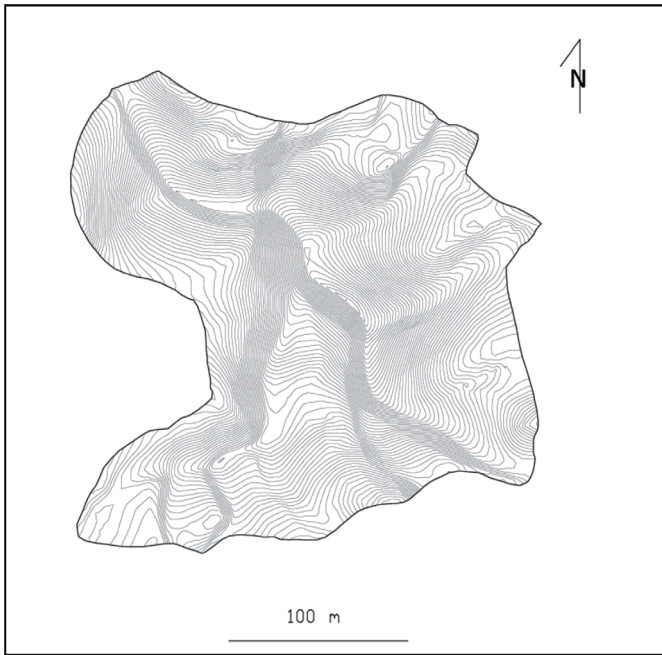
przeprowadzone zostały w obydwu przypadkach na początku okresu o wysokiej energii wiatru.



Ryc. 1. Róża wiatru dla stacji meteorologicznej w Rissani (na podstawie Benmohammadi 2001).

Fig. 1. Wind rose for the Rissani meteorological station (based on Benmohammadi 2001).

Wykonano dwukrotnie pomiary szczegółowe 5 wydmy gwiaździstych, będących w różnych fazach rozwoju (w tym 4 wydmy typu złożonego oraz 1 wydmy typu zespolonego). Pomiary kształtu wydmy przeprowadzone zostały przy użyciu GPS'a RTK, z dokładnością do ± 2 cm. Uzyskane wyniki pomiarów umożliwiły wykonanie trójwymiarowych modeli, precyzyjnie odzwierciedlających kształt form (ryc. 2). Modele stworzone były przy użyciu programów: WinKalk, MicroMap oraz AutoCad Map 2011. Na ich podstawie przeprowadzono analizy cech morfometrycznych wydmy oraz zmiany położenia i przebiegu krawędzi ramienia głównego w obydwu okresach pomiarowych. Wysokość wydmy obliczono na podstawie różnicy wysokości pomiędzy maksymalnym punktem położonym w obrębie wydmy, a średnią wysokością podstawy wydmy. Objętość wydmy, obliczona w programie WinKalk, została odniesiona do poziomu podstawy wydmy, tj. średniej wysokości punktów położonych na obwodzie wydmy. Podstawa form w miejscach, gdzie wydmy gwiaździste nie stykały się z innymi formami, została wyznaczona na ich granicy z rekiem. W miejscach, gdzie wydmy łączyły się ze sobą punktem rozdzielającym jedną formę od drugiej był punkt znajdujący się najniżej.



Ryc. 2. Przykładowy model 3D wydmy gwiazdzistej, poziomice co 20 cm.
Fig. 2. An example of the 3D star dune model, levels at 20 cm.

Aby możliwe było porównanie długookresowej zmienności kształtu wydm gwiazdzistych, przy każdej analizowanej formie zostały założone repery. Umożliwiło to nałożenie na siebie modeli 3D form z obydwu okresów badawczych, co z kolei pozwoliło na obliczenie wielkości i kierunku przemieszczenia linii grzbietowej ramienia głównego badanych wydm. Analizie poddano 5 ramion głównych wydm gwiazdzistych o różnej wielkości, których całkowita długość wynosiła od 284 m do 980 m.

Dla wykonania obliczeń niezbędne było podzielenie ramion głównych badanych wydm na krótsze odcinki proste. Zastosowano podział na odcinki 10 metrowe. Ich sumaryczna długość dla danej wydmy była niemal tożsama z długością rzeczywistą ramienia tej wydmy (różnice pomiędzy rzeczywistą długością ramienia głównego a jego długością mierzoną w 10 metrowych odcinkach prostych wynosiły maksymalnie 6%).

Dla każdego 10 m odcinka zmierzono jego azymut. Pozwoliło to na wyznaczenie średniego kierunku przebiegu ramienia głównego danej wydmy gwiazdzistej obliczonego jako średnia arytmetyczna przebiegu wszystkich 10 m odcinków.

Wielkość i kierunek przemieszczenia ramienia głównego analizowano również w odstępach 10 m. Wypadkowy kierunek przemieszczenia ramienia głównego danej wydmy obliczono metodą wektorową odkładając kolejno odcinki

o danym kierunku i wartości przemieszczenia zmierzone we wszystkich punktach pomiarowych. Kierunek wypadkowy określono łącząc początek pierwszego odcinka z końcem ostatniego odcinka. Średnią wartość przemieszczenia obliczono jako średnią arytmetyczną.

Średni wypadkowy kierunek przemieszczenia głównych ramion wszystkich analizowanych wydym umożliwił wyznaczenie kierunku wiatru aktywnego dominującego w okresie od marca 2011 do marca 2012. Kierunek ten posłużył do wyznaczenia kąta granicznego pomiędzy kierunkiem wiatru wydymotwórczego a przebiegiem ramienia głównego wydmy, poniżej którego nie powstaje wsteczna komórka cyrkulacyjna decydująca o lateralnym przemieszczaniu się ramienia wydmy. Mając wyznaczony ten kąt sprawdzono, która część ramienia głównego danej wydmy ma przebieg niespełniający tego kryterium. Ta część ramienia powinna przemieszczać się wolniej niż pozostała część ramienia.

Analizy oparte są sumarycznie na pomiarze ramion głównych o łącznej długości 2 271,91 m w 227 punktach.

WYNIKI

Wydmy gwiazdziste wybrane do badań szczegółowych różniły się wielkością oraz kształtem (liczbą ramion drugiego rzędu, występowaniem ramion trzeciego rzędu). Najmniejszą analizowaną wydumą była wydma WG5, o wysokości 33 m i objętości ok. 890 tys. m³, a największą – WG6, wydma typu zespolonego, o wysokości 81,12 m i objętości ponad 10 mln m³ (tab. 1).

Tab. 1. Podstawowe cechy morfometryczne analizowanych wydym gwiazdzistych.
Table 1. Basic morphological parameters of studied star dunes.

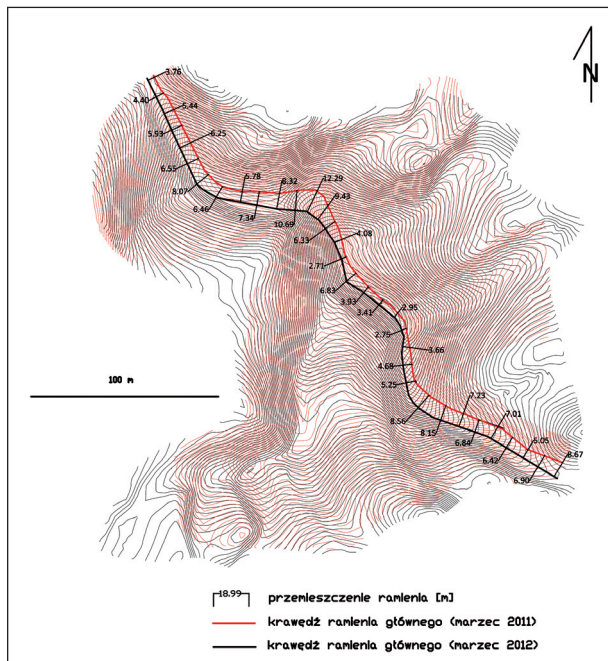
	Typ wydmy	Wysokość [m]	Powierzchnia pola podstawy [m ²]	Objętość [m ³]	Długość ramienia głównego [m]
WG1	złożony	41,27	43 761,74	1 060 414	360,86
WG2	złożony	37,39	39 909,14	1 009 601	402,38
WG4	złożony	41,58	53 780,05	1 426 570	284,07
WG5	złożony	33,11	40 723,26	898 461	345,59
WG6	zespolony	81,12	148 165,47	10 035 751	980,24

Roczna zmiana kształtu wydym gwiazdzistych w obszarach o bimodalnym reżimie wiatru widoczna jest głównie w postaci zmiany położenia krawędzi ramion wydmy. Uzyskane wyniki pomiarów wskazują, że krawędzie ramion głównych

wydym zmierzonych w marcu 2011 roku były równoległe do odpowiadających im krawędzi ramion głównych wydym zmierzonych w marcu 2011 roku. Ramiona główne badanych wydym przemieszczały się od 0,11 m do 14,83 m (ryc. 3).

Średnia wielkość przemieszczenia krawędzi ramienia głównego dla wydym gwiazdzistych, będących w różnych fazach rozwoju w analizowanym okresie badawczym, jest bardzo zbliżona (tab. 2). Świadczy to o tym, iż wielkość wydmy (długość ramienia głównego, wysokość formy oraz jej objętość), faza rozwoju, w której wydma się znajduje, a przede wszystkim typ wydmy, nie mają wpływu na morfodynamikę ramion głównych wydym gwiazdzistych.

Kierunek przemieszczenia poszczególnych odcinków krawędzi ramienia głównego badanych wydym gwiazdzistych został przeanalizowany wraz z kierunkiem ich przebiegu. Stwierdzono, że maksymalne odchylenie kierunku przebiegu krawędzi ramienia głównego badanych wydym od średniego kierunku przebiegu krawędzi tego ramienia jest dość zróżnicowane. Największe odchylenie (do 111°) stwierdzono na wydymie WG6 (ryc. 4), a więc formie największej, należącej do typu zespolonego. Krawędź ramienia głównego wydmy WG6 charakteryzuje się najbardziej sinusoidalnym przebiegiem. Najmniejsze odchylenie kierunku przebiegu krawędzi ramienia głównego od średniego kierunku przebiegu ramienia głównego (do 36°), ma wydma WG1 (ryc. 4).



Ryc. 3. Wypadkowe przemieszczenia krawędzi ramienia głównego przykładowej wydmy gwiazdzistej Ergu Chebbi od marca 2011 r do marca 2012 r.

Fig. 3. An example of resultant drift direction of crestline of a star dune main arm in Erg Chebbi based on measurements from March, 2011, to March, 2012

Tab. 2. Średni przebieg oraz wielkość i kierunek przemieszczenia krawędzi ramion głównych badanych wydm gwiaździstych Ergu Chebbi od marca 2011 r. do marca 2012 r.

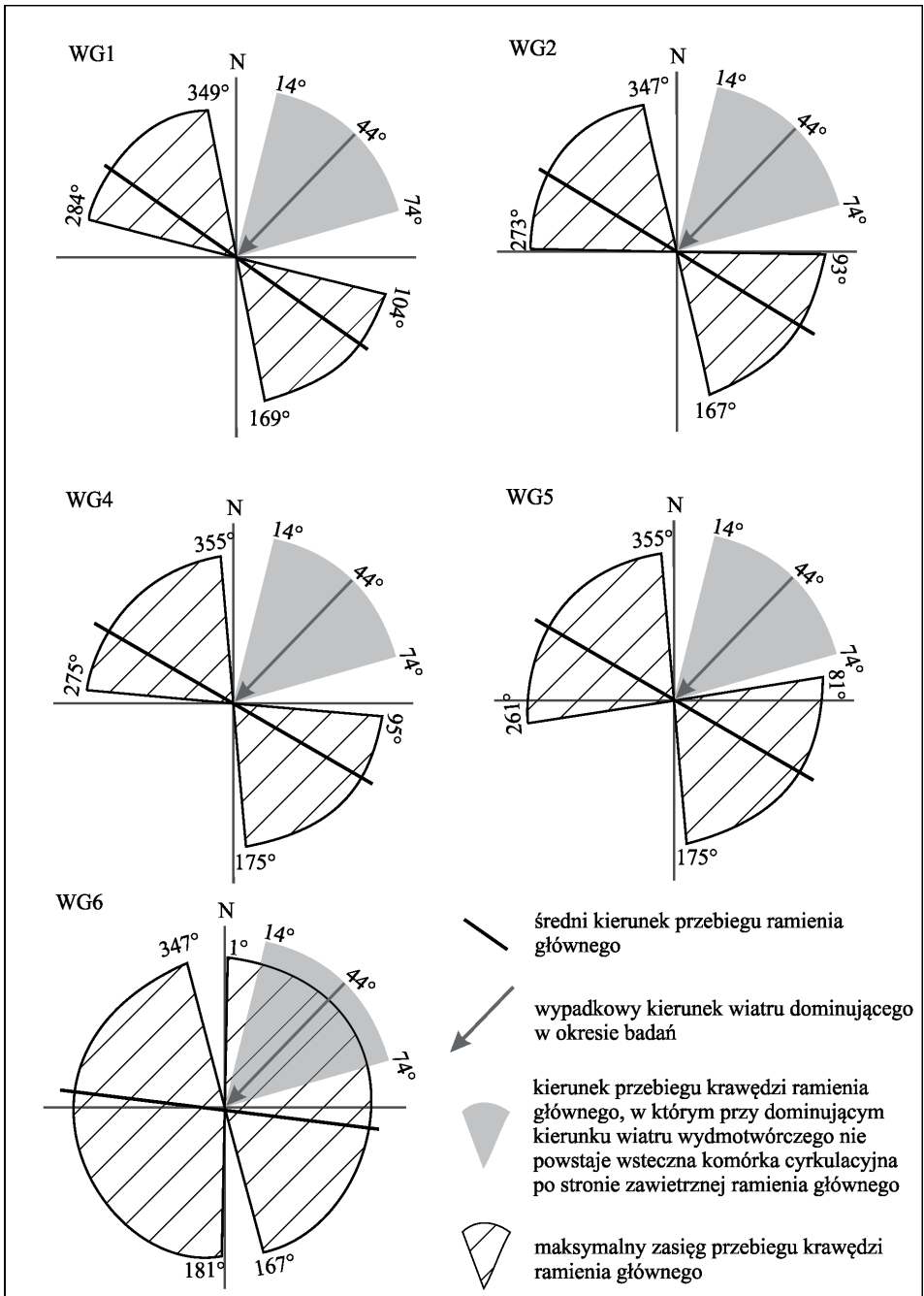
Table 2. Mean drift direction and magnitude and direction of migration of main arm crestlines.

Oznaczenie wydm	Średni przebieg ramienia głównego [°]	Maksymalny i minimalny przebieg krawędzi ramienia głównego [°]	Średnie przem. krawędzi ramienia głównego [m]	WKP* [°]	Średnie przemieszczenie [m] krawędzi ramienia głównego w stosunku do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego			
					<30°	%	>30°	%
WG1	140 (320)	104-169 (284-349)	6,56	230	-	0	6,56	100
WG2	136 (316)	93-167 (273-347)	7,96	231	-	0	7,96	100
WG4	135 (315)	95-175 (275-355)	4,39	218	-	0	4,39	100
WG5	135 (315)	81-175 (261-355)	6,24	219	-	0	6,24	100
WG6	112 (292)	1-167 (181-347)	6,16	223	2,37	13,79	6,77	86,21

* WKP – wypadkowy kierunek przemieszczenia krawędzi ramienia głównego

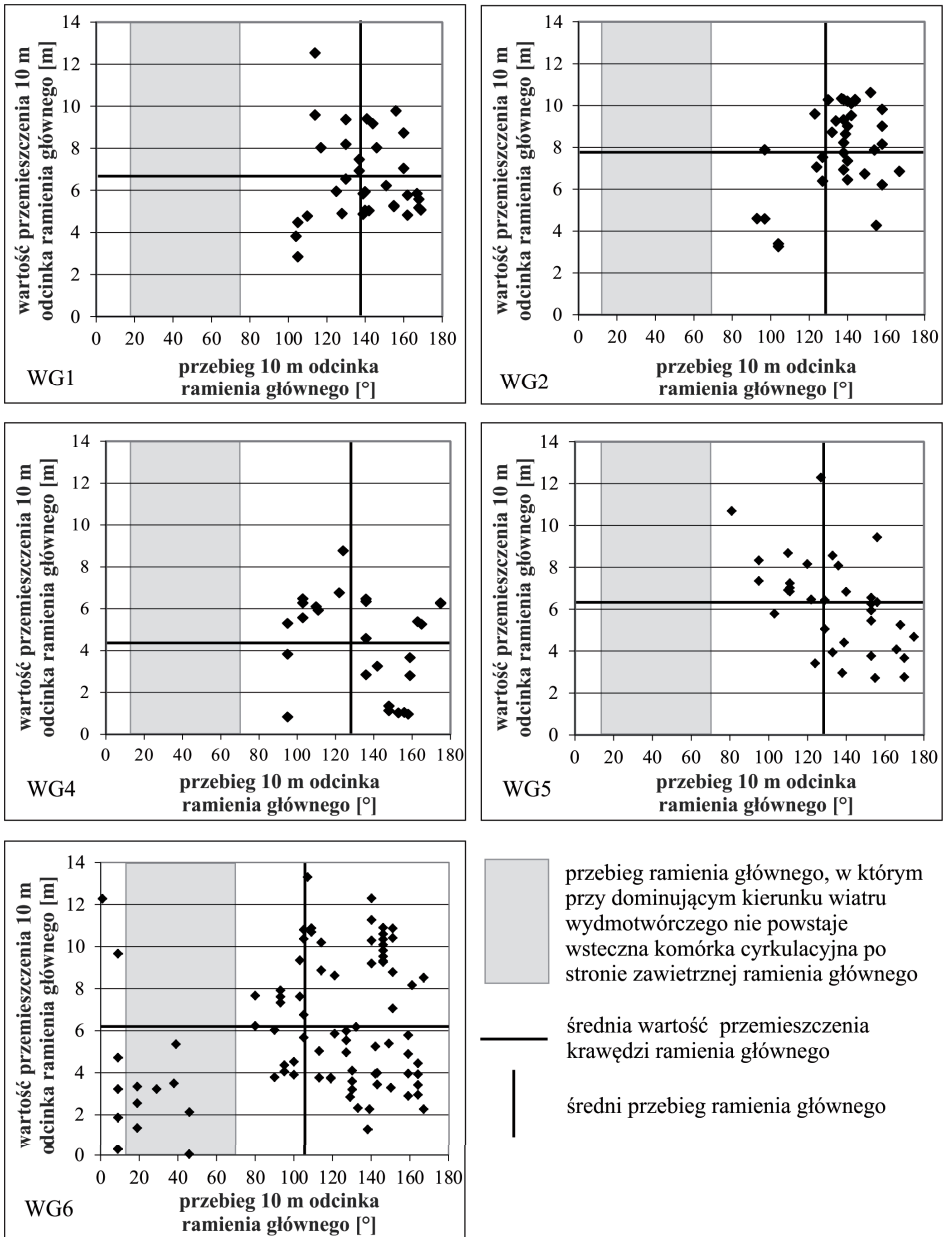
Mimo dość dużego zróżnicowania kierunku przebiegu krawędzi ramion głównych badanych wydm ich wypadkowy kierunek przemieszczenia jest bardzo podobny i wynosi od 218° do 231° (tab. 2). Tak samo jak w przypadku wielkości średniego przemieszczenia krawędzi ramion głównych, wypadkowy kierunek ich przemieszczenia jest niezależny od wielkości, a więc i typu wydm gwiaździstych. Krawędzie ramion głównych badanych wydm Ergu Chebbi będących w różnej fazie rozwoju w okresie badań przemieściły się więc w podobnym kierunku, którego średnia wartość wynosi 224°. Oznacza to, że wypadkowy kierunek wiatru aktywnego w badanym okresie, który spowodował przemieszczanie się krawędzi ramion wydm gwiaździstych na badanym obszarze wynosił 44°. Kierunek ten jest zgodny z dwoma najczęściej występującymi kierunkami wiatru wydmotwórczego w rejonie Ergu Chebbi – NE i SW (porównaj ryc. 1).

Dla morfodynamiki wydm, również wydm gwiaździstych, kierunkiem wiatru wpływającym w największym stopniu na zmiany kształtu form, jest kierunek powyżej 30° w stosunku do przebiegu krawędzi ramienia wydm. W przypadku, gdy dominujący kierunek wiatru aktywnego dla okresu marzec 2011-marzec 2012 wyniósł 44°, przebieg krawędzi ramienia, przy którym zmniejszeniu ulega tempo jego lateralnego przemieszczania wynosił od 14° do 74° (ryc. 4).



Ryc. 4. Maksymalny zasięg przebiegu krawędzi ramion głównych analizowanych wydm gwiazdzistych na tle wypadkowego kierunku wiatru dominującego.

Fig. 4. Maximum migration of main arm crestlines with resultant wind direction.



Ryc. 5. Wartość przemieszczenia i przebieg 10 m odcinków krawędzi ramienia głównego wydm gwiazdowych.

Fig. 5. Rates of migration and direction of 10 m-long segments of main arms of star dunes.

Spośród analizowanych wydm, tylko przy jednej formie występuje 80 metrowy odcinek ramienia głównego wydmy gwiazdzistej zespolonej (WG6), którego przebieg krawędzi zawiera się w tym przedziale (ryc. 4, 5). Odcinek ten znajduje się w części środkowej ramienia, nieznacznie poniżej części wierzchołka wydmy. Uzyskane pomiary jednoznacznie wskazują, że wielkość przemieszczenia poszczególnych odcinków składających się na tę część krawędzi ramienia głównego jest mniejsza od średniej wartości przemieszczenia krawędzi całego ramienia tej wydmy (ryc. 5). Forma ta, ze względu na swoją wielkość musiała powstać wcześniej w porównaniu z pozostałymi analizowanymi wydmami gwiazdzistymi, w znacznie dłuższym okresie, charakteryzującym się bardziej zróżnicowanym reżimem wiatru lub w okresie o oddziaływaniu wiatru o większej energii.

Mimo, że w pozostałych analizowanych wydmach przy dominującym kierunku wiatru wydmotwórczego wsteczna komórka cyrkulacyjna przy odpowiedniej sile wiatru powinna powstawać, stwierdzono duże zróżnicowanie wielkości przemieszczania się poszczególnych odcinków krawędzi ramienia głównego (ryc. 5). Dzieje się to w wielu przypadkach nawet przy tym samym kierunku przebiegu krawędzi ramienia głównego.

WNIOSKI

Zmiana kształtu wydm gwiazdzistych w ciągu roku widoczna jest głównie jako zmiana położenia krawędzi ramion głównych analizowanych form. Przeprowadzone analizy nie wykazały związku pomiędzy wielkością wydmy a przemieszczaniem się krawędzi ich ramion. Zmienność położenia całej formy w ciągu tak krótkiego czasu, niezależnie od ich wielkości i typu nie jest zauważalna.

Stwierdzono, że możliwość precyzyjnego określenia wypadkowego kierunku przemieszczania się krawędzi ramion badanych wydm umożliwia bardzo dokładne wyznaczenie dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego dla danego okresu badawczego. Metoda ta może być wykorzystana jako wskaźnikowa w regionach pozbawionych długoterminowych danych meteorologicznych.

Mimo zróżnicowania wielkości i typu analizowanych wydm, zarówno średnie przemieszczenie krawędzi ramion głównych, jak i wypadkowy kierunek ich przemieszczenia miały zbliżone wartości. Pozwala to wnioskować, iż zarówno wielkość (faza rozwoju) jak i typ formy (w tym przypadku złożony lub zespolony) nie mają istotnego wpływu na wielkości zmian kształtu i przemieszczenia się wydm gwiazdzistych.

Wyniki analizy wielkości oraz kierunku przemieszczenia się krawędzi ramion wydm gwiazdzistych potwierdzają istotność dla morfodynamiki tych wydm kierunku przebiegu ramion wydmy w stosunku do dominującego kierun-

ku wiatru wydmotwórczego, umożliwiającego tworzenie się wstecznej komórki cyrkulacyjnej po stronie zawietrznej ramienia wydmy.

Mimo, że na większość analizowanych ramion głównych oddziaływał w ciągu badanego okresu wiatr o takiej samej prędkości i kierunku (zdecydowana większość analizowanych krawędzi ramion głównych miała przebieg różniący się o ponad 30° od dominującego kierunku wiatru aktywnego) wielkość przemieszczenia poszczególnych odcinków danego ramienia była bardzo zróżnicowana. Należy wnioskować, że istnieje dodatkowy czynnik modyfikujący lokalnie przepływ przypowierzchniowego strumienia powietrza. Wstępne obserwacje wskazują, że istotnym czynnikiem może być zróżnicowanie nachylenia stoków ramion wydm.

Erg Chebbi jest obszarem o bimodalnym reżimie wiatru, charakteryzującym się częstą zmianą kierunku wiatru aktywnego. W obszarach takich, akumulacyjne formy eoliczne przemieszczają się ruchem wahadłowym. Wielkość i kierunek tego przemieszczenia w danym momencie uzależniony jest od chwilowego kierunku i siły wiatru. Można przypuszczać, że wielkość przemieszczania ramion głównych wydm gwiaździstych w danym sezonie może być zbliżona lub nawet większa, niż wartość wypadkowa uzyskana na podstawie badań prowadzonych w ciągu całego roku. Potwierdzenie tej tezy wymaga przeprowadzenia pomiarów położenia i przebiegu ramion wydm gwiaździstych w sezonach charakteryzujących się zbliżonym reżimem wiatru.

Literatura

- Benalla M., Alem M., Rognon P., Desjardins R., Hilali A., Khardi A., 2003, Les dunes du Tafilalet (Maroc): dynamique éolienne et ensablement des palmeraies, Sécheresse, Volume 14, 2, 73-83.
- Benmohammadi A., 2001, Ensablement et désertification au sud-est Marocain: Trajectoires éoliennes et origine du sable des vallées de Drâa, Ziz et Rhéris, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Ibn Tofial, Faculté des Sciences, Kenitra.
- Biejat w *druku*, Reżim wiatru a rozwój wydm gwiaździstych Ergu Chebbi (południowe Maroko), Landform Analysis.
- Breed C.S., Grow T., 1979, Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing, [w:] E.D. McKee (red.), A study of global sand seas, US Geol. Surv. Prof. Pap., 1052, 253-301.
- Fryberger S.G., 1979, Dune forms and wind regime, [w:] E.D. McKee (red.), A Study of Global Sand Seas, US Geol. Surv. Prof. Pap., 1052, 137-169.
- Fryberger S.G., Goudie, A.S., 1981, Arid geomorphology, Prog. Phys. Geogr., 5, 409-428
- Laity J., 2008, Desert and Desert Environments, Wiley-Blackwell, 1-357.
- Lancaster, N., 1983, Controls of dune morphology in the Namib Sand Sea. [w:] M.E. Brookfield and T.S. Ahlbrandt (red.), Aeolian Sediments and Processes, Elsevier, Amsterdam, 289-296.

- Lancaster N., 1989, Star dunes, *Prog. Phys. Geogr.*, 13, 67–91.
- Lancaster N., 1995, *Geomorphology of Desert Dunes*, Routledge, London&New York, 1-264.
- Lancaster, N., 2009, Dune Morphology and Dynamics, *Geomorphology of Desert Environments*. Springer, Netherlands, 557–595.
- Liu B., Qu J, Zhang W., Qian G., 2011, Numerical simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 99, 879-888.
- McKee E.D., 1982, Sedimentary Structures in Dunes of the Namib Desert, South West Africa. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 188, 64.
- Nielson J., Kocurek, G., 1987, Surface processes, deposits, and development of star dunes: Dumont dune field, California. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 99, 177-186.
- Tsoar, H., 1983, Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) dune, *Sedimentology*, 30, 567-578.
- Tsoar, H., Rasmussen, K.R., Sorensen, M. and Willetts, B.B., 1985, Laboratory studies of flow over dunes. [w:] O.E. Barndorff-Nielsen, J.T. Møller, K.R. Rasmussen and B.B. Willetts (red.), *International Workshop on the Physics of Blown Sand, Proceedings, Department of Theoretical Physics, Institute of Mathematics, University of Aarhus, Memoirs*, 8, 327-350.
- Wang T., Zhang W., Dong Z., Qu J., Jing Z., Wang W., Feng J., 2005, The dynamic characteristics and migration of a pyramid dune, *Sedimentology* 52, 429-440.
- Wasson R.J., Hyde R., 1983, Factors determining desert dune type, *Nature*, 304, 227-578
- Wilson, I.G., 1973, *Ergs, Sedimentary Geology*, 10, 77-106.
- Zhang W., Qu J., Dong Z., Li X., Wang W., 2000, The airflow field and dynamic processes of pyramid dunes, *Journal of Environments*, 45, 357-368.