

Maciej Dłużewski, Katarzyna Biejał

Uniwersytet Warszawski

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

Zakład Geomorfologii

dłużewski@uw.edu.pl

KSZTAŁT BARCHANÓW JAKO WSKAŹNIK REŻIMU WIATRU (NA PRZYKŁADZIE SAHARY ZACHODNIEJ – MAROKO).

Shape of barchan dunes as an indicator of wind regime: a case study from the Moroccan Western Sahara.

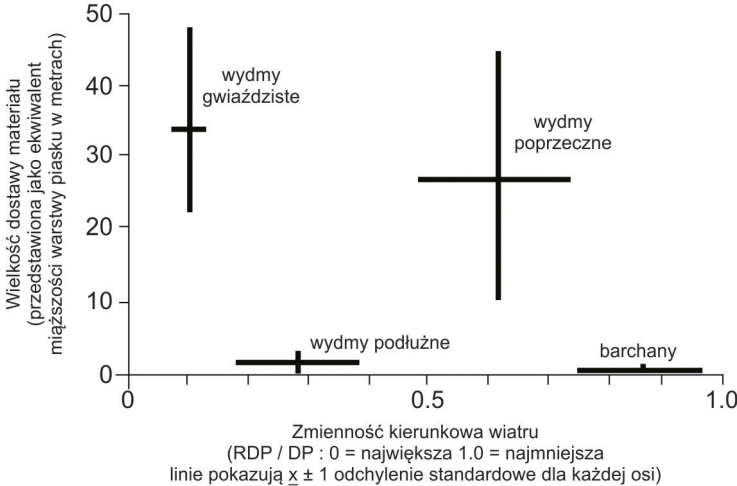
Abstract: Barchans are characterized by a symmetric shape independently of their stage of development and the axis of symmetry parallels to the dominant wind direction. However, shape of the dunes can be modified by several factors, among which most important are: change of wind regime, dune collisions or interaction of closely spaced dunes, ground surface relief, asymmetric sediment supply. The aim of the study was to analyze the impact of short-term (diurnal) and long-term (seasonal) changes in wind direction and velocity on shape of barchan dunes. The study was conducted in southern Moroccan area of Western Sahara, between Tarfaya and Laâyoune. This area is characterised by significant variability of active wind ($RDP/DP=0,66$) which is unfavourable for barchans development. Measurements were conducted in two spring seasons of 2011 and 2012 and two autumn seasons of 2007 and 2011. 52 isolated barchans were selected for detailed studies. Based on GPS-RTK measurements, precise 3D models of the landforms were obtained allowing the detailed analysis of dune shapes. Changes of basic morphological parameters were analyzed as well as shape changes occurring the windward slope and within dunes horns. The shapes of the barchans were correlated with the short-term and the long-term wind regime. It was found that basic morphological parameters are not good indicators of wind variability, with the exception of barchan horns lengths which change according to the seasonal wind regime. Short-term wind regime changes are well registered by: i) “collars” developing along the dune crestlines, ii) “tongues” developing at the ends of dune horns and iii) location of the dune apex. On the other hand, beaded horns testify for very strong wind. I was found, that mentioned features develop and undergo modification during first days or even hours of changed wind regime. The analyzes of barchan shapes, performed in different seasons, proved that even a several-month long period of highly diversified wind regime does not change basic shape of the barchans. Therefore, it can be inferred that barchans development does not depend exclusively on wind regime.

Key worlds: barchans, dune shape, wind regime, Western Sahara, Morocco

Słowa kluczowe: barchany, kształt wydym, reżim wiatru, Sahara Zachodnia, Maroko

WPROWADZENIE

Słowo **barchan** (*barcan, barchane, barkan, barkhan*) pochodzi z języka tureckiego i oznacza *wydmy aktywne* (Glenn 1979). Jest to pojedyncza forma akumulacji swobodnej w kształcie półksiężyca, której ramiona skierowane są zgodnie z kierunkiem wiatru. Barchany tworzą się w obszarach o jednym dominującym kierunku wiatru, niewielkiej dostawie materiału i spoistym podłożu (ryc. 1) (Wasson, Hyde 1983, Lancaster 1989, Cooke i in. 1993). Zajmują mniej niż 1% powierzchni form akumulacji eolicznej, lecz występują niemal na wszystkich pustyniach świata, a także na dnie morskim (Allen 1984, Daniell, Hughes 2007) oraz na Marsie (Edgett, Malin 2000, Bourke 2010) i Tytanie (Radebaugh i in. 2011), gdzie mają największy udział wśród wydm poprzecznych. Są to formy najbardziej dynamiczne wśród wydm, stwarzające największe zagrożenie dla działalności człowieka. Ich badania zapoczątkowane zostały ponad 100 lat temu, lecz do dziś wiele zagadnień dotyczących ich rozwoju nie zostało wyjaśnionych (Beadnell 1910, Cornish 1914, Bagnold 1941, Finkel 1959, Hastenrath 1967, Lettau, Lettau 1978, Hesp, Hasting 1998, Sauermaun i in. 2000, Bourke 2010).



Ryc. 1. Wpływ zróżnicowania kierunku wiatru oraz wielkości dostawy materiału na rozwój głównych typów wydm (Wasson, Hyde 1983).

Fig. 1. Influence of wind regime and sediment supply on development of main types of dunes (Wasson, Hyde 1983).

Wysokość tego typu form wynosi przeważnie od 1,5 do 10m, długość podstawy od 40 do 150m, rozpiętość ramion od 30 do 100m, a nachylenie stoku dowietrznego od 8° do 20°. Od strony zawietrznej stok ten ograniczony jest przez

krawędź oddzielającą go od stoku zawietrzego, którego nachylenie wynosi 31°-35° (Finkel 1959). Nachylenie to jest związane z kątem naturalnego zsypu piasku zależnym od wielkości i stopnia wysortowania materiału eolicznego. Krawędź wydmy nie zawsze pokrywa się z jej grzbietem.

Barchany uznawane są za formy, które podczas przemieszczania się podlegają prawu zachowania masy oraz kształtu (Hesp, Hasting 1998). Według dotychczasowych badań prędkość przemieszczania się barchanów jest wprost proporcjonalna do prędkości wiatru i odwrotnie proporcjonalna do ich wysokości (Finkel 1959, Hastenrath 1967, Lettau, Lettau 1969, Slattery 1990, Ouelehri 1992).

Celem badań było określenie wpływu krótkookresowej (dobowej) i długookresowej (sezonowej) zmienności kierunku i prędkości wiatru na kształt barchanów, w szczególności na asymetrię ich kształtu w obrębie stoku dowietrzego i ramion. Badania prowadzono w ramach projektu MNiSzW nr NN306 116236 pt.: „Wpływ środowiska przyrodniczego na rozwój i prędkość przemieszczania się barchanów (na przykładzie wybranych obszarów północnej Sahary)”.

DOTYCHCZASOWY STAN BADAŃ

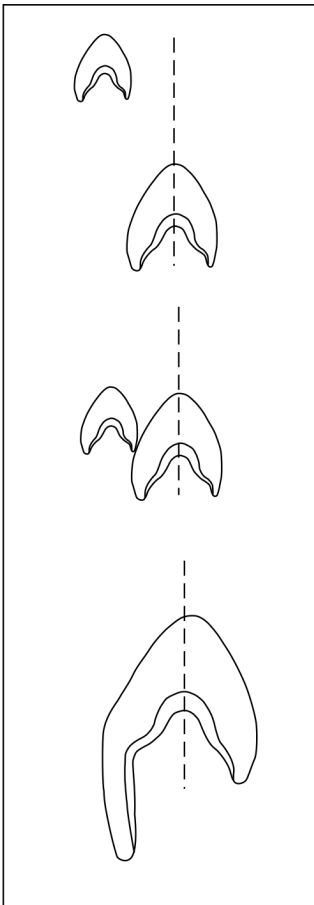
Morfometryczna analiza kształtu barchanów przeprowadzona została po raz pierwszy ponad 50 lat temu. Badania wykonane zostały przez Finkel'a (1959) w Pampa de la Joya w południowym Peru, a następnie kontynuowane w tym regionie przez Hastenrath (1967, 1987) oraz Lettau i Lettau (1969). Coursin (1964) oraz Sarthein i Walger (1984) wykonali pomiary barchanów w Mauretanii, Embabi (1982) w południowym Egipcie, Fryberger (1984) w Arabii Saudyjskiej, Tsoar (1974) na Synaju, Norris (1966) oraz Long i Sharp (1964) w Kalifornii, Slattery (1990), Hastings (1994) oraz Hesp i Hastings (1998) na pustyni Namib, Ouelehri (1992) oraz Sauermaun i in. (2000) na Saharze Zachodniej w Maroku. Dotychczasowe badania skupiały się jednak w większości na obliczeniach wybranych parametrów form wyłącznie w dwóch wymiarach. Tylko nieliczne prace dotyczące określania morfometrii barchanów prowadzone były w technice trójwymiarowej (Sauermaun 2000). Dokładność tych badań z uwagi na liczbę punktów pomiarowych w obrębie danej formy jest często niewystarczająca do analizy zróżnicowania kształtu. Liczba zmierzonych form jest również niewielka, uniemożliwiająca dokonanie analiz statystycznych cech morfometrycznych. Nie pozwalało to również na uwzględnienie w prowadzonych badaniach zróżnicowania wielkości wydmy.

Z matematycznego punktu widzenia barchany są formami symetrycznymi niezależnie od fazy ich rozwoju (Howard, Morton 1978, Wippermann, Gross 1986). Ich oś symetrii jest równoległa do dominującego kierunku wiatru. Kształt może być jednak zaburzony przez kilka czynników, z których najważniejsze to:

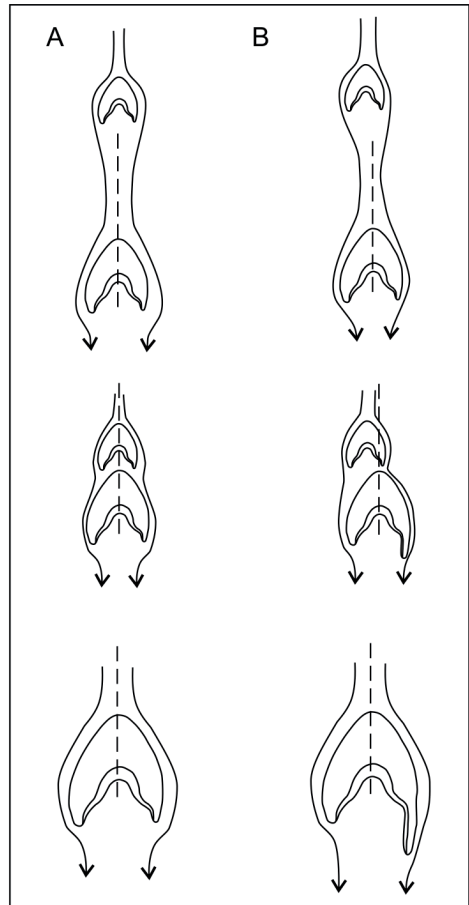
zmienny reżim wiatru, kolizje pomiędzy wydrami lub wzajemne oddziaływanie blisko położonych wydym, rzeźba terenu, niesymetryczna dostawa materiału (Bourke 2010). Może to powodować wydłużanie jednego z ramion wydym (Bagnold 1941, McKee 1966, Noriss 1966) lub nawet transformację w wydmy podłużne (Lancaster 1980, Tsoar 1984).

Za główny czynnik decydujący o sezonowej asymetrii kształtu barchanów, widocznej w postaci wydłużenia jednego z ramion, uważa się bimodalny reżim wiatru (Bagnold 1941). Formy takie występują w obszarach, w których sezonowo kierunek wiatru o mniejszej prędkości odchyła się od kierunku wiatru dominującego nawet do 30° (Tsoar 1984). Ramię położone dalej od wiatru drugorzędne ulega wydłużeniu w sposób charakterystyczny dla rozwoju wydym podłużnych (Tsoar 1978, 1982). Bliższe ramię jest wówczas erodowane. Tego typu asymetria może również powstać przez dość krótkotrwały, lecz o znacznej prędkości, wiatr skośny do osi symetrii barchanu (Bagnold 1941, Lancaster 1980). Można zatem wnioskować, że przy interpretacji asymetrii barchanów, jako wskaźnika sezonowej lub krótkookresowej zmienności kierunku wiatru, należy uwzględniać nie tylko częstość występowania drugorzędne kierunku wiatru, ale i jego siłę. Wyniki badań w tunelu aerodynamicznym wskazują, że w przypadku, gdy prędkość skośnego wiatru tylko nieznacznie przekracza prędkość progową wiatru aktywnego, musi on występować z częstością powyżej 25% aby nastąpiło wydłużenie przeciwległego ramienia (Partelii 2007).

Znacznie rzadszą, choć równie istotną przyczyną asymetrii kształtu barchanów jest kolizja wydym lub ich bliskie występowanie względem siebie (Grolier i in. 1974). Kolizja barchanów zachodzi, gdy mniejsza forma dogania większą. Szczegółowe badania dotyczące znaczenia tego czynnika w asymetrii barchanów prowadzone były głównie w tunelach aerodynamicznych, przy wymuszonym jednym kierunku wiatru (Endo i in. 2004). Wyróżniono dwa przypadki wpływu kolizji wydym na asymetrię barchanów. Gdy mniejsza forma dogania większą i łączy się z nią w obrębie jednego z jej ramion, powoduje jego wydłużenie (ryc. 2). Gdy mniejsza forma dogania większą w jej osi symetrii, powoduje modyfikację przepływu strumienia powietrza od strony dowietrznej. Nawet niewielkie odchylenie położenia małej wydmy od osi symetrii dużej formy powoduje zmianę przepływu kierunku wiatru, skutkującą wydłużeniem się jednego z ramion dużej wydmy (ryc. 3). Gdy wydmy łączą się, objętość wydmy wzrasta, ale przy dominacji jednego kierunku wiatru jej kształt powraca do symetrycznego (Hersen, Douady 2005). W obrębie pola wydymowego łączenie się wydym może powodować wydłużanie się zarówno jednego, jak i drugiego ramienia. Jest to związane z wzajemnym położeniem wydym. Morfologiczne skutki kolizji barchanów nie odzwierciedlają w tym przypadku w zadowalający sposób zmienności kierunku wiatru (Bourke 2010).



Ryc. 2. Kolizja barchanów w obrębie ramion – wzrost asymetrii wydmy.
Fig. 2. Barchans collision within dune – increase in dune asymmetry.



Ryc. 3. Kolizja barchanów w obrębie stoku dowietrznego większej wydmy: (A) w osi symetrii większej wydmy – brak zwiększenia asymetrii, (B) przy odchyleniu od osi symetrii większej wydmy – wzrost asymetrii.
Fig. 3. Barchans collision within windward slope of a larger: (A) along the centraline axis of the larger dune – no increase in dune asymmetry, (B) away from centraline axis of the larger dune – increase in dune asymmetry.

Znaczenie zwiększonej dostawy materiału z jednego kierunku, uznawane za potencjalną przyczynę asymetrii kształtu barchanów analizowane było dotychczas w oparciu o badania prowadzone w tunelach aerodynamicznych. Obszara-

mi, w których najczęściej może dochodzić do asymetrii barchanów są obszary nadmorskie lub obszary w pobliżu dużych pól wydmy, z których zwiększona dostawa materiału powoduje wydłużanie się ramion położonych od strony, z której dostarczana jest większa ilość materiału (Lancaster 1982). W warunkach naturalnych nie potwierdzono dotychczas, że czynnik asymetrycznej dostawy materiału ma istotne znaczenie w zmianie kształtu barchanów (Bourke 2010).

Ostatnim czynnikiem wpływającym na zmianę kształtu barchanów w trakcie ich przemieszczania, w szczególności na asymetrię ich kształtu, jest rzeźba terenu. Wpływ mogą mieć zarówno formy wypukłe (np. ostańce lub grzbiety skalne) jak i wklęsłe (np. doliny suchych rzek) (Long, Sharp 1964). Duży wpływ na asymetrię kształtu barchanów może mieć również nachylenie powierzchni, lecz tylko w przypadku, gdy barchany przemieszczają się równoległe do stoku (Finkel 1959, Gay 1999).

Ramiona barchanów mogą przyjmować kształt podłużny, paciorkowaty lub skręcony. Ramiona podłużne (ang. *linear limbs*) związane są z asymetrią kształtu barchanów wynikającą z wpływu bimodalnego reżimu wiatru, kolizji wydmy lub rzeźby terenu (Bourke 2010). Kształt podłużnego ramienia może wskazywać na częstość i siłę wiatru skośnego, który je tworzył. Według modelu Bagnolda (1941), gdy skośny wiatr występował często, lecz jego prędkość tylko nieznacznie przewyższała krytyczną prędkość poderwania ziarna, ramię będzie się charakteryzowało wyraźną krawędzią. Gdy wiatr ponownie zmieni kierunek na równoległy do osi symetrii, na końcu ramienia znajdującego się po stronie dowietrznej uprzednio skośnego wiatru może utworzyć się język piaszczysty o małej miąższości. Gdy silny, skośny wiatr wystąpi ponownie, materiał budujący język piaszczysty podlegać będzie intensywnej deflacji. Można zatem uznać, że formy typu języków piaszczystych, powstające na końcu ramion, są świadectwem krótkookresowej zmiany kierunku wiatru.

Ramiona o kształcie paciorkowatym (ang. *beaded limbs*) mogą powstawać jako wynik braku stabilizacji materiału akumulowanego w obrębie ramion nawet przy bardzo niewielkiej zmienności kierunku wiatru, nie przekraczającej 20° (Parteli 2007). Mogą tworzyć się również w wyniku jednoczesnego oddziaływania dwóch czynników: kolizji wydmy oraz bimodalnego kierunku wiatru. Charakteryzują się pofalowaną powierzchnią w obrębie stoku dowietrzego ramion, a nawet w obrębie górnej części stoku dowietrzego wydmy (Elbelrihti i in. 2005). Długość fali może dochodzić do około 20m, co może sprzyjać tworzeniu się na końcu ramienia nowej wydmy, która oddziela się od niego i przemieszcza niezależnie od głównej formy (Elbelrihti i in. 2005).

Ramiona skręcone (ang. *kinked limbs*) są charakterystyczne dla barchanów o dużym wydłużeniu jednego z ramion, występujących w obszarach o bimodalnym kierunku wiatru (do 120°), gdy częstość występowania drugorzędowego kierunku wiatru, o prędkości nieznacznie przekraczającej graniczną prędkość po-

derwania ziarna, wynosi około 50% (Parteli 2007). Ramię takie charakteryzuje się wyraźnym stokiem zsympowym. Gdy zmiana przebiegu ramienia jest częsta lub gdy jego kierunek zmienia się znacznie, powstają one najczęściej w wyniku łączenia się i absorpcji innych wydm. Mogą przyjmować postać sinusoidalną lub mieć kształt znaku zapytania. Im dłuższe jest ramię, im liczniejsze są zmiany jego kierunku, tym do jego powstania niezbędne było połączenie się większej liczby wydm (Bourke 2010).

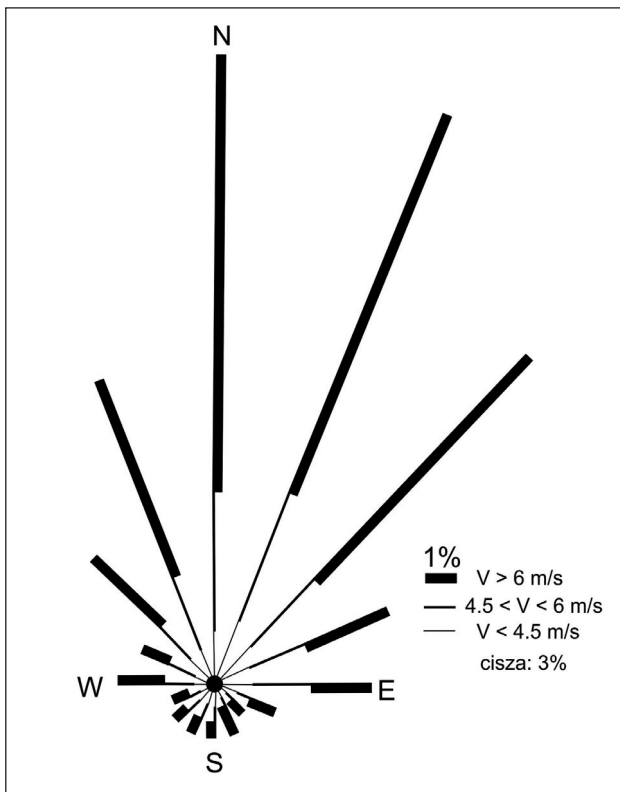
Analiza dostępnych w literaturze wyników badań wskazuje, że najważniejszą cechą asymetrii kształtu barchanów jest niewątpliwie zróżnicowanie długości ich ramion. Dla niektórych, najbardziej asymetrycznych form stosunek długości ramienia do długości stoku dowietrznego może osiągać wartość do 7,5 (Bourke 2010). Związane jest to niewątpliwie z rozwojem takiego ramienia poprzez zasilenie go materiałem pochodzącym z doganiających i łączących się z nim mniejszych wydm. Ramiona te mają na ogół falisty kształt. Drugim czynnikiem uważanym za decydujący o asymetrii barchanów (wydłużeniu jednego z ramion) jest częstość występowania wiatru o kierunku skośnym do osi symetrii wydmy. Im jest on częstszy tym ramię będzie się szybciej wydłużać, doprowadzając w skrajnym przypadku do przekształcenia się barchanu w wydmy podłużną (Tsoar 1984). Kształt ramienia będzie prosty z wyraźnym stokiem dowietrznym oraz zsympowym.

Uważa się, że kształt wydm może być wykorzystywany do określenia wieloletniego, a nawet sezonowego reżimu wiatru w obrębie danego pola wydmy (Bourke 2010). Kształt mniejszych wydm zmienia się szybciej niż większych, może więc być podstawą do analizy zmian reżimu wiatru w krótszym okresie czasu (Kocurek i in. 1992, Werner, Kocurek 1997, Lancaster i in. 2002). Przy analizie reżimu wiatru na podstawie kształtu barchanów należy wykluczyć inne, niż reżim wiatru, wymienione powyżej czynniki mogące powodować asymetrię form. Należy również pamiętać, że na podstawie badań kształtu barchanów analizowany jest reżim wiatru o prędkości powyżej prędkości krytycznej niezbędnej do poderwania ziarna (ok. 6ms^{-1} , mierzony na wysokości 10m nad powierzchnią terenu) (Bagnold 1941). Reżim wiatru o mniejszej prędkości może być bardziej zróżnicowany niż może to wynikać z kształtu barchanów (Bourke 2010).

Dotychczas nieliczne są badania dotyczące możliwości określania krótkookresowej (dobowej) zmienności reżimu wiatru na podstawie analiz kształtu barchanów. Wyniki badań w tunelach aerodynamicznych (Rafkins, Michaels 2003) nie zostały jak do tej pory zweryfikowane w warunkach naturalnych.

METODY I OBSZAR BADAŃ

Badania przeprowadzono w południowym Maroku na Saharze Zachodniej. Obszar badań obejmował część pasa wydmowego o szerokości około 8 km, długości całkowitej 300 km i przebiegu NNE-SSW, ciągnącego się równoległe do wybrzeża Oceanu Atlantyckiego. Badania szczegółowe przeprowadzono w sześciu obszarach położonych na odcinku około 100km, pomiędzy Tarfayą i Laâyoune. Źródło materiału budującego analizowane wydmy znajduje się w obrębie plaż rozciągających się na północny-wschód od Tarfai. Rzeźba tego terenu jest w większości równinna. Podłoże zbudowane jest z osadów formacji Magrebien (Carte Geologique du Maroc 1985). Są to osady morskie, powstałe podczas plioceńskiej transgresji morza, w wyniku której doszło do depozycji materiału z dużym udziałem CaCO_3 (Botte i in. 2002). Największą przeszkodę dla transportowanego przez wiatr materiału stanowi roślinność krzewiasta o wysokości

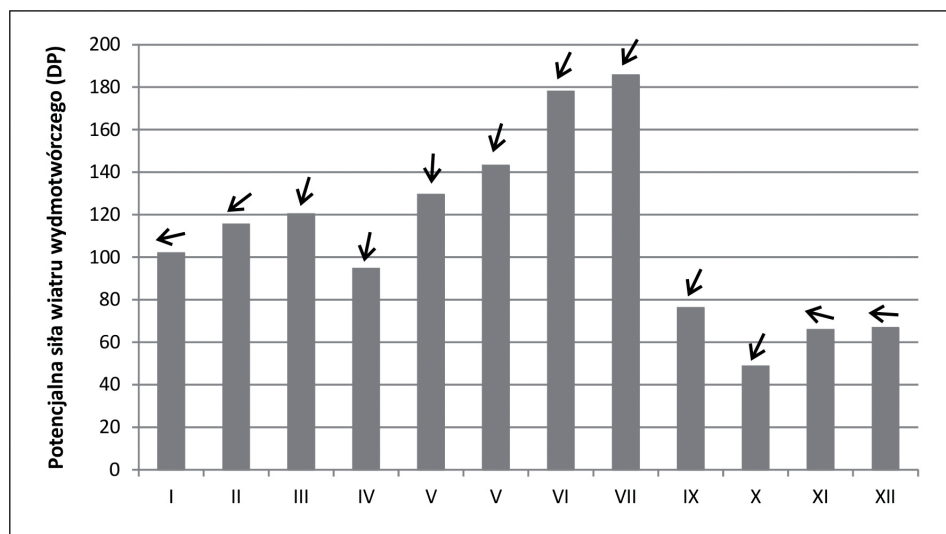


Ryc. 4. Róża wiatru dla stacji meteorologicznej Laâyoune (Sahara Zachodnia) (Ouelehri 1992).

Fig. 4. Wind rose for meteorological station in Laâyoune (Western Sahara) (Ouelehri 1992).

średnio około 0,5m, maksymalnie do 1m. Wymusza ona akumulację materiału, dzięki czemu tworzą się formy typu nebka.

Dominujący wypadkowy kierunek wiatru w obszarze badań to NNE (Ouelehri 1992) (ryc. 4). Uwzględniając współczynniki zaproponowane przez Frybergera (1979) można wyróżnić 2 główne okresy decydujące o przemieszczaniu się wydm w tym regionie (ryc. 5), związane z położeniem Wyżu Azorskiego (Ouelehri 1992). W pierwszym okresie (od połowy kwietnia do września) przemieszczanie wydm osiąga największe wartości (maksimum w lipcu i sierpniu), a wypadkowy kierunek przemieszczania się wydm (RDD) to SSW. Wskaźnik zmienności kierunku wiatru wydmotwórczego RDP/DP w czerwcu, lipcu i sierpniu osiąga wartość powyżej 0,9, a więc według klasyfikacji Frybergera (1979) jest to wiatr wąski jednomodalny. W drugim okresie (od października do połowy kwietnia) wiatr jest zdecydowanie słabszy (minimum w październiku) o wypadkowym kierunku przemieszczania się wydm (RDD) – SW do W (ryc. 5). Wskaźnik RDP/DP w tym okresie wynosi poniżej 0,5 (w listopadzie – 0,15) co świadczy o bardzo dużym zróżnicowaniu kierunku wiatru, w którym przy większym DP, barchany nie mogłyby występować. Roczna potencjalna siła wiatru wydmotwórczego dla stacji meteorologicznej w Laâyoune jest bardzo duża (DP = 1863). Według klasyfikacji Frybergera (1979) obszar ten pod względem możliwości transportu materiału przez wiatr bez wątpliwa zaliczyć należy



Ryc. 5. Miesięczna potencjalna siła (DP) oraz wypadkowy kierunek (RDD) przemieszczania się wydm dla stacji meteorologicznej Laâyoune (Sahara Zachodnia) (Ouelehri 1992).

Fig. 5. Monthly drift potential (DP) and resultant drift direction (RDD) for meteorological station in Laâyoune (Western Sahara) (Ouelehri 1992)

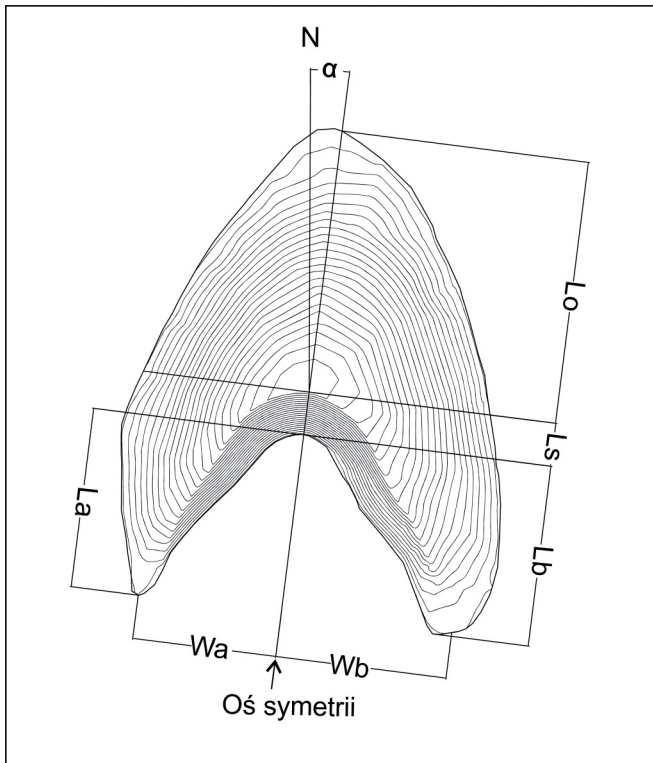
do obszarów wysokoenergetycznych. Potencjalna wypadkowa siła wiatru wydmotwórczego (RDP) wynosi 1231, a wskaźnik rocznej zmienności kierunku wiatru wydmotwórczego (RDP/DP) – 0,66 (Ouelehri 1992). Świadczy to o dużym zróżnicowaniu kierunku wiatru. Według klasyfikacji Frybergera (1979) jest to wiatr jednododalny szeroki. Według Wassona i Hyde'a (1983), przy tak dużym zróżnicowaniu kierunku wiatru, barchany nie powinny powstawać (porównaj ryc. 1).

Kształt barchanów zmierzono dwukrotnie w okresie wiosennym (w 2011 i 2012r.) po sezonie jesienno-zimowym, w którym dominuje dość słaby wiatr z kierunku NE i E (Ouelehri 1992) oraz dwukrotnie w okresie jesiennym (w 2007 i 2011r.) po dominacji w okresie wiosenno-letnim znacznie silniejszego wiatru z kierunku N i NNE (Ouelehri 1992) (ryc. 5). Pomiary uzupełniające przeprowadzono w marcu 2010r. Do badań szczegółowych wybrano formy izolowane, na które w pierwszym okresie badań nie miały wpływu inne formy tj. znajdujące się w odległości większej niż 15 razy wysokość barchanu położonego po stronie dowietrznej badanej wydmy. Taka odległość, według wyników uzyskanych przez Wiggs i in. (1996), wyklucza wzajemny wpływ wydym na ich rozwój. Wybrano wydmy o różnej wysokości, od 1m do 12,50m, tak aby możliwe było sprawdzenie, jak wielkość form wpływa na zmienność kształtu barchanów.

Na podstawie wyników szczegółowych pomiarów 52 barchanów wykonanych GPS RTK (dokładność pomiaru w poziomie i w pionie ± 2 cm) stworzono trójwymiarowe modele form. Następnie obliczono podstawowe cechy morfometryczne barchanów, według zasad zaproponowanych przez Finkel'a (1959) (ryc. 6). Dzięki trójwymiarowym modelom możliwe było również bezpośrednie obliczenie objętości form, jednego z najważniejszych parametrów określających ich wielkość (Saueremann 2000, Biejat 2008).

Trójwymiarowe modele umożliwiły analizę kształtu wydym, w zamian nawiązując do typologii zaproponowanej przez Bourke (2010). Dodatkowo wykonano analizę kształtu stoku dowietrzego określając w szczególności: położenie linii grzbietowej w stosunku do krawędzi wydmy, położenie punktu kulminacyjnego wydmy w stosunku do krawędzi wydmy oraz jej osi symetrii. Przeanalizowano również kształt stoku dowietrzego i ramion w mikroskali (ryc. 7).

Wyniki analizy zróżnicowania kształtu wydym porównano z sezonowym i dobowym reżimem wiatru dla regionu Laâyoune-Tarfaya. Pomiary krótkookresowej (dobowej) zmienności reżimu wiatru wykonywano przed i w czasie pomiarów terenowych, kilka razy w ciągu dnia, na wierzchołku wydmy, skrzydełkowym anemometrem firmy Kestrel, określając jednocześnie za pomocą busoli kierunek wiatru.

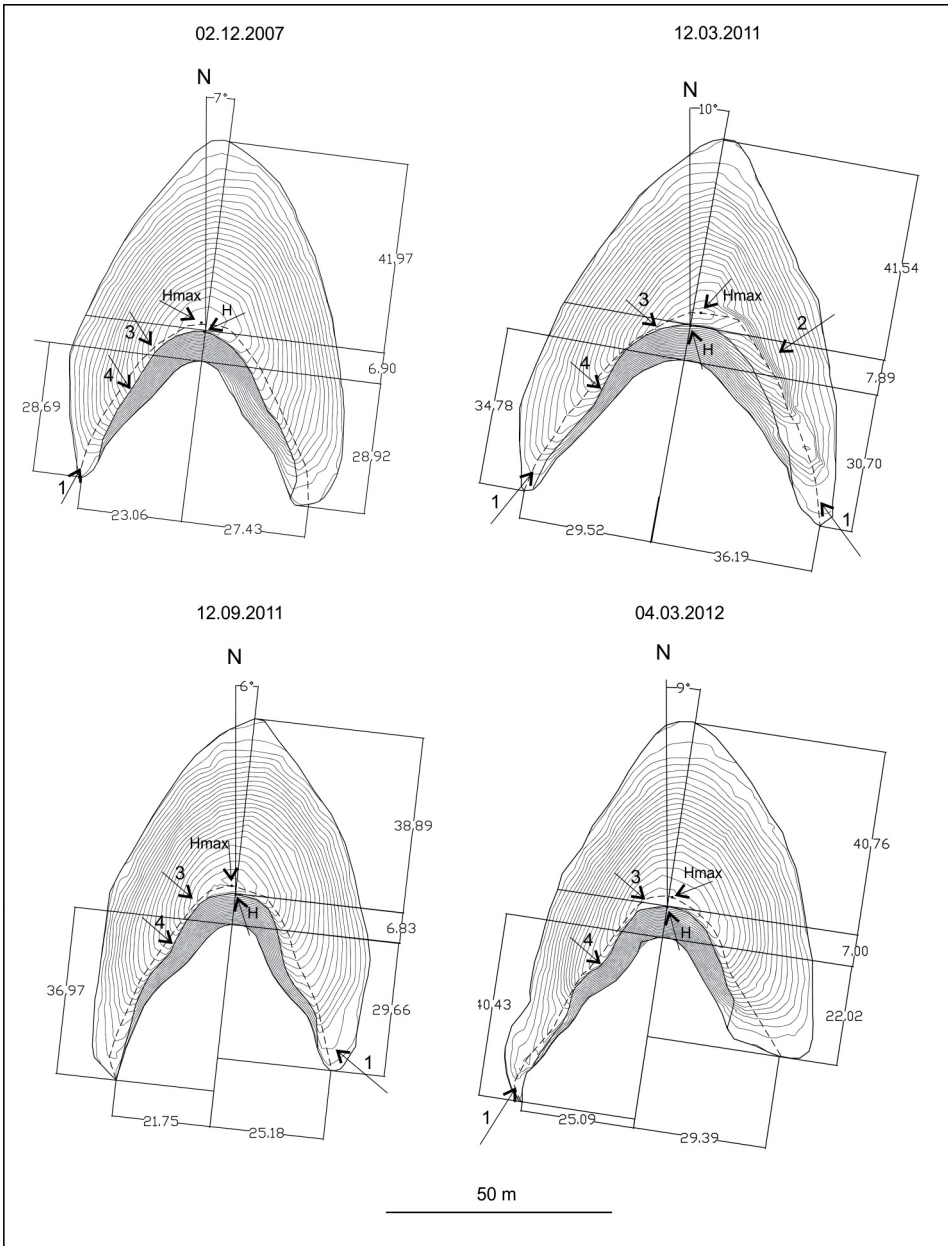


Ryc. 6. Cechy morfometryczne barchanów, wg Finkela (1959), L_o – długość stoku do-wietrznego, L_s – długość stoku zawiętrznego, L_a , L_b – długość ramion, W_a , W_b – roz-piętość ramion, α – odchylenie osi symetrii od północy.

Fig. 6. Morphometrical parameters of barchans according to Finkel (1959), L_o – the length of windward side, L_s – the length of slip face, L_a , L_b – the length of dune horns, W_a , W_b – horns widths, α – centraline axis deviation from the north.

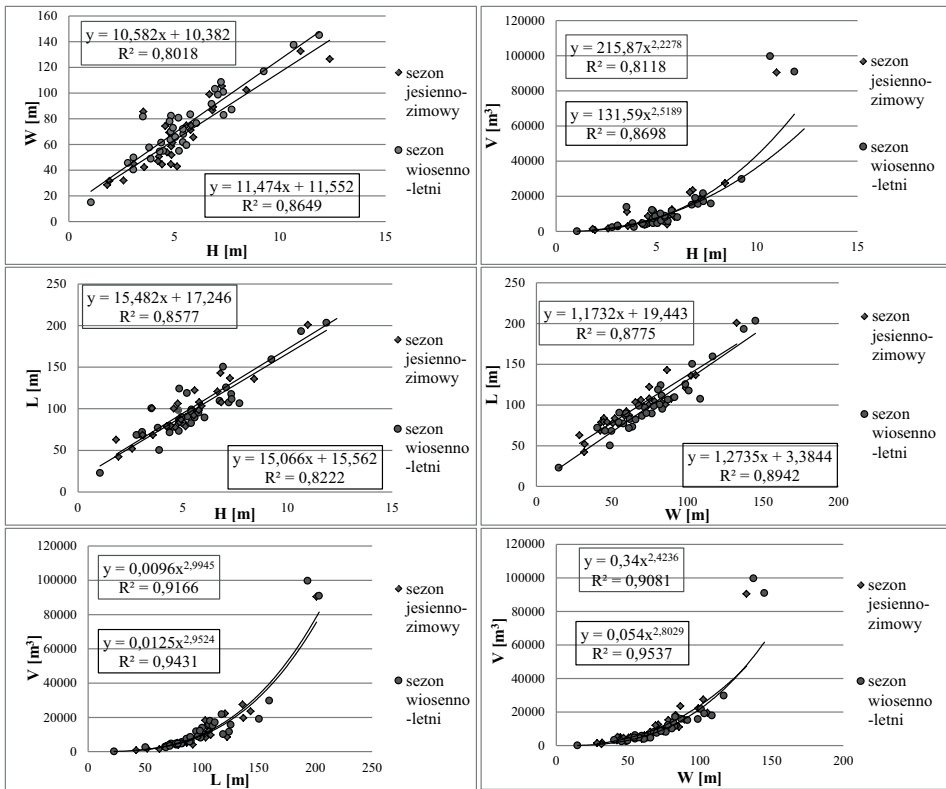
WYNIKI BADAŃ

Barchany występujące na Saharze Zachodniej niezależnie od okresu pomiarowego charakteryzowały się zbliżonymi wartościami określającymi ich podstawowe cechy morfometryczne. Wyniki ich wzajemnych korelacji są satysfakcjonujące pod względem statystycznym (ryc. 8). Współczynnik determinacji R^2 osiąga wartość od 0,80 do 0,95 istotną na poziomie $p > 0,05$. Porównanie wyników analiz cech morfometrycznych dla dwóch odmiennych pod względem reżimu wiatru sezonów nie wykazało istotnej statystycznie zmienności umożliwiającej określenie zróżnicowania asymetrii kształtu barchanów. Uzyskane dla obydwu sezonów wyniki były również porównywalne z wynikami uzyskanymi



Ryc. 7. Zmiana kształtu wybranej formy w poszczególnych okresach badawczych: 1 – „języki” na końcach ramion, 2 – „kołnierze”, 3 – linia grzbietowa, 4 – krawędź, Hmax – punkt kulminacyjny, H – wysokość stoku zawietrzego.

Fig. 7. Change of shape of a selected dune in different study periods: 1 – “tongues” at the end of dune horns, 2 – “collars”, 3 – crestline, 4 – brink, Hmax – dune apex, H – height of the barchan slip face.

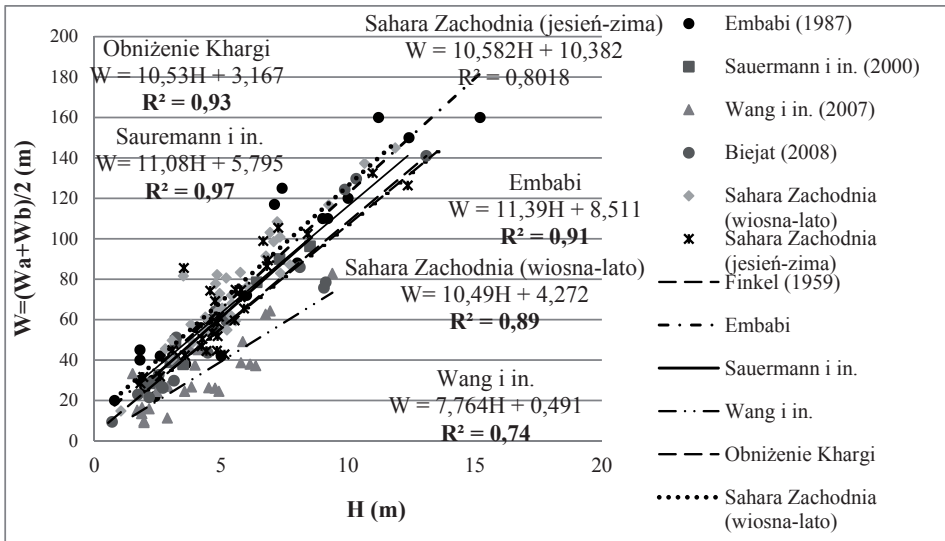


Ryc. 8. Wzajemne zależności podstawowych cech morfometrycznych barchanów: H – wysokość stoku zawietrznego, W – rozpiętość ramion, L – długość całkowita, V – objętość.

Fig. 8. Barchan morphometric relationships: H – height of the barchan slip face, W – horns width, L – dune length, V – dune volume.

dotychczas dla innych pól wydmy (ryc. 9). Można zatem wnioskować, że podstawowe cechy morfometryczne stosowane powszechnie do określenia kształtu barchanów nie mogą być przydatne w określeniu jego zmienności.

Dobrym wskaźnikiem długookresowych zmian reżimu wiatru powinien być stosunek długości ramion (L_a/L_b , porównaj ryc. 6). Wyniki (tab. 1) wskazują na duże zróżnicowanie długości ramion, choć generalnie uzyskane wartości dobrze obrazują zależność asymetrii kształtu ramion od zmienności reżimu wiatru. W sezonie jesienno-zimowym, na skutek dominacji słabego wiatru, lecz o kierunku o odchyleniu wschodnim w stosunku do osi symetrii formy, ramię L_a (zachodnie) wydłuża się szybciej niż ramię L_b (wschodnie). Wartość średnia wskaźnika L_a/L_b wynosi powyżej 1. W sezonie wiosenno-letnim, gdy dominuje silny wiatr z kierunku N (równoległy do osi symetrii) ramiona cechują się podobną długością a średnia wartość wskaźnika zbliża się do 1. W wydmych



Ryc. 9. Zależność wysokości stoku zawietrzego (H) od rozpiętości ramion (W) barchanów występujących w różnych regionach świata.

Fig. 9. Relationship between height of barchans slip face (H) and horns width (W) in different regions of the world.

mierzonych po sezonie jesienno-zimowym znacznie więcej form miało dłuższe ramię La. W wydmach mierzonych po sezonie wiosenno-letnim liczba form mających dłuższe ramię La była prawie taka sama jak liczba form mających dłuższe ramię Lb. Korelacja pomiędzy stosunkiem długości ramion (La/Lb) a wysokością stoku zawietrzego (H) (R^2 od 0,002 do 0,25) i objętością (V) (R^2 od 0,07 do 0,25) form nie jest istotna statystycznie. Należy zatem wnioskować, że zróżnicowanie długości ramion nie jest związane z wielkością formy.

Tab. 1. Wskaźniki zróżnicowania długości ramion barchanów (La/Lb).

Table 1. Indices of horns lengths of barchans (La/Lb)

termin pomiaru		wskaźnik La/Lb		
		min	max	średnia
pomiar po sezonie wiosenno-letnim	12.2007	0,26	2,67	1,08
	09.2011	0,32	1,66	0,99
pomiar po sezonie jesienno-zimowym	03.2011	0,28	2,62	1,13
	03.2012	0,46	4,17	1,48

Stosunek długości dłuższego ramienia do długości stoku dowietrzego wskazuje, że ramiona te nie są bardzo wydłużone (La lub Lb /Lo wynosi średnio

0,84; maksymalnie 1,81, minimalnie 0,25). Są to znacznie mniejsze wartości niż w przypadku barchanów o dużym wydłużeniu jednego z ramion, występujących w innych regionach świata.

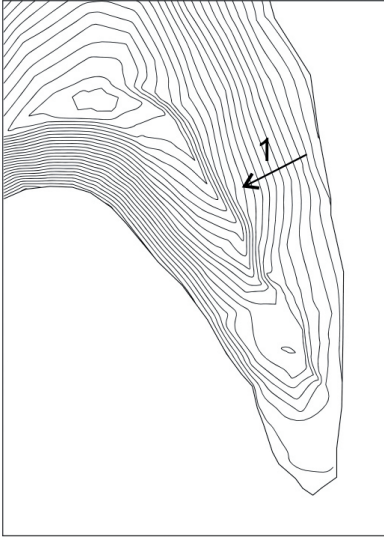
O krótkookresowych zmianach reżimu wiatru świadczą kilka charakterystycznych cech kształtu barchanów. Stwierdzono, że cechy te zmieniają się wraz ze zmianą kierunku wiatru wydmotwórczego już w ciągu kilku dni a nawet godzin.

Gdy drugorzędny kierunek wiatru znacznie (powyżej 90°) odbiega od dominującego kierunku wiatru, barchan staje się istotną przeszkodą dla mas powietrza. Przemierzając się natrafiają one na stok zsypany o nachyleniu ponad 30° . Wiatr ten może być dodatkowo kanalizowany przez ramiona wydmy. Wpływ kilkudniowej lub nawet kilkugodzinnej zmiany kierunku wiatru na przeciwny niż kierunek dominującego wiatru wydmotwórczego o prędkości tylko nieznacznie większej niż prędkość poderwania ziarna ($< 6-8\text{ms}^{-1}$), widoczny jest w postaci powstałego w wyniku depozycji „kołnierza”, tworzącego się wzdłuż krawędzi barchanów na stoku, uznawanym przy dominującym kierunku wiatru, za dowietrzny. Taka forma jest symetryczna względem osi barchanu, gdy kierunek wiatru jest przeciwny do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego lub tworzy się po jednej stronie wydmy, gdy kierunek wiatru jest skośny do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego (ryc. 10). Wysokość względna „kołnierzy” określa czas i siłę drugorzędnego kierunku wiatru.

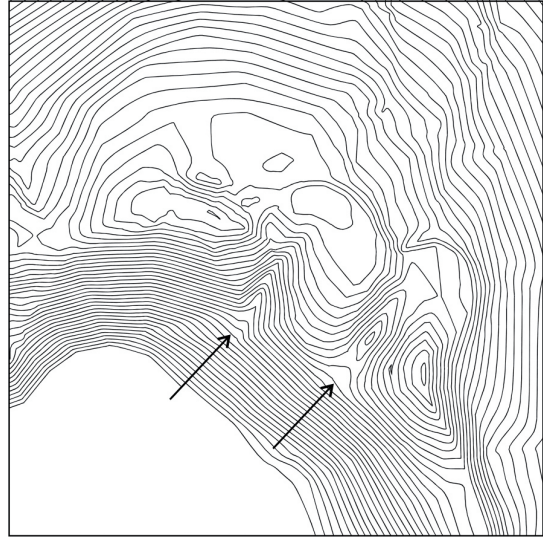
Wiatr przeciwny lub prawie przeciwny, o większej prędkości ($> 6-8\text{ms}^{-1}$), powoduje również erozję krawędzi wydmy. Zmiany widoczne są w postaci podłużnych rozcięć erozyjnych, powstających w pobliżu krawędzi wydmy, w górnej części stoku dowietrzego i ramion (ryc. 11).

„Kołnierze” i rozcięcia erozyjne stwierdzono dwukrotnie w obszarze badań. W marcu 2010 r., gdy pomiary przeprowadzono po 14 godzinnym oddziaływaniu silnego ($8-10,3\text{ms}^{-1}$) wiatru z kierunku W, „kołnierze” powstały wzdłuż krawędzi po wschodniej stronie badanych wydm. Ich wysokość względna wynosiła od 2,5 do 4m! Stwierdzono również występowanie podłużnych nisz erozyjnych o głębokości maksymalnej do 2m rozcinających krawędź wydm. W marcu 2011r. gdy pomiary przeprowadzono po 15 godzinach oddziaływania aktywnego wiatru W i SW o średniej prędkości $6-8,2\text{ms}^{-1}$ również stwierdzono powstanie „kołnierzy” po stronie wschodniej wydm jednak niższych niż w 2010 r. (maks. 1m wysokości względnej) oraz nisze erozyjne o głębokości do 0,8m.

Kolejną cechą kształtu barchanów, którą można uznać za wskaźnikową dla krótkoterminowych zmian reżimu wiatru są „języki” powstające na końcu ramion (ryc. 12). Wskazują one na niewielką (do 30°) zmianę kierunku wiatru w stosunku do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego. Najdłuższe „języki” zanotowano podczas pomiaru wykonanego na początku grudnia 2007 r. (tab. 2), gdy przez 10 dni przed wykonaniem pomiaru, kierunek wiatru odchyłony był od osi symetrii o 20° do 30° ku W. Średnia długość „języków” po stronie

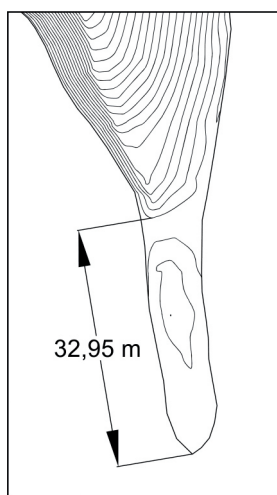


Ryc. 10. „Kołnierz” utworzony wzdłuż zachodniej części krawędzi wybranej wydmy (1 – stok zsypany).
Fig. 10. A “collar” developed along the western part of a crestline of selected dune (1 – slip face).



Ryc. 11. Rozcięcia erozyjne zachodniej części krawędzi wybranej wydmy.
Fig. 11. Erosion patterns within the western part of a crestline of selected dune.

zachodniej była około dwa razy dłuższa niż po stronie wschodniej, choć występowały one równie często na końcu ramienia E i W, niekoniecznie w tej samej wydmy. Potwierdza to zatem dotychczasowe spostrzeżenia, że dłuższe języki powstają od strony dowietrznej drugorzędного kierunku wiatru. W marcu 2011r. w okresie bezpośrednio poprzedzającym pomiar przez ponad 15h utrzymywał się wiatr W i SW ($6-8\text{ms}^{-1}$). Jego znaczne odchylenie od osi symetrii bardzo utrudniało tworzenie się „języków” (tab. 2). Przed tym okresem, przez kilkanaście dni notowano wiatr równoległy do osi symetrii o znacznej prędkości ($8-9\text{ms}^{-1}$, maksymalnie $11,8\text{ms}^{-1}$). We wrześniu 2011r. stwierdzono prawie dwa razy dłuższe i znacznie częściej występujące „języki” po stronie wschodniej (tab. 2). Powstały one na skutek kilkunastodniowego oddziaływania silnego wiatru ($7-9\text{ms}^{-1}$, maksymalnie $11,8\text{ms}^{-1}$) z kierunku NNE (o odchyleniu ku E od osi symetrii wydmy od 10° do 30°). W marcu 2012r. również stwierdzono większą średnią długość „języków” po stronie wschodniej, choć częściej występowały one na końcu ramion zachodnich (tab. 2). Wynikało to z dużej zmienności kierunku wiatru w okresie poprzedzającym pomiar. Wiatr zmieniał wielokrotnie kierunek do 30° od osi symetrii zarówno na E jak i na W. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że „języki” powstające na końcu ramion barchanów są bardzo dobrym wskaźnikiem krótkoterminowej zmienności reżimu wiatru.



Ryc. 12. „Język” utworzony na końcu ramienia wybranego barchanu.

Fig. 12. A “tongue” developed at the end of horn of selected dune.

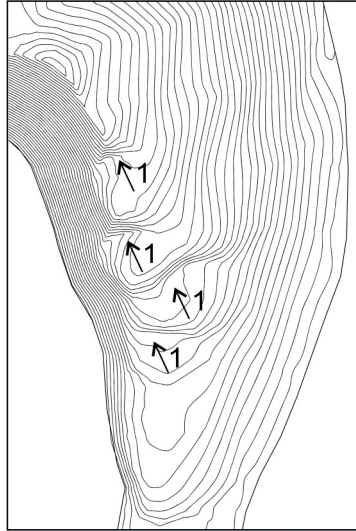
Tab. 2. Liczebność, średnia długość i częstość występowania „języków” w obrębie ramienia zachodniego i wschodniego barchanów.

Table 2. Number, mean length and frequency of “tongues” within the western and eastern horns of barchans.

termin pomiaru	„język”					
	ramię E [szt]	ramię W [szt]	średnia długość E [m]	średnia długość W [m]	ramię E [%]	ramię W [%]
12.2007	10	10	10,8	20,6	29,4	29,4
09.2011	10	4	18,9	10,7	83,3	33,3
03.2011	4	2	9,3	5,8	22,2	11,1
03.2012	6	10	20,4	12,0	42,9	71,4

Za inny, dobry wskaźnik krótkookresowej zmienności reżimu wiatru uważać można ramiona o kształcie paciorkowatym (ang. *beaded limbs*). Charakteryzują się one powstającymi na grzbiecie ramion niewielkimi spłaszczeniami zakończonymi stokiem zsympowym (ryc. 13). Formy takie stwierdzono w obrębie wydm mierzonych w różnych sezonach: w marcu 2011r., wrześniu 2011r. oraz marcu 2012r. Wszystkie okresy poprzedzające pomiar w dłuższym (kilkunastodniowym) wymiarze czasu charakteryzowały się bardzo silnym wiatrem ($7-10\text{ms}^{-1}$, a nawet $11,8\text{ms}^{-1}$), którego odchylenie kierunku od osi symetrii barchanów nie przekraczało $20^{\circ}-30^{\circ}$. Powstałe w obrębie ramion stoki zsympowe o wysokości średnio od 1 do 1,5m miały krawędzie długości od kilku do kilku-

nastu metrów, prostopadłe, lub prawie prostopadłe do krawędzi ramienia i osi symetrii wydmy. Potwierdza to, że ich rozwój we wszystkich wymienionych wyżej okresach związany był z kierunkiem wiatru o niewielkim odchyleniu od dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego. Należy zwrócić uwagę, że mimo dominacji tego kierunku wiatru, lecz o mniejszej prędkości, w innych analizowanych okresach, tego typu formy nie powstały.

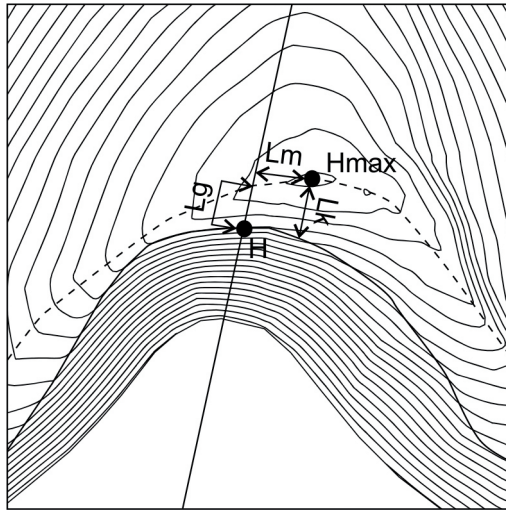


Ryc. 13. Przykład ramienia barchanu o kształcie paciorkowatym (1 – stoki zsypane).
Fig. 13. An example of a beaded horn (1 – slip faces).

W czasie prowadzenia dodatkowych pomiarów w marcu 2010r. w obrębie analizowanych wydm, formy tego typu powstały na stoku dowietrznym. Ich stoki zsypane miały wysokość do 0,7m, a ich krawędź była prawie równoległa do osi symetrii wydmy. Analizując okres poprzedzający wykonanie pomiaru stwierdzono, że w tym czasie w ciągu prawie 20 dni notowano bardzo silny ($8-10\text{ ms}^{-1}$), a często osiągający nawet 15ms^{-1} wiatr z kierunku W i WSW. Można zatem wnioskować, że formy te, powstające zarówno w obrębie grzbietów ramion barchanów, jak i w obrębie ich stoków dowietrznych, nie zawsze są dobrym wskaźnikiem kierunku wiatru, lecz na pewno są świadectwem występowania silnego wiatru o prędkości co najmniej 7ms^{-1} .

Położenie kulminacyjnego punktu wydmy (H_{\max}) (ryc. 14) było również, jak dotychczas, niewykorzystywanym parametrem do oceny krótkookresowej zmienności kierunku wiatru. W analizowanych barchanach punkt ten nie zawsze znajdował się na krawędzi wydmy. Oznacza to, że stok dowietrzny form w części wierzchowinowej nachylony był przeciwnie niż w części środkowej i dolnej. Analiza wyników (tab. 3) wykazała, że położenie tego punktu w sto-

sunku do osi symetrii oraz jego odległość od krawędzi wydmy zależne są od kierunku wiatru, który dominował w ostatnich kilkudziesięciu godzinach przed wykonaniem pomiaru (ryc. 15).



Ryc. 14. Położenie kulminacyjnego punktu wybranej wydmy (H_{max}) oraz linii grzbietowej (linia przerywana): L_k – odległość H_{max} od krawędzi wydmy mierzona równoległe do osi symetrii wydmy, L_m – odległość H_{max} od osi symetrii wydmy, L_g – odległość linii grzbietowej od krawędzi wydmy mierzona wzdłuż osi symetrii, H – wysokość stoku zawietrznego wydmy.

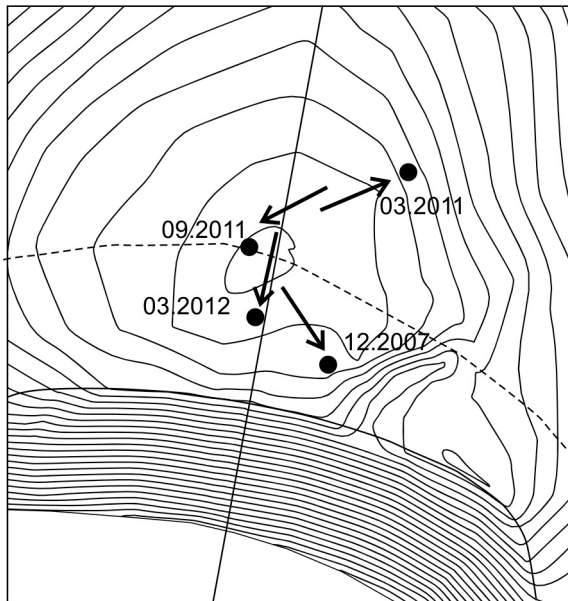
Fig. 14. Location of a dune apex (H_{max}) and crestline (dashed line): L_k – distance between H_{max} and dune brink, measured parallel to the centraline, L_m – distance between H_{max} and the centraline, L_g – distance between the crestline and the dune brink, measured parallel to the centraline, H – height of the barchan slip face.

Tab. 3. Położenie kulminacyjnego punktu (H_{max}) oraz linii grzbietowej barchanów w danym sezonie pomiarowym.

Table 3. Location of an apex (H_{max}) and a crestline of barchans in each of the study periods.

termin pomiaru	odległość H_{max} od krawędzi wydmy (L_k) [m]			odległość H_{max} od osi symetrii wydmy (L_m) [m]			odległość krawędź-grzbiet wydmy (L_g) [m]	
	min	max	średnia	max ku E	max ku W	średnia	max	średnia
12.2007	0	7,52	1,17	9,82	3,08	ku E 1,47	7,52	1,21
09.2011	0	11,49	3,43	1,33	6,9	ku W 0,82	10,89	3,88
03.2011	0,88	16,81	6,00	11,9	9,09	ku E 2,62	16,81	4,04
03.2012	0	7,88	2,28	8,63	10,77	ku W 0,01	8,09	2,06

W grudniu 2007r. średnie położenie punktu znajdowało się po wschodniej stronie od osi symetrii lecz dość blisko od krawędzi, co związane było z oddziaływaniem wiatru NNW. We wrześniu 2011r. punkt ten przemieszczony był średnio nieznacznie ku zachodowi od osi symetrii. Spowodował to wiatr wydymotwórczy z kierunku NNE, który dominował w ciągu kilkunastu dni przed wykonaniem pomiaru. W marcu 2011r. średnie położenie punktu znajdowało się najdalej na wschód od osi symetrii, a jednocześnie najdalej od krawędzi wydmy. Było to spowodowane oddziaływaniem wiatru z kierunku W i SW w ciągu kilku dni przed wykonaniem pomiarów. W marcu 2012r. punkt ten położony był na osi symetrii, gdyż w okresie poprzedzającym pomiar dominował wiatr NNW do NNE, tj. o kierunku wypadkowym zgodnym z kierunkiem osi symetrii badanych barchanów.



Ryc. 15. Wypadkowe położenie kulminacyjnego punktu wydmy (Hmax) w danym sezonie pomiarowym w nawiązaniu do dominującego kierunku wiatru wydymotwórczego w okresie poprzedzającym pomiar.

Fig. 15. Resultant location of apex (Hmax) in a particular study period in reference to the active wind direction prior the measurements.

Korelacja pomiędzy położeniem kulminacyjnego punktu wydmy (Hmax) (odległością od krawędzi wydmy (Lk) i odległością od osi symetrii wydmy (Lm)) a wielkością wydmy (wysokością stoku zawietrznego (H) ($R^2 = 0,02$) i objętością (V) ($R^2 = 0,02$)), nie jest istotna statystycznie. Należy zatem wnioskować, że zmienność położenia najwyższego punktu wydmy nie zależy od wielkości formy.

Położenie grzbietu wydmy w stosunku do krawędzi wydmy (ryc. 14), nie było jak dotychczas przedmiotem licznych analiz w kontekście zmienności reżimu wiatru. Gdy grzbiet wydmy nie pokrywa się z jej krawędzią, stok dowietrzny w części wierzchowinowej jest nachylony przeciwnie niż w części środkowej i dolnej. Uzyskane wyniki wskazują, że na taki kształt wydmy mogą mieć wpływ dwa kierunki wiatru, często o przeciwstawnym zwrocie.

Średnie największe przemieszczenie grzbietu wydmy zanotowano w marcu 2011 r. i wrześniu 2011 r. (tab. 3) przy zdecydowanie różnym reżimie wiatru w okresach poprzedzających pomiary. Jak już wspomniano, w marcu 2011 r. dominował dość silny wiatr z kierunku W i SW. Spowodował on powstanie „kołnierzy” a jednocześnie przemieszczenie linii grzbietowej wydmy w kierunku przeciwnym do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego. We wrześniu 2011 r., w okresie poprzedzającym pomiar, przez kilkanaście dni dominował bardzo silny wiatr NNE. Mimo tego, grzbiet wydmy znajdował się w podobnym położeniu w stosunku do krawędzi wydmy co w marcu 2011 r. Należy zatem uznać, że położenie linii grzbietowej nie jest dobrym wskaźnikiem krótkookresowej zmienności reżimu wiatru.

Analiza wyników zależności pomiędzy odległością linii grzbietowej od linii krawędzi wydmy (L_g) a wysokością stoku zawietrzanego (H) i objętością (V) wydmy nie potwierdziła dotychczas prezentowanej w literaturze hipotezy, że położenie linii grzbietowej w stosunku do linii krawędzi wydmy jest związane z wielkością formy. Współczynniki determinacji dla zależności pomiędzy L_g a H ($R^2 = 0,16$) i L_g a V ($R^2 = 0,20$) wskazują, że zależności te nie są istotne statystycznie.

Dokładne określenie mechanizmu zmiany położenia linii grzbietowej wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, być może nie tylko terenowych, lecz także w tunelu aerodynamicznym. Wydaje się, że zmiany te uzależnione są głównie od prędkości wiatru, która wpływa na miąższość warstwy turbulencyjnej, a tym samym na siłę poderwania ziarna. W rozważaniach nie można jednak wykluczyć również powiązania siły podrywającej ziarno z zależnością przepływu powietrza od, nawet nieznacznego, zróżnicowania kształtu stoku dowietrzego barchanów.

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że dotychczas analizowane powszechnie podstawowe cechy morfometryczne barchanów, jak również wyniki ich wzajemnych korelacji, nie są dobrymi wskaźnikami umożliwiającymi ocenę zarówno krótko- jak i długookresowej zmienności reżimu wiatru. Badania krótkookresowej zmienności reżimu wiatru na podstawie kształtu barchanów możliwe są wyłącznie w oparciu o dokładne, trójwymiarowe modele

tych form. Na podstawie modeli możliwe jest określenie cech wskaźnikowych, pozwalających bardzo precyzyjnie wyznaczyć kierunek wiatru wydmotwórczego, który decydował o morfodynamice barchanów w kilku lub kilkunastu dniach, a niekiedy nawet kilkunastu godzinach przed danym pomiarem.

Świadectwem długookresowych (sezonowych) zmian kierunku wiatru jest zróżnicowana długość ramion barchanów. Badania wykazały, że wskaźnik ten nie zawsze jest wiarygodny. Mimo wyboru wydm izolowanych, występujących na płaskim podłożu, formy o podobnej wysokości i objętości miały w danym okresie pomiarowym, na danym obszarze dłuższe zarówno ramiona dowietrzne jak i zawietrzne w stosunku do drugorzędnego kierunku wiatru wydmotwórczego. Mimo tego można jednak uznać, że średnia wartość wskaźnika określającego wzajemny stosunek długości ramion barchanów w całym analizowanym obszarze dość dobrze wyraża sezonową zmienność reżimu wiatru. Zgodnie z dotychczas publikowanymi wynikami, na duże zróżnicowanie asymetrii kształtu barchanów w badanym obszarze mogło mieć również wpływ łączenie się wydm. Proces ten mógł się odbyć znacznie wcześniej niż można to było stwierdzić na podstawie dostępnych obrazów satelitarnych.

Świadectwem krótkookresowych (dobowych) zmian kierunku wiatru są:

1. „Kołnierze” powstające wzdłuż krawędzi wydmy, wskazujące na znaczną (powyżej 90°) zmianę kierunku wiatru w stosunku do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego. Ich wysokość określa czas i siłę oddziaływania tego kierunku wiatru.
2. „Języki” powstające na końcu ramion wydmy, wskazujące na niewielką (do 30°) zmianę kierunku wiatru w stosunku do dominującego kierunku wiatru wydmotwórczego.
3. Ramiona o kształcie „paciorkowatym” (ang. *beaded limbs*), świadczące o występowaniu bardzo silnego wiatru. Są one dobrym wskaźnikiem kierunku wiatru, lecz wyłącznie, gdy jego prędkość wynosi powyżej $7\text{--}8\text{ ms}^{-1}$, a więc znacznie powyżej wartości progowej dla wiatru wydmotwórczego. Gdy wiatr ma mniejszą prędkość, formy te nie powstaną. W trakcie pomiarów prowadzonych na Saharze Zachodniej nie stwierdzono występowania innego typu ramion.
4. Położenie kulminacyjnego punktu wydmy, wskazujące na kierunek wiatru wydmotwórczego dominujący w ciągu kilku dni lub nawet kilkunastu godzin przed dokonaniem pomiaru. Zależność tej cechy od zmienności kierunku wiatru potwierdzona została we wszystkich analizowanych okresach badań.

Uzyskane wyniki wskazują, że położenie grzbietu wydmy w stosunku do krawędzi wydmy nie jest dobrym wskaźnikiem, zarówno kierunku jak i prędkości wiatru wydmotwórczego.

Analiza kształtu barchanów, przeprowadzona w różnych sezonach wykazała, że nawet w kilkumiesięcznym okresie, charakteryzującym się bardzo dużą zmiennością reżimu wiatru, formy te zachowują swój podstawowy kształt. Można zatem wnioskować, że uzależnianie możliwości rozwoju barchanów wyłącznie od reżimu wiatru wydaje się być dużym uproszczeniem.

Literatura

- Allen J.R.L., 1984, *Sedimentary Structures, their character and physical basis*. Elsevier, Amsterdam.
- Bagnold R.A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 1-265.
- Beadnell H. J. L., 1910, The sand-dunes of Libyan desert, *Geogr. J.* 35, 379-395.
- Biejat K., 2008, Cechy metryczne barchanów Sahary Zachodniej i obniżenia Khargi, [w:] W. Florek, J. Kaczmarzyk (red.), *Landform Analysis* 9, SGP, 179-182.
- Botte E., Kohil A., Sellam S., 2002, Land resources of the province Ben Slimane, Morocco, 21st Course professional Master Remote Sensing and Natural Resources Evaluation, Rabat.
- Bourke M., 2010, Barchan dune asymmetry: Observations from Mars and Earth, *Icarus* 205, 183-197.
- Carte Geologique du Maroc, 1:1 000 000, 1985, Ministere de l'Energie et des Mines, Direction de la Geologie.
- Cooke R, Warren A., Goudie A., 1993, *Desert Geomorphology*, UCL Press, London, 1-526.
- Cornish V., 1914, *Waves of Sand and Snow and the Eddies Which Make Them*, T. Fisher, Unwin, London, 1-377.
- Coursin A., 1964, Observations et experiences faites en avril et mai 1956 sur les barkhanes du Souchel ei Abiodh (region est de Port-Etienne), *Inst. Fr. Afr., Noire Bull*, 26A, 989-1022.
- Daniell J., Hughes M., 2007, The morphology of barchan-shaped sand banks from western Torres Strait, northern Australia, *Sedimentary Geology* 202, 638-652.
- Dłużewski M., 2002, Rozprzestrzenianie się pól wydmych jako efekt pustynnienia północnego obrzeżenia Sahary (na przykładzie okolic Szottu El Dżerid – południowa Tunezja), [w:] L. Andrzejewski, P. Molewski (red.), *Geografia XXXII, Acta Universitatis Nicolai Copernici, Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, Zeszyt 109*, Toruń, 57-68.
- Edgett K.S., Malin, M.C., 2000, MGS MOC Images of Seif Dunes in the North Polar Region of Mars, *Lunar Planet. Inst. Conf.* 31, 1070.
- Elbelrhiti H., Claudin P., Andreotti B., 2005, Field evidence for surface-wave induced instability of sand dunes, *Nature* 437, 720-723.
- Embabi N. S., 1982, Barchans of Kharga Depression, [w:] F. El Baz, T.A. Maxwell (red.), *Desert landforms of Southwest Egypt: A basis for comparison with Mars*, NASA, 141-155.
- Endo N., Taniguchi, K., Katsuki A., 2004, Observation of the whole process of interaction between barchans by flume experiments, *Geophys. Res. Lett.* 31, 12503.

- Finkel H. J., 1959, The barchans of Southern Peru, *Jour. Geol.*, 67, n. 6, 614–647.
- 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.
- Gay P. S., 1999, Observations regarding the movement of barchan sand dunes in the Nazca to Tanaca area of southern Peru, *Geomorphology* 27, 279–293.
- Glenn M., 1979, *A Study of Global Sand Seas*, Geol Surv. Prof. Pap 1052, 399–407.
- Grolier M.J., Ericksen, G.E., McCauley, J.F., Morris, E.C., 1974, *The Desert Landforms of Peru: A Preliminary Photographic Atlas*, USGS, Flagstaff, 1–146.
- Hastenrath R.L., 1967, The barchans of the Arequipa region, southern Peru, *Z. Geomorphology* 11 (3), 300–331.
- Hastenrath R.L., 1978, *Mapping and Surveying – Dune shape and multiannual displacement*, [w:] H. Lettau, K. Lettau (red.), *Exploring the World's Driest Climate*, Centre for Climatic Research IES, Report 101, 74–88 .
- Hastings K., 1994, *The Dynamics of Barchans and Dome Dunes, Namib Desert*, Namibia, M.Sc. Thesis, Department of Geography, University of Wollongong, N.S.W., 1–147.
- Hersen P., Douady, S., 2005, Collision of barchan dunes as a mechanism of size regulation, *Geophysical Research Letters* 32 (L21403), 1–5.
- Hesp P.A., Hastings K., 1998, Width, height and slope relationships and areodynamic maintenance of barchans, *Geomorphology* 22, 193–204.
- Howard A.D., Morton J.B., Gad-El-Hak M., Pierce D.B., 1978, Sand transport model of barchan dune equilibrium, *Sedimentology* 25, 307–338.
- Kroy K., Sauermaun G., Herrmann H.J., 2002, A minimal model for sand dunes, *Phys. Rev. Lett.* 88.
- Kocurek G., Townsley M., Yeh E., Havholm K., Sweet M.L., 1992, Dune and dune field development on Padre Island Texas, with implications for interdune deposition and water-table-controlled accumulation, *J. Sediment. Petrol.* 62, 622–635.
- Lancaster N., 1980, The formation of seif dunes from barchans-supporting evidence for Bagnold's model from the Namib Desert, *Z. Geomorphol.* 24, 160–167.
- Lancaster N., 1982, Dunes on the Skeleton Coast, Namibia (south west Africa): Geomorphology and grain size relationships, *Earth Surf. Proc. Land.* 7, 575–587.
- Lancaster N., 1989, Star dunes, *Prog. Phys. Geogr.* 13, 67–91.
- Lancaster N., Kocurek G., Singhvi A., Pandey V., Deynoux M., Ghienne J., Lo K., 2002, Late Pleistocene and Holocene dune activity and wind regimes in the western Sahara Desert of Mauritania, *Geology* 30, 991–994.
- Lettau, K., Lettau, H., 1969, Bulk transport of sand by the barchans of the Pampa de La Joya in Southern Peru, *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 13-2, 182–195.
- Lettau K, Lettau H.H, 1978, Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration, [w:] K. Lettau, H.H. Lettau (red.), *Exploring the world's driest climate*, University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental studies, IES report 101, 110–147.
- Livingstone I., 1989, Monitoring surface changes on a Namib linear dune. *Earth Surf. Process. Landf.* 14, 318–332.
- Long J.T., Sharp R.P., 1964, Barchan-dune movement in Imperial Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 75, 149–156.

- Maxwell T.A., 1982, Sand sheets and log deposits in the southwestern desert, [w:] F. El-Baz, T.A. Maxwell (red.), Desert Landforms of Southwest Egypt, Nasa CR-3611, Washington, 157–173.
- McKee E.D., 1966, Structures of dunes at White Sands National Monument, New Mexico and a comparison with structures of dunes from other selected areas, *Sedimentology* 7, 1–60.
- Norris R.M., 1966, Barchan dunes of Imperial Valley, California, *J. Geol.* 74, 292–306.
- Oulehri T., 1992, Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la région de Laâyoune, Nord du Sahara Marocain, PhD thesis, l'Université Paris 6, Paris, no. 92-12.
- Parteli E.J., 2007, Sand dune on Mars and Earth, PhD Thesis, Institut für Computerphysik, Universität Stuttgart, 1-171 .
- Radebaugh J., Lorenz R., Farr T., Paillou P., Savage C., Spencer C., 2010, Linear dunes on Titan and earth: Initial remote sensing comparisons, *Geomorphology* 121, 122-123 .
- Rafkin S.C.R., Michaels T.I., 2003, Meteorological predictions for 2003 Mars Exploration Rover high-priority landing sites, *J. Geophys. Res. (Planets)* 108.
- Sarnthein M., Walger E., 1974, Der aolische Sandstrom aus der W-Sahara zur Atlantikküste, *Geologische Rundschau* 63, 1065–1087.
- Sauermann G., Rognon P., Poliakov A., Herrmann H.J., 2000, The shape of the barchan dunes of Southern Morocco, *Geomorphology* 36, 47–62.
- Slattery M.C., 1990, Barchan migration on the Kuiseb river delta, Namibia, *S. Afr. Geogr. J.* 72, 5–10.
- Thomas, D.S., 1992, Desert dune activity: concepts and significance, *J. Arid Environ.* 22, 31–38.
- Tsoar H., 1974, Desert dunes morphology and dynamics, El-Arish (Northern Sinai), *Z. Geomorph., Suppl. BD.* 20, 41-61.
- Tsoar H., 1978, The Dynamics of Longitudinal Dunes. Final Technical Report, US Army, European Research Office, London.
- Tsoar H., 1982, Internal structure and surface geometry of longitudinal (seif) dunes. *J. Sediment. Petrol.* 52, 823–831.
- Tsoar H., 1984, The formation of seif dunes from barchans – A discussion. *Z. Geomorphol.* 28, 99–103.
- Wasson R.J., Hyde R., 1983, Factors determining desert dune type, *Nature* 304, 227–257.
- Werner B.T., Kocurek, G., 1997, Bed-form dynamics: Does the tail wag the dog? *Geology* 25, 771–774.
- Wiggs G.F.S., Livingstone I., Warren A., 1996, The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements, *Geomorphology* 17, 29–46.
- Wippermann F.K., Gross G., 1986, The wind-included sharpening and migration of an insolated dune: a numerical experiment, *Boundary Layer Meteorol.* 36, 319-334.