

جيومورفولوجية بحر رمال الفرافرة

د. معوض بدوى معوض*

الملخص :

تهدف الدراسة الحالية إلى دراسة الأشكال الرملية الرئيسية في بحر رمال الفرافرة. وقدمت الدراسة تحليلاً لخصائص الأشكال الرملية في بحر رمال الفرافرة لمعرفة سماتها الجيومورفولوجية العامة، وإلقاء الضوء على العوامل التي ساعدت على تكوينها، فضلاً عن إستنتاج المصادر الرئيسية للرمال. وقد صنفت الدراسة الكثبان الرملية في بحر رمال الفرافرة وفقاً للظروف البيئية السائدة إلى كثبان نشطة حديثة، وأخرى ثابتة متماسكة الحبيبات. أما من حيث التصنيف المورفولوجي والتوزيع الجغرافي فتسود الكثبان الهلالية البسيطة على هوامش بحر الرمال بوجه عام، بينما يتميز بحر رمال الفرافرة بسيادة الكثبان المركبة والمعقدة والتي تعكس ترتيب مكاني مميز يتمثل في مجموعة من النطاقات الطولية أو الأترع. ومن خلال الدراسة تبين أن الذراع القديمة في بحر رمال الفرافرة قد تكونت بفعل الرياح الشديدة أبان الفترات الجليدية منذ ٣٥-٢٨ ألف سنة مضت، ثم تعاقبت عليها دورات من الرطوبة والجفاف منذ نهاية البلايستوسين وحتى وسط الهولوسين. أخيراً قدمت الدراسة مناقشة لأهم العوامل التي ساهمت في نشأة بحر رمال الفرافرة، وكذلك المصدر الرئيسي للرمال ممثلاً في رواسب مجارى الأودية المحلية القديمة التي تتحدر من حواف المنخفض كما أظهر تحليل الصور الفضائية والدراسات الميدانية. علاوة ذلك يتلقى بحر رمال الفرافرة قدراً من الرمال التي تصل إلى منخفض الفرافرة من مصادر أخرى تقع خارج حدوده، خاصة من جهة الشمال والشمال الشرقي.

الكلمات الإفتتاحية : منخفض الفرافرة، الصحراء الغربية لمصر، بحر رمال الفرافرة، الذراع البلايستوسينية.

المقدمة :

تعد الأشكال الرملية - بصفة عامة - أهم الأشكال الناتجة عن فعل الرياح، إذ يتطلب تكوينها وجود مصدر وفير للرمال مع نظام من الرياح به نسبة من الهبوب يمكن أن تقوم بتذرية الرمال، وندرة الغطاء النباتي، وجفاف السطح. وتعد ظروف الجفاف الحالية التي طرأت على مناخ بعض من أقاليم سطح الأرض منذ نهاية ذروة آخر فترة جليدية (~ ٢٠ - ١٨ ألف سنة) مضت ظروفاً مثالية لإنتشار الكثبان في الأقاليم الجافة على وجه الخصوص، فضلاً عن إنتشارها في بعض المناطق والبيئات الساحلية.

* استاذ الجغرافيا الطبيعية المساعد، قسم الجغرافيا، كلية الآداب - جامعة عين شمس.

وتهدف الدراسة الحالية إلى دراسة الأشكال الرملية الرئيسية في بحر رمال الفرافرة لمعرفة سماتها الجيومورفولوجية العامة، وإلقاء الضوء على العوامل التي ساعدت على تكوين بحر رمال الفرافرة، ودراسة مصادر الإمداد بالرمال.

أولاً - موقع وحدود بحر رمال الفرافرة :

يقع منخفض الفرافرة في الجزء الأوسط من الصحراء الغربية بين دائرتي عرض 25° و $25^{\circ} 27'$ شمالاً وبين خطي طول $20^{\circ} 27'$ و $29^{\circ} 29'$ شرقاً (شكل ١). ويمتد المنخفض من الشرق للغرب لمسافة تتراوح بين ٩٥ كم عند دائرة عرض 27° ، و ١٢٥ كم عند دائرة عرض 26° ، كما يمتد من الشمال للجنوب لمسافة قدرها ٢٨٧ كم. ويغطي المنخفض مساحة قدرها $18,343$ كم^٢ تقريباً (لم يؤخذ في الحسبان مساحة منخفض عين دالة)، ويعد بذلك منخفض الفرافرة ثاني أكبر منخفضات الصحراء الغربية في مصر بعد منخفض القطارة البالغ مساحته حوالي ٤٥ ألف كم^٢ تقريباً (Embabi, 2004).

وتغطي الأشكال الرملية المختلفة مساحة قدرها $11,282$ كم^٢ من قاع المنخفض والمعروفة ببحر رمال الفرافرة. ويضم البحر بداخله مجموعة متنوعة من الأشكال الرملية مثل النباك والفرشات الرملية والكثبان الرملية الهلالية والطولية والمعقدة، علاوة على بقايا الكثبان القديمة. وتنتظم الكثبان الرملية داخل بحر رمال الفرافرة في عدة نطاقات رئيسية تتجه بصفة عامة من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي بمتوسط إنحراف قدره 335° عن الشمال. ويوضح تحليل الخرائط الطبوغرافية مقياس ١ : ١٠٠,٠٠٠ أن بحر رمال الفرافرة يمتد جنوباً بداخل منخفض الداخلة، حيث تهبط الكثبان الرملية عبر الحافة الشمالية لمنخفض الداخلة عند مواضع بعينها، هي على الترتيب من الشرق إلى الغرب: وادي البطيخ وتنيذة والراشدة والقصر وإلى الشرق قليلاً من غرب الموهوب. بذلك يمكن تقسيم هذا البحر الرمي إلى قسمين: يقع القسم الشمالي في منخفض الفرافرة، ويقع القسم الجنوبي في منخفض الداخلة (Embabi, 1998)، غير أن الدراسة الحالية ستقتصر فقط على الجزء الواقع داخل منخفض الفرافرة.

ثانياً - السمات الطبيعية لمنطقة الدراسة :

يوضح تحليل الخريطة الجيولوجية مقياس ١ : ٥٠٠,٠٠٠ (CONCO Coral 1987) أن منخفض الفرافرة قد نشأ في الصخور الطباشيرية (تكوين خومان) والتي ترجع إلى الكريتاسي الأعلى، وتتشكل حواف المنخفض من الصخور الطباشيرية والجيرية الطباشيرية يتخللها طبقات من المارل (تكوين طروان)، ثم يعلوها طبقات من الطفل والحجر الجيري (تكوين إسنا) والذي يرجع إلى

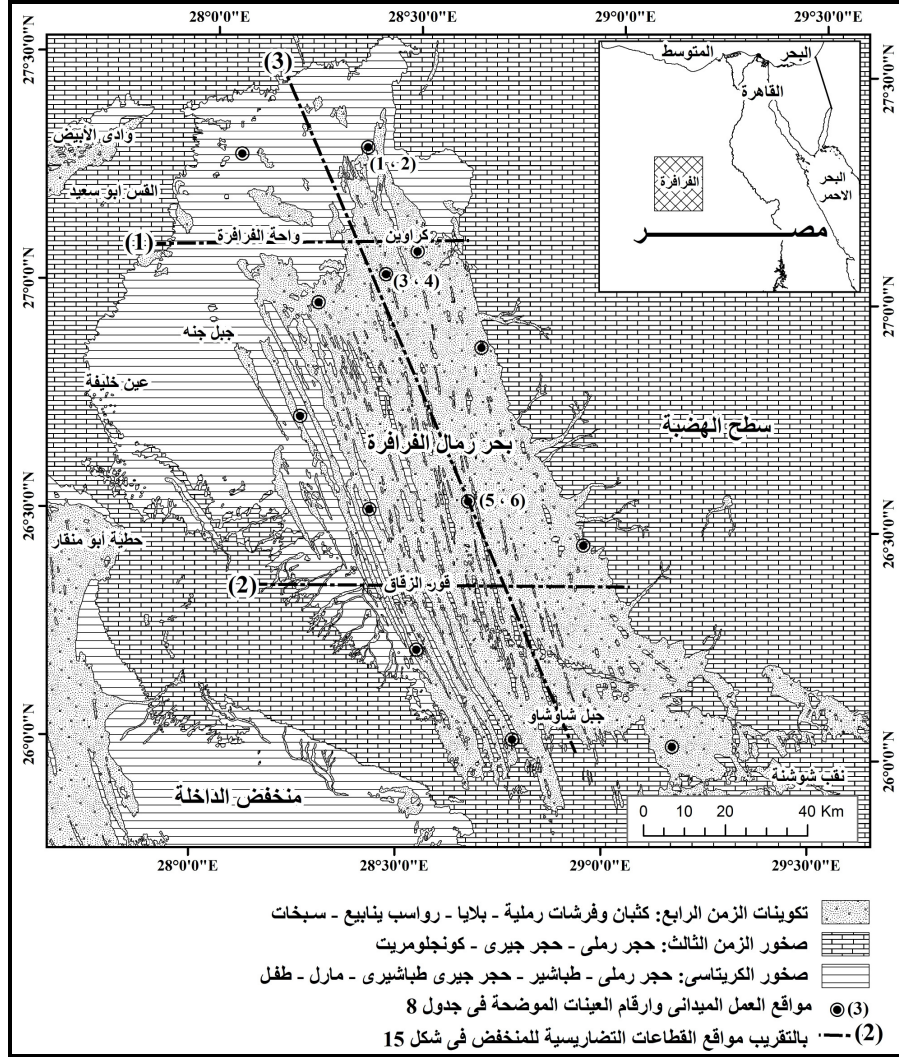
الباليوسين. أما قاع المنخفض فيتكون من مفتتات ورواسب الطباشير والحجر الجيري الذى تتكون منه الصحراء البيضاء، فضلا عن السهول الحصوية والكثبان والسهول الرملية مثل سهل كراوين وسهل البركة، ويقايا السهول الطينية ورواسب الطوفا الجيرية، وكذلك عروق الجبس والكالسيت التى تظهر موضعيا فوق قاع المنخفض. كما يظهر الأساس الصخرى فى بعض مواضع بين نطاقات الكثبان الرملية.

ويمثل منخفض الفرافرة نوعا من الطبوغرافية المعكوسة، حيث يشغل موضع محدب المقفى، وهو أحد المحدبات التى تأثرت بها منطقة الدراسة نتيجة لحركة الرفع اللارامية التى حدثت خلال الكريتاسى الأعلى واستمرت حتى بداية الزمن الثالث، ونتج عنها بروز سلسلة من الطيات المعروفة بنظام الأواس السورية (Said, 1962). ويحد المنخفض مجموعة من الصدوع الرئيسية من الشمال على طول إمتداد وادى الأبيض وتتراوح إتجاهاتها بين $45^\circ - 67,5^\circ$. كما تمتد الحافة الغربية للمنخفض على طول صدع رئيسى يمتد من رأس المثلث من أقصى الجنوب الشرقى عند أبو جرارة ($29^\circ 56' E$ و $25^\circ 57' N$) لينحرف ناحية الشمال الغربى مارا بقور الزقاق ($28^\circ 30' E$ و $26^\circ 17' N$) الواقعة على درب الجمال الواصل بين الواحات الفرافرة والداخلة، لينحرف بعدها خط الصدع الرئيسى شمالا ليمثل الحافة الشرقية لقارة العزة.

ويوضح تحليل الخرائط الطبوغرافية مقياس 1:100,000 (الهيئة المصرية العامة للمساحة 1987-1989) أن منخفض الفرافرة يحده ثلاث حافات واضحة المعالم تجعله يبدو كمنخفض مغلق على شكل مثلث مقلوب قاعدته إلى الشمال ورأسه فى الجنوب. وتشير زاويته الشرقية إلى منخفض البحرية، بينما تشير زاويته الغربية إلى ما يسمى بالواحات الخربة (سترة والبحرين والعرج)، أما رأس المثلث الجنوبية فتشير إلى منخفض الخارجة. ويتضح من فحص الخرائط الطبوغرافية مقياس 1:25000 (الهيئة العامة لاستصلاح الأراضى، إدارة المساحة، 1986) أن أخفض نقطة فى المنخفض تقع على منسوب 21 مترا فوق منسوب سطح البحر شرقا من بئر بدنى على مسافة 6 كم من الطريق المؤدى إلى الواحات البحرية ($28^\circ 10' E$ و $21^\circ 06' N$). أما فى الجنوب فيرتفع قاع المنخفض لأكثر من 400 مترا فوق منسوب سطح البحر، كما ترتفع بعض القمم نحو 560 مترا فوق منسوب سطح البحر. بذلك يمكن تقدير عمق المنخفض بنحو 429 مترا مع إنحدار قاعه من الجنوب إلى الشمال، بمعدل إنحدار عام يصل إلى م / 2,1 كم.

أما عن الظروف المناخية فيتراوح المتوسط الشهرى لدرجات الحرارة فى محطة الفرافرة بين $37^\circ - 40^\circ$ ، ويكاد يكون المطر منعدما طوال العام، إذ لا يزيد المتوسط السنوى للأمطار عن 2,8 مم فى محطة الفرافرة تسقط معظمها فى شهر فبراير. لذلك تنسم المنطقة بسيادة ظروف الجفاف الشديد، ويتضح ذلك من خلال العلاقة بين متوسط التساقط الشهرى P فى الفترة من 1951-1980 والتبخر

نتح PET المحسوب من المتوسطات الشهرية لدرجات الحرارة طوال ساعات النهار لنفس الفترة وفقا لمعامل الجفاف (UNEP, 1997).



شكل (1) : موقع وجيولوجية منطقة الدراسة.

المصدر: الخريطة الجيولوجية لوحة الفرافرة مقياس 1:500,000 كونكو كورال، 1987.

أما عن نظم الرياح يوضح جدول (1) النسب المئوية لهبوب الرياح المؤثرة في حركة الرمال في منخفض الفرافرة بداية من السرعة الحدية 11 عقدة للرمال ذات الحجم 0,25-1,25 (Fryberger, 1979). ونستنتج من هذا الجدول سيادة فئة السرعة التي تتراوح بين 11-16 عقدة، مع سيادة الشماليات بصفة عامة بنسبة 85,5%. بينما في المقابل تتخفف بشدة نسب هبوب الرياح الغربية والشرقية بنسبة 4,45 و 0,66% على الترتيب.

جدول (1) : نسب هبوب الرياح المؤثرة في حركة الرمال في منخفض الفرافرة وفقاً لفئات السرعة المختلفة.

%	مجـ	فئات السرعة بالعقدة			الدرجات	الإتجاه
		27-22	21-17	16-11		
20,35	38,50	0,42	2,17	35,92	345-14	ش
20,26	38,33	0,50	3,17	34,67	44-15	ش ش ق
7,26	13,75	0,25	1,25	12,25	74-45	ش ق
0,66	1,25	--	0,08	1,17	104-75	ق
0,43	0,83	--	--	0,83	134-105	ج ق
0,83	1,58	--	0,08	1,50	164-135	ج ج ق
0,57	1,08	--	0,17	0,92	194-165	ج
1,80	3,42	0,17	0,83	2,42	224-195	ج ج غ
2,64	5,00	0,25	1,08	3,67	254-225	ج غ
4,45	8,42	0,75	1,67	6,00	284-255	غ
9,33	17,67	0,50	2,75	14,42	314-285	ش غ
31,36	59,33	0,50	4,33	54,50	344-315	ش ش غ
100	189,19	3,34	17,58	168,27	جميع الإتجاهات	

المصدر: المعدلات المناخية لمحطة الفرافرة للفترة 1975-1999.

ثالثاً - طريقة الدراسة :

(1) الدراسة الميدانية :

أجرى الباحث دراسة ميدانية لبحر رمال الفرافرة في أول مارس عام 2010 بالإشتراك مع ورشة عمل الكتيان الرملية التي نظمها قسم الجغرافيا بكلية الآداب جامعة عين شمس ضمن مشروع دراسة

الكثبان الرملية في مصر. وقد تم خلال تلك الدراسة التعرف على أنواع وأشكال الكثبان السائدة داخل بحر رمال الفرافرة، وقياس الأبعاد المورفومترية لعدد من الكثبان الهلالية والطولية والنباك والكثبان القديمة، فضلا عن قياس إنحرافات بعض قمم الكثبان الطولية. كما قام الباحث بدراسة ميدانية ثانية للمنطقة في منتصف مارس ٢٠١٣، وقد تمكن خلالها من إستكمال قياس الأبعاد المورفومترية لعدد ٢٠ كتيب هلالى (جدول ٢)، و ١٩ كتيب طولى (جدول ٤)، و ١٠ أخرى من كثبان العقبات الطبوغرافية (جدول ٥)، وتم قياس عدد من القطاعات التضاريسية وحساب الإرتفاع والأحجام لعدد من الكثبان الرملية الهلالية، وجمع عينات الرمال. وقد تمت عمليات القياس الحقلى المباشر على النحو التالى:

- **الكثبان الهلالية** : اعتمدت عملية القياس الحقلى لأبعاد الكثبان الهلالية (الطول، العرض، الإرتفاع) فى هذه الدراسة على الطريقة التى قدمها (Finkel 1957). ووفقا لهذه الطريقة فإنه يمكن حساب ارتفاع الكتيب من خلال العلاقة التالية:

$$h = \frac{L_0 \times L_s}{AB}$$

حيث أن L_0 و L_s يشيران إلى طول الصباب والكساح على التوالي، و AB هى المسافة الأفقة بداية من الكساح وحتى أقدم الصباب. ولحساب حجم الكتيب فقد سجلت إحدائيات عينة قدرها ٢٠ كتيب بواسطة متوسط قراءات أجهزة الـ GPS، ووقعت كلها داخل برنامج ArcGIS بدلالة الإحدائيات الكيلومترية، ومن ثم حساب مساحة كل كتيب منها من الصور الفضائية. بناء على ذلك تم تقدير حجم الكتيب كمجسم على هيئة نصف هرم وفقا للمعادلة التالية (Hersen et al., 2004):

$$V_d = 0.16666 (A \times h)$$

حيث أن ٠,١٦٦٦٦ ثابت، و A و h هما المساحة والإرتفاع على التوالي.

- **الكثبان الطولية والمركبة والمعقدة** : تم إنشاء بعض القطاعات العرضية على عدد من الكثبان الطولية ميدانيا، علاوة على حساب أطوالها ومتوسط أعداد القمم ومتوسط التباعد بينها من خلال الصور الفضائية.

٢) الصور الفضائية والخرائط :

- **صور لاندسات** : استخدمت صور القمر الصناعى لاندسات-٧ بعد زيادة دقة الوضوح الأرضى إلى ١٥ مترا كأساس للدراسة الحقلية، وتوقيع إحدائيات الكثبان المدروسة بواسطة جهاز GPS، فضلا عن قياس أبعاد نطاقات الكثبان الرئيسية فى بحر رمال الفرافرة.

- **صور Google Earth** : يوفر برنامج Google Earth Pro صوراً مختلفة الدقة ، أعتد الباحث على الصور ذات الدقة العالية منها من نوع كويك بيرد والتي تصل دقتها المكانية ٦١ سم للخلية. وقد تم تجميعها بواسطة برنامج stitch map وتصديرها مع الإحتفاظ بخصائصها الهندسية بحيث يسهل تكاملها مع بيانات الاستشعار الأخرى. وقد استخدمت هذه الصور فى دراسة أنماط وأشكال الكثبان فى حقل رمال الفرافرة خاصة الكثبان المركبة والمعقدة.
- **صور ENVISAT** : استخدم موزايك الصور الرادارية Envisat من نوع أسار المتقدم ASAR، بدقة وضوح أرضى ٣٠ متر، وذلك باستعمال نظامين للاستقطاب هما الأفقى - الأفقى HH والرأسى - الرأسى VV، وذلك بغرض إظهار السمات المورفولوجية العامة لنطاقات الكثبان البلايستوسينية المتناسكة، حيث أن لنظام أسار قدرة على إختراق الطبقة السطحية من الرمال الحديثة نظراً لما تتميز به من تفكك حبيباتها وإنعدام الرطوبة الأرضية. وقد تم الحصول عليها كمنحة مقدمة من وكالة الفضاء الأوروبية ESA لإستكمال العمل فى الدراسة الحالية.
- **نماذج الإرتفاعات** : تعتمد الدراسة الحالية فى حساب إرتفاعات الكثبان بشكل رئيسى على القياس المباشر من الدراسة الميدانية، كما استخدمت نماذج الإرتفاعات الرقمية من نوع SRTM الإصدار الثالث بدقة مكانية ٣٠ متر بغرض إظهار الخصائص الطبوغرافية العامة لمنطقة الدراسة.
- **الخرائط الطبوغرافية والجيولوجية** : إستخدمت الدراسة الخرائط الطبوغرافية مقياس ١:١٠٠,٠٠٠ و ١:٢٥,٠٠٠ فى دراسة مورفولوجية المنخفض ونطاقات الكثبان الرئيسية. كما اعتمدت الدراسة على الخريطة الجيولوجية مقياس ١:٥٠٠,٠٠٠ من إصدار كونكو كورال (١٩٨٧) فى دراسة التكوينات الجيولوجية السطحية وخطوط البنية الرئيسية.

رابعاً - الأشكال الرملية النشطة :

يقسم (Mckee, 1979) الكثبان الرملية حسب الشكل وعدد الصبابات slipfaces ومواضعها. وهو بذلك يميز بين عدة أشكال رئيسية من الكثبان الرملية البسيطة مثل الهلالية والطولية والنجمية والعكسية. كما يميز بعد ذلك فى تصنيفه بين الكثبان المركبة compound dunes التى تتكون من تداخل overlapping أو تراكب superimposed أكثر من كثيب من نفس النوع، والكثبان المعقدة complex dunes التى تتكون من إلتحام coalescing نوعان مختلفان من الكثبان، مثل التداخل بين الكثبان الهلالية والكثبان الطولية. ويتبين من واقع الدراسة الميدانية وتفسير الصور الفضائية أن بحر رمال الفرافرة يتميز بوجود نظام هرمى (هيراركى) لتوزيع الأشكال الرملية بداخله. وتبدأ تلك الهيراركية بإنتشار تموجات الرمال على كل الأشكال الرملية مع

اختلاف أبعادها وأحجامها. ثم الأشكال الرملية البسيطة ممثلة في الغطاءات الرملية والنباك والبرخانات والكثبان الطولية، يليها الكثبان الرملية المركبة والمعقدة. وفيما يلي عرض لأهم سمات وخصائص كل شكل منها في بحر رمال الفرافرة:

(١) الغطاءات الرملية :

تشغل السهول الرملية مساحات محدودة للغاية من بحر رمال الفرافرة، لا تزيد عن بضعة مئات من الأمتار المربعة، يغطيها طبقات أفقية متتابعة من الرمال المفككة، ويغلب على سطحها العلوى الرمال الخشنة مما يقلل من قدرة الرياح على تزييتها. وتتواجد بصفة عامة الغطاءات الرملية عند الهوامش الشمالية لبحر الرمال، حيث تغطي على سهول البلايا القديمة، كما تنتشر حول تلال الينابيع وعلى جوانب الكدوات الصخرية. أما في الجزء الجنوبي من بحر الرمال فتشغل الغطاءات الرملية الممرات الفاصلة بين نطاقات الكثبان الرئيسية. ويتراوح سمكها بين ٥ - ٦٥ سم في شمال بحر الرمال إلى الشرق من بئر كراوين (E ٢٧ °٣١ ٢٨ °، N ٤١ °٥٤ ٢٧ °)، حيث يغلب عليها الرمال متوسطة الحجم (٠,٥-٠,٢٥ مم) والخشنة (٠,٥ - ١ مم). أما في الجنوب فيتراوح متوسط سمكها ١٥٠ سم في الممرات الفاصلة بين الكثبان المركبة والمعقدة (E ٤١ °٢٦ ٢٨ °، N ٣١ °٢٦ °)، حيث يغلب على سطحها سيادة الرمال الخشنة (٠,٥ - ١ مم) والخشنة جدا (١ - ٢ مم) مع إنتشار الحصى الأسود (٢ - ٤ مم) المستطيل متوسط الإستدارة (معامل الاستدارة ٠,٥)، مما يجعلها رديئة التصنيف بوجه عام في منخفض الفرافرة. وتعد التموجات الرملية من أهم الظواهر الدقيقة التي تميز الغطاءات الرملية، وتختلف أبعادها وأحجامها من مكان لآخر بإختلاف أحجام الرمال وشدة الرياح وتوجيه محاور الكثبان الرملية وعلاقتها بمستويات القص بفعل الرياح.

(٢) النباك :

تشير النباك إلى التجمعات الرملية حول الأعشاب الصحراوية التي تنمو عقب سقوط الأمطار الفصلية، أو تلك التي تستمد المياه من الطبقات تحت السطحية. ويبدو هذا التجمع على شكل رأس محدب في الجانب المواجه للرياح تتصل عند قمة النبكة بذيل يشير إلى منصرف الرياح. ويعد هذا النوع هو السائد في منخفض الفرافرة حيث يتكون نتيجة لنمو الأعشاب الموسمية، فضلا عن ظهور مساحات محدودة من النباك القبايية أو البيضاوية الشكل والتي ترتبط عادة بنمو بعض الشجيرات. ولهذا النوع من الشجيرات القدرة على إصطياد المزيد من الرمال بفعل قدرتها على إعاقة حركة الرياح، مما يجعل النبكة تنمو رأسيا أكثر منها أفقيا، لاسيما مع توافر مصدر للرطوبة التحت سطحية.

والنباك بصفة عامة قليلة الظهور في بحر رمال الفرافرة، إذ تظهر في عدة مناطق متفرقة بمساحات محدودة للغاية، خاصة في الجزء الشمالي من المنخفض حيث تسود الأراضي السهلية، ويقترب مستوى الماء الجوفي نسبياً من سطح الأرض، ومن ثم نجد النباك جنباً إلى جنب مع بعض تلال الينابيع القديمة، أو العيون التي لا زالت تجرى مثل عيون الوادي والخضرة وخليفة والمقفي والشيخ مرزوق. وتوضح دراسة مجموعة مكونة من ٢٠ نبكة أن أطوال النباك في بحر رمال الفرافرة تتراوح بين ٠,٩ - ١,٥ م بمتوسط عام قدره ١,٢ م، كما يتراوح عرضها بين ٠,٣ - ٢,٤ م بمتوسط عام ١,٣٥ م. أما متوسط إرتفاعها فيتراوح بين ٠,٥ - ٢,٥ م بمتوسط عام ١,٥ م، على أن النباك التي يقل إرتفاعها عن ١ م هي السائدة، حيث يؤدي نقص الرطوبة إلى تحديد إرتفاع النبات ومجموعه الخضري وقصر دورة حياته، ولذلك نجد أن السواد الأعظم تمثله النباك مفردة القمة، ولما نجد النباك مزدوجة القمة.

٣) الكثبان الهلالية :

تتركز الكثبان الهلالية البسيطة في بحر رمال الفرافرة على هوامشه الشرقية والغربية والجنوبية. وتمثل الهوامش الشرقية والغربية في الأساس نطاقات وسطى لنقل للرمال حيث تربط بين منطقة المصدر (الأودية المنحدرة من حواف المنخفض) ومركز حوض الترسيب، ومن ثم تقل فيها كميات الرمال المتدفقة إليها مقارنة بطاقة الرياح (Lancaster, 1995)، بما يسمح بتكوين برخانات منفردة بسيطة وصغيرة الحجم نسبياً. أما الهوامش الجنوبية للمنخفض فتتمثل نهايات أطراف بحر رمال الفرافرة والتي تبدأ إلى الجنوب قليلاً من دائرة عرض جبل شواشا ٠٣ ٢٦° شمالاً. حيث تصيح طاقة الرياح ضعيفة نسبياً غير قادرة على نقل كميات كبيرة من الرمال بسبب الإرتفاع التدريجي لقاع المنخفض، حيث يرتفع قاع المنخفض جنوباً لنحو ٤٥٠ متراً فوق منسوب سطح البحر، علاوة على إرتفاع بعض القمم لنحو ٥٣٠ متراً فوق منسوب سطح البحر.

وتتميز الكثبان الهلالية في منطقة الدراسة بوجودها في المناطق السهلية، التي يقل إنحدار سطحها عن ٠,٧°. و يمكن أن نوجز السمات المورفومترية العامة للكثبان الهلالية في بحر رمال الفرافرة من خلال دراسة مجموعة مكونة من ٢٠ كثيباً وذلك على النحو التالي (جدول ٢):

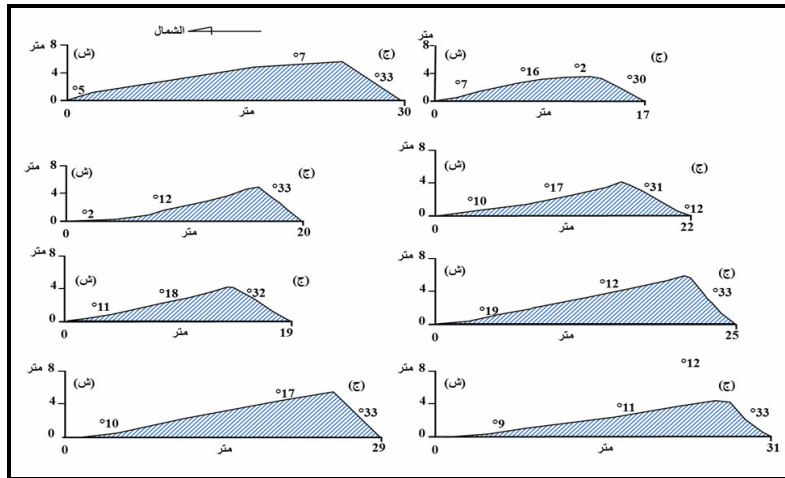
- يتراوح إنحدار الجانب المواجه للرياح (الكساح) بين ٢ - ٣° عند قاعدته، ثم يزداد الإنحدار نسبياً عند المنتصف ليتراوح بين ١٠ - ١٢° في المتوسط، ثم ينخفض مرة أخرى قرب قمة الكثيب ليتراوح بين ٢ - ٣°، ويغلب على الكساح عموماً الشكل المقعر - المحدب، وهو في هذا يتشابه مع كثبان الخارجة (Embabi, 1982) ومع كثبان شبه جزيرة قطر (نبيل إمبابي و محمود عاشور، ١٩٨٣).

جدول (٢) : الخصائص المورفومترية لبعض الكتلان الهلالية في بحر رمال الفرافرة.

الحجم (م ^٢)	المساحة (م ^٢)	متوسط العرض	متوسط الطول	متوسط الارتفاع	الارتفاع	العرض متوسط	طول الصباب	طول الكساح	متسلسل
٩٧٤,١	١٥٢١,٩	١٦,٥	٤١,٠	٦,٨	٤,٧	٩,٠	٣,٨	٢٩,٧	١
٨٢٨,٧	١١٩٣,٨	٢٤,٢	٢٩,٦	٩,٥	٩,٣	٩,٨	٤,١	١٤,١	٢
١٢٤٢,٤	١٦٤٧,٧	٢٩	٣٨,٩	١٣,٨	١٤,٥	١٣,١	٤,٥	١٩,٢	٣
٧٠٥,٥	١٠٢٨,٧	١٦,٧	٣٢,١	٨,٤	٨,٠	٨,٩	٤,١	١٨,٤	٤
٦٧٥,٨	١١٥٨,٨	٣٢,٥	٤٢,٢	١٩,٧	١١,٠	٢٨,٤	٣,٥	١٨,٢	٥
٤٥٧,٤	٧٨٠,٤	١٨,٧	٣١,٧	٧,٥	٧,٤	٧,٤	٣,٥	١٩,٩	٦
٣٦٤,٤	٣٦٨٢,٤	٤٢,٦	٥٦,٠	٢٩,٦	٣٥,٣	٢٣,٩	٥,٩	١٧,٤	٧
٨٣٨,٣	١٢١٦,٤	٢٤,٥	٣٣,٩	١٤,٦	١٥,٨	١٣,٣	٤,١	١٣,٣	٨
٢٤٣٢,٩	٢٦٨٧,٨	٣٨,٥	٥٥,٦	١٩,٣	٢٣,٥	١٥,١	٥,٤	٢٩,٦	٩
١١٨,٣	١٦٧,٤	٣١,٧	٤٥,٨	٢٣,٢	١٠,٥	٣١,٠	٤,٢	١٦,٨	١٠
١٧١	١٩٤١,١	٢٨,٣	٤٥,٨	١٨,٩	٢٢,٢	١٥,٦	٥,٢	١٩,٧	١١
١٥١٣	١٩٥٥	٢٢,١٦	٤٨,٩	٧,٠	٦,٤	٧,٦	٤,٦	٣٦,٥	١٢
٨٩٦,٢	١٣١٥,٥	٢٢,٢	٣٧,٤	١٠,٠	١٢,٠	٨,١	٤,٠	٢٢,٤	١٣
٥٠٧,٥	٨٨٥,٤	١٦,٥٩	٣٥,٢	٦,٦	٧,١	٦,١	٣,٤	٢٤,٥	١٤
١٢٨٨	١٣٦٩,١	١٧	٤٤,٤	٨,٠	١٠,٢	٦,٠	٥,٦	٢٩,٣	١٥
١٠١٠,٣	١٢٤٨,٢	١٩,٢٢	٣٨,٤	٦,٩	٨,٦	٥,٣	٤,٨	٢٥,٤	١٦
٦٧٦,٦	١٣٠٢,١	١٥,٦	٣٧,٠	٤,٢	٤,٠	٤,٥	٣,١	٢٩,٢	١٧
٤٧٤,١	٨٩١,٣	٢٠,٥	٣١,٠	٨,٢	٧,٥	٩,٠	٣,١	١٨,٩	١٨
٥٢٢,٤	٩٤٠,٣	١٦	٣٠,٥	٤,٠	٣,٣	٤,٨	٣,٣	٢٢,٦	١٩
٣٣٤,٣	٦٣٢,٩	١٧	٢٧,٧	٥,٧	٤,٦	٦,٨	٣,١	١٨,١	٢٠
١٠٤٢,٣	١٣٧٨,٣	٢٣,٤	٣٩,١	١١,٦	١١,٢	١١,٩	٤,١	٢٢,١	متوسط

المصدر: الدراسة الميدانية وتم حساب المساحة من الصور الفضائية عالية الدقة بدلالة أجهزة GPS. * جميع القياسات بالمتر

- يتصل الكساح بالصباب عبر قمة حادة، تنهال منها الرمال التي تزيلها الرياح من نطاق القص فوق الكساح لتستقر في جانب منصرف الرياح (الصباب) بزاوية تتراوح بين 30°-34°، ويتميز الصباب بقطاعه المستقيم، غير أنه يتصل بسطح الأرض بوحدة سفلى مقعرة يتراوح إنحدارها بين 1°-5° (شكل ٢).
- تتراوح أطوال الكساح بين 18,1 - 36,5 مترا بمتوسط عام 22,1 مترا، وتنبأين أطوال الصباب بين 3,5 - 7,2 مترا بمتوسط عام 5,3 مترا. بذلك يوجد تباين عام في أطوال الكثبان الهلالية بين 27,7 - 56 مترا بمتوسط قدره 39,1 مترا.
- تتميز قرون الكثبان بالقصر الشديد بالمقارنة مع الكثبان الهلالية في منخفض الخارجة (Embabi, 1982)، والكثبان الهلالية في شبه جزيرة قطر (نبيل إمبابي و محمود عاشور، 1983). كما تتسم باتساقها بوجه عام نتيجة للتقارب الشديد بين أطوالها، حيث تتراوح أطوال القرون الشرقية بين 4 - 35,3 مترا، بينما تتراوح أطوال القرون الغربية بين 4,5 - 36 مترا، بمتوسط عام 11,2 مترا.
- يتباين عرض الكثبان بين 16 - 42,6 مترا بمتوسط عام 23,4 متر.
- يتراوح ارتفاع الكثبان بين 3,1 - 5,9 مترا بمتوسط عام 4,1 متر.
- تتراوح مساحات الكثبان بين 167,4 - 3682,4 متر² بمتوسط عام قدره 1378,3 متر²، كما تتراوح أحجام الكثبان بين 118,3 - 3640,4 متر³ بمتوسط عام قدره 1042,3 متر³.



شكل (٢) : قطاعات طبوغرافية لبعض الكثبان الهلالية في بحر رمال الفرافرة.

المصدر: الدراسة الميدانية.

ولما كانت تلك الهوامش تتصف بقلة كميات الرمال بوجه عام فإن تحليل الصور الفضائية المتتابعة أوضح استقرارا فى الشكل العام للكثيب مع قلة حركته السنوية وفقا لحجمه، ومن ثم فإن معدلات تطورها بطيئة نسبيا، وإن حدثت فهى لا تتطور على نحو متماثل أو متناظر، إذ عادة ما يزيد طول أحد قرنيها على حساب الآخر نتيجة لتباين نظام الرياح المؤثرة وتباين كميات الرمال الواردة إليها من المصدر، مع تباين حركتها وفقا لحجم الكثيب (نبيل إمبابى ومحمود عاشور ١٩٨٥، صابر الدسوقى ١٩٨٨). ونتيجة لذلك تظهر الكثبان الهلالية المركبة نتيجة إلتحام كثيبين هلاليين أو أكثر.

ومع إستمرار عمليات تلاحم الكثبان الهلالية مع بعضها البعض، وتحت أثر الرياح المحلية وطبوغرافية السطح يتعدد الشكل العام للكثبان نتيجة لتطورها على نحو غير متناسق مع تداخلها مع الأشكال الرملية الأخرى، ومن ثم يبتعد شكلها عن الشكل الهلالي النموذجى مع تعدد القمم المدببة، وعدم تناسق القرون، وتعدد الأوجه شديدة الإنحدار (الصباب) نتيجة لتراكم كميات كبيرة نسبيا من الرمال، وهو ما يفضى إلى تطور أشكال أخرى أكثر تعقيدا من الكثبان الرملية على نحو ما سيرد ذكره لاحقا.

بذلك تتصف الكثبان الهلالية فى بحر رمال الفرافرة بكونها من النوع العادى البسيط، حيث يصل متوسط طولها ٣٩,١ مترا، ومتوسط العرض ٢٣,٤ مترا، أما متوسط إرتفاعها فلا يزيد عن ٤,١ مترا. كما يمكن بسهولة تمييز الكثبان الجنينية embryonic dunes على كافة هوامش بحر رمال الفرافرة دون إستثناء تقريبا، وكذلك تلك الكثبان الهلالية فى مراحل تكونها الأولى مع بداية ظهور القرون (شكل ٣). ويؤدى هذا الإتساق العام فى شكل الكثبان الهلالية فى بحر رمال الفرافرة إلى وجود علاقات موجبة بين أبعاد الكثبان ممثلة فى الطول والعرض والإرتفاع وحجم الكثيب. حيث يتضح من جدول (٣) وجود إرتباط طردى متوسط بين كل من متوسط الطول والعرض يصل ٠,٥٣، وإرتباط طردى بين كل من متوسط الطول والإرتفاع يصل ٠,٦٠، وكذلك بين متوسط الطول والحجم يصل ٠,٦١. بينما فى المقابل يبدى متوسط العرض إرتباط طردى ضعيف مع كل من الإرتفاع والحجم يصل ٠,٣٤ و ٠,٤٧ على التوالى، ويبدى الإرتفاع إرتباط طردى متوسط مع حجم الكثيب يصل ٠,٦٦. ونخلص من هذه العلاقات أن نمو الكثيب تدريجيا يقابله بالضرورة زيادة فى أبعاده المختلفة، مع ثبات النسبة بين أبعاد الكثيب تقريبا.

جدول (٣) : مصفوفة العلاقات الإرتباطية بين أبعاد الكثبان الهلالية في بحر رمال الفرافرة.

الحجم	الإرتفاع	متوسط العرض	متوسط الطول	
٠,٦١	٠,٦٠	٠,٥٣	١	متوسط الطول
٠,٤٧	٠,٣٤	١		متوسط العرض
٠,٦٦	١			الإرتفاع
١				الحجم

المصدر: من حساب الباحث من واقع القياسات الميدانية.



شكل (٣) : (أ) كثبان جنينية فى شمال شرق المنخفض،
(ب) كثيب هلالى فى بداية مرحلة تكوين القرون.

٤) الكثبان الطولية :

تتشكل الكثبان الطولية فى المناطق الشديدة الجفاف، مع وفرة الرمال فى ظل نظام ريحى أحادي عريض wide unimodal wind regime أو ثنائى الإتجاه bidirection wind regime (Lancaster, 1995). ولما كانت نسبة الهبوب الغالبة فى منخفض الفرافرة هي للرياح الشمالية

الغربية بوجه عام (٤٠,٦٩%) في معظم شهور السنة (جدول ١)، فقد أدى ذلك إلى تكوين مجموعة من الكثبان الطولية المتوازية بإنحراف يتراوح بين ٣١٥ - ٣٤٥° عن الشمال. ويمكن تمييز عدة أنماط من الكثبان الطولية في بحر رمال الفرافرة على النحو التالي:

جدول (٤) : الخصائص المورفولوجية لبعض الكثبان الطولية في بحر رمال الفرافرة.

مسلسل	طول (كم)	متوسط	الإرتفاع	الإتجاه	الإحداثيات
١	١,٨	٧٧	٧	٣١٠°	٢٦ ٥٦ ٣٩ N ٢٨ ١١ ٠٢ E
٢	٣,٣	١٣٣	٢٠	٣١٥°	٢٦ ٥٦ ٣٠ N ٢٨ ١٢ ٤٦ E
٣	٣,٦	٢٠١	٨	٣٢٠°	٢٦ ٥٢ ٣٠ N ٢٨ ١٧ ٣٤ E
٤	٤,٩	٢٧٢	٨	٣٢٥°	٢٦ ٥١ ٢٨ N ٢٨ ١٧ ٢٣ E
٥	٥,٣	١٩٦	١٢	٣٢٠°	٢٦ ٥٠ ١٧ N ٢٨ ٢٠ ٥٦ E
٦	١٧	٢٩٨	٣٧	٣٤٥°	٢٦ ٣٧ ٠٢ N ٢٨ ٢٠ ١٩ E
٧	١٠,١	٤٠٠	٣٤	٣٤٠°	٢٦ ٤٤ ٣٠ N ٢٨ ٢٠ ٥٢ E
٨	٨,٣	٢٠٥	٢٥	٣٣٥°	٢٦ ٤٧ ١٠ N ٢٨ ٢٢ ٢٢ E
٩	٧,٦	١٧٩	١٥	٣٢٠°	٢٦ ٢٨ ١٨ N ٢٨ ٤٠ ٤٠ E
١٠	١٢,٩	٣٠٣	١٧	٣٢٨°	٢٦ ١٦ ٤٠ N ٢٨ ٤٨ ٣٨ E
١١	٢٤	١٨١	٣٢	٣٥٠°	٢٦ ٢٤ ١٩ N ٢٨ ٤٥ ٥٠ E
١٢	١٥,٣	٣٧٨	٢٢	٣٤٥°	٢٦ ٢٥ ٢٨ N ٢٨ ٤٤ ٤٦ E
١٣	٦,٣	٣٠٠	٣١	٣٤٠°	٢٦ ٢٤ ٠٧ N ٢٨ ٤٣ ١٧ E
١٤	١٢,٥	١٦١	٤٠	٣٤٥°	٢٦ ٢٥ ٠٨ N ٢٨ ٤١ ٣٨ E
١٥	٣,٩	٧٨	١٤	٣٣٥°	٢٦ ١٩ ٠٨ N ٢٨ ٤٢ ٢١ E
١٦	١,٦	١٦٢	١٢	٣١٥°	٢٦ ١٩ ٠٩ N ٢٨ ٤٢ ١٤ E
١٧	١١,٢	١٥٤	٢٤	٣٤٥°	٢٦ ١٩ ٢١ N ٢٨ ٤٤ ٢٨ E
١٨	٩,٥	١٣٧	٢٨	٣٤٠°	٢٦ ١٨ ٤١ N ٢٨ ٤٣ ٥٨ E
١٩	٦,٣	١٥٣	١٨	٣٣٥°	٢٦ ٠٤ ٤٤ N ٢٨ ٥٠ ٠٧ E

المصدر: قياس ميداني مع الإستعانة بجهاز GPS وبرنامج Google Earth.

٤-١ الكثبان الطولية المتوازية :

كثبان مستقيمة متوازية قصيرة الطول نسبيا (شكل ٤)، حيث تتراوح أطوالها بين ١ - ٥ كم، ويتراوح عرضها بين ١٥٠ - ٣٠٠ مترا. أما مقدار التباعد بينها فيتراوح بين ٢٠٠ - ٤٥٠ متر، ويتراوح إرتفاعها بين ٥ - ١٥ مترا فوق قاع المنخفض. وينتشر هذا النوع من الكثبان الطولية في الجزء الشمالي من بحر رمال الفرافرة، خاصة إلى الجنوب من منطقة كراوين وبالقرب من الحافة الشرقية للمنخفض، ويكاد يختفي إلى الجنوب من دائرة عرض $30^{\circ} 43' 26''$. ويبدو هذا النوع من الكثبان الطولية ذو قمة حادة مستقيمة غير متعرجة، غير أنه في بعض الأحيان يفقد إستقامته وتتعدد وتتعرج فيه القمم عندما ينتهي إلى عائق طبوغرافي.



شكل (٤) : أحد الكثبان الطولية المستقيمة شمال غرب بحر رمال الفرافرة.

٤-٢ الكثبان الطولية ذات القمم المتعرجة :

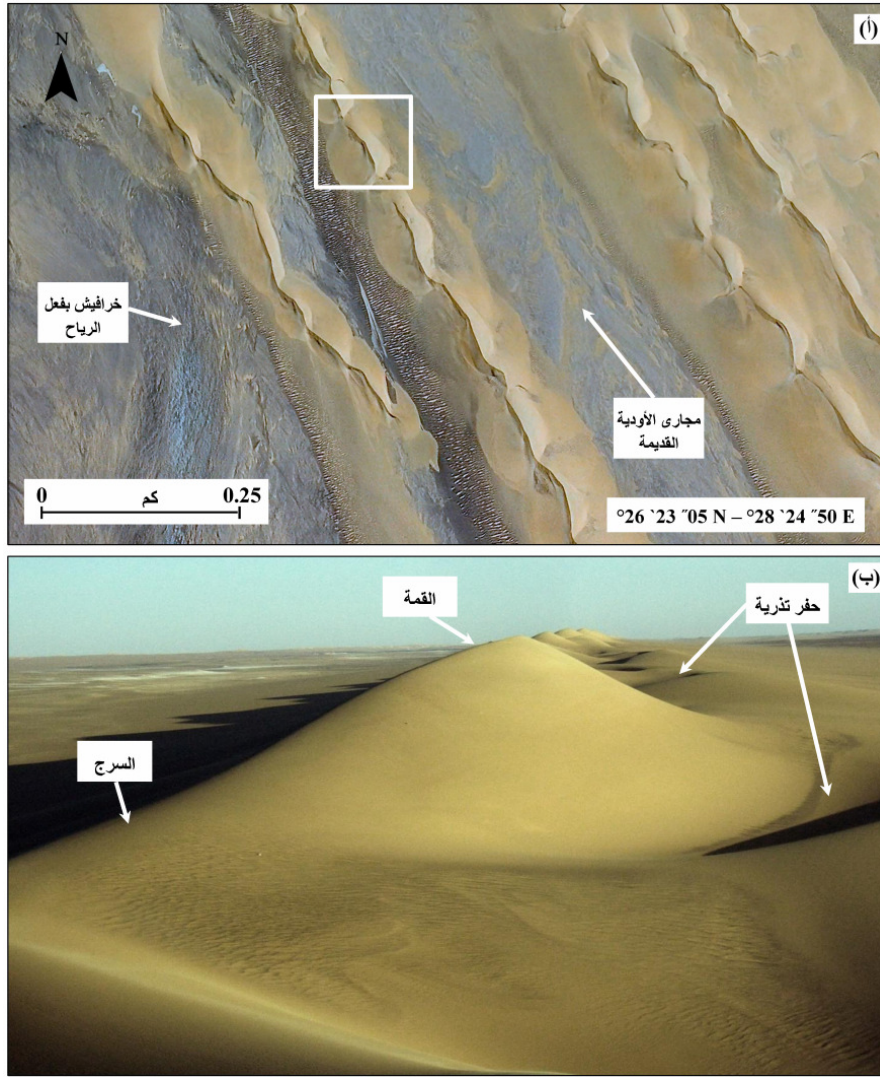
تبدأ الكثبان الطولية في بحر رمال شرق الفرافرة تزداد طولاً وإتساعاً وإرتفاعاً بداية من دائرة عرض $26^{\circ} 48'$ تقريبا. كما تتعدد وتتعرج قممها بشدة على طول إمتداد محور الكثيب الواحد، لدرجة تبدو معها القمم كما لو كانت عبارة عن مجموعة من القباب الرملية المتقاطرة على أبعاد تكاد تكون منتظمة تتراوح بين ٢٠ - ١٥٠ متر، غير أنها فعليا تتصل فيما بينها عبر حافات رملية طويلة أقل إنخفاضا من القمة نفسها، لتشكل معا ما يعرف بسلسلة القمم والسروج peaks and saddles حسب تسمية (Bagnold, 1941) (شكل ٥). ويوضح تحليل الصور الفضائية أن هناك تباينا كبيرا في عدد القمم المتقاطرة حيث تتراوح أعدادها بين ١٠ - ٩٥٠ قمة تقريبا على طول خط القمم، لذلك

فالعلاقة الإرتباطية قوية جدا بين كل من طول الكثيب وعدد القمم (٠,٩١). ويزداد ارتفاع القمم فى منتصف الكثيب تقريبا وليس عند الاطراف، وهو أمر طبيعى حيث يتعرض الطرف الشمالى للكثيب لعمليات إزالة واسعة بفعل الرياح التى تعمل على حركة الرمال وتدفعها على طول المحور الرئيسى للكثيب، ومن ثم فكثيرا ما تختفى القمم الحادة عند البدايات الأولى للكثبان الطولية. أما عند الطرف الجنوبى فيقل معدل الإمداد بالرمال مع ضعف طاقة الرياح كذلك على الحمل، ومن ثم تبدو الأطراف الجنوبية للكثبان الطولية ضيقة مدببة، وهو ما يؤدى إلى إستطالة الكثيب نحو الجنوب دون أن يزداد إرتفاعه.

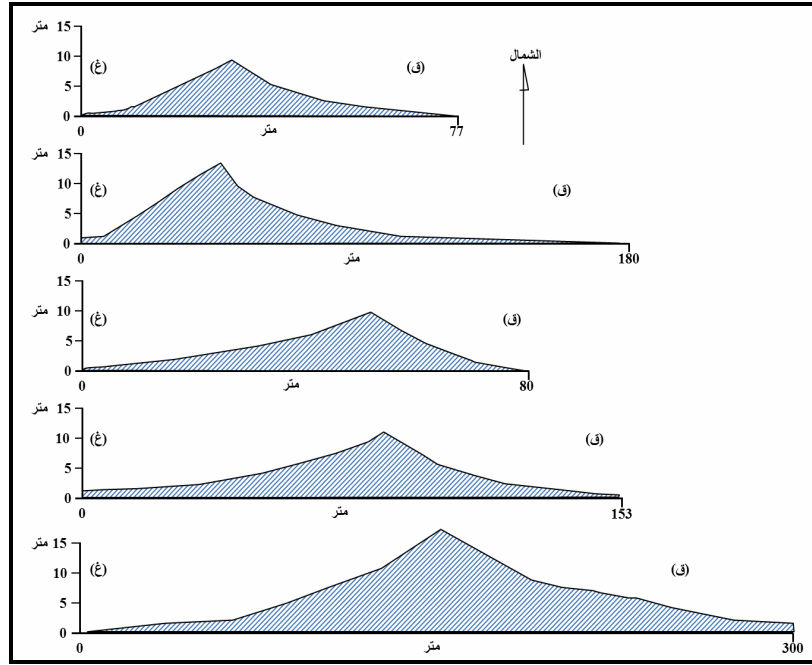
ويبدأ الكثيب من قاعدة عريضة نسبيا بإنحدار يتراوح بين ٢ - ٤° من الجانبين، ثم يشتد الإنحدار بإتجاه قمة الكثيب ليتراوح بين ٥ - ١٨°، لذا فإن أغلب الكثبان الطولية لا يبدو قطاعها العرضى متماثل (شكل ٦). ويتراوح إرتفاعها فى بحر رمال شرق الفرافرة بين ٧ - ٤٠ مترا فوق سطح الأرض المجاورة، كما يتراوح متوسط عرضها بين ٧٧ - ٤٠٠ متر، ويتراوح متوسط طولها بين ١,٦ - ١٧ كم، لتكون بذلك النسبة بين متوسط العرض ومتوسط الطول ١ : ٣٩ (جدول ٥). وينعكس هذا التباين بين أبعاد الكثيب فى علاقة إرتباطية ضعيفة بين الطول وكل من متوسط العرض والإرتفاع تصل إلى ٠,٣٩ و ٠,٤٥ على الترتيب. كما تتباعد الكثبان عن بعضها البعض بمسافات تتراوح بين ٧٠ - ٣٠٠ مترا، ويشير ذلك إلى مدى التوازن بين كل من شدة هبوب الرياح من جهة وتوافر الرمال من جهة أخرى. أما عن محاور الكثبان الرئيسية فتتراوح بين ٣١٠ - ٣٥٠°، وهو ما يشير إلى سيادة الرياح الشمالية الغربية معظم شهور السنة ودورها فى توجيه محاور الكثبان الرئيسية.

٤-٣ الكثبان الطولية المتشعبة :

يتكون هذا النمط نتيجة لإلتحام أو تفرع بعض الكثبان الطولية بزوايا حادة لتكون كثيب واحد، حيث تبدو نقطة الإلتحام على شكل حرف (Y) اللاتينى، وتعرف بنقطة المفترق *tanning fork junction* عندما يكون إتجاه زاوية الإلتقاء فى جانب هبوب الرياح (Lancaster, 1995)، ويسمى كذلك بالإلتقاء العادى. ويرجع فى الغالب إلى زيادة مفاجئة فى درجة خشونة السطح، مثل السهول الحصوية والعوائق الطبوغرافية. وكذلك فى المناطق التى يزداد فيه التباعد نسبيا بين الكثبان الطولية، حيث يتراوح مقدار التباعد بين الكثبان المتشعبة فى بحر رمال الفرافرة بين ٢٥٠-٥٠٠ مترا، ومن ثم يسمح هذا التباعد بقدر من التعديل أو التكيف فى مورفولوجية الكثيب مع إتجاه الرياح المؤثرة وظروف الإرساب. أما لو كان إتجاه زاوية الإلتقاء فى جانب منصرف الرياح فيعرف حينئذ بالإلتقاء المعكوس، وهو ناتج عن الإرتفاع التدريجى فى سطح الأرض (شكل ٧).

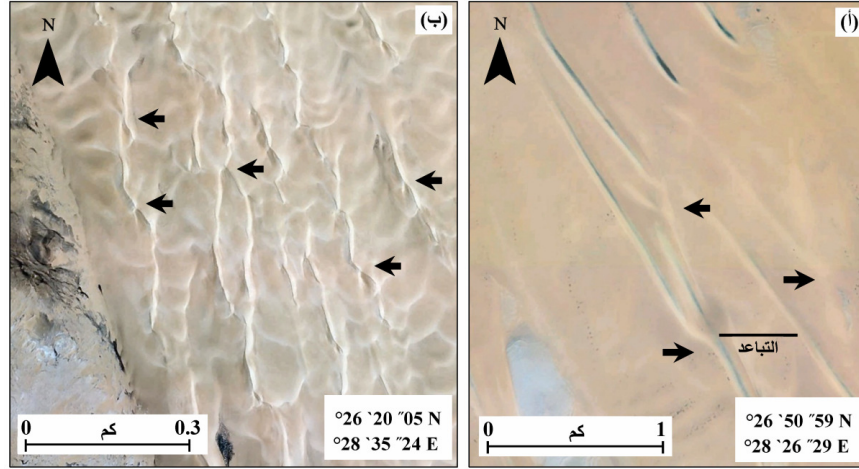


شكل (٥) : (أ) تقاطر القمم على طول إمتداد محور أحد الكتلان الطولية فى بحر رمال شرق الفرافرة كما تبدو من صور Google Earth ويشير المربع الأبيض إلى موقع الصورة السفلى، (ب) تتابع القمم والسرّوج.



شكل (٦) : القطاعات العرضية لبعض الكثبان الطولية في بحر رمال الفرافرة.

المصدر: الدراسة الميدانية.



شكل (٧) : تفرع وتشعب الكثبان الرملية في بحر رمال الفرافرة حيث تشير الأسهم السوداء إلى نقاط الالتقاء،

ويلاحظ كذلك تباين التباعد بين الكثبان في الصورتين: (أ) الالتقاء العادي، (ب) الالتقاء المعكوس.

المصدر: Google Earth.

جدول (٥) : الخصائص المورفومترية لعدد من كتبان العوائق الطبوغرافية.

مسلسل	الطول (م)	العرض ١ (م)	العرض ٢ (م)	الإرتفاع ١ (م)	الإرتفاع ٢ (م)	الاتجاه
١	١٠٢٠	٣٣	١٥	٦	٣	٠٣٥٠
٢	٨٦٣	٣٦	١١	٥	٣	٠٣٥١
٣	١٧١١	٧٥	٢٩	١٥	٢	٠٣٥٤
٤	٢٦١٤	١٣٣	٣٧	٢٠	٤	٠٣٥٧
٥	١٣٢٦	٧٥	١٢	٨	٣	٠٣٥٧
٦	٣٥٦٠	١٠٧	٣٠	٣٢	٤	٠٣٤٥
٧	١٠٢٢	٦٧	٢٦	٦	٢	٠٣٤٧
٨	٩١١	٣٣	٢٠	١١	٢	٠٣٤٨
٩	٢٧٤٠	٨٣	٢٤	٥	٢	٠٣٥٨
١٠	١٥١١	٧٣	١٤	١١	٢	٠٣٤٩

العرض ١ = العرض عند بداية الكتيب، العرض ٢ = العرض عند نهاية الكتيب، الإرتفاع ١ = الإرتفاع عند

بداية الكتيب، الإرتفاع ٢ = الإرتفاع عند نهاية الكتيب

المصدر: قياس ميدانى مع الإستعانة بأجهزة الـ GPS وصور Google Earth.

وتتميز الكتبان الطولية - بوجه عام - بكثافة عالية فى المناطق التي تغطيها مقارنة

بأراضى ما بين الكتبان (Lancaster, 1995)، كما تتميز بالانتظام الشديد (Cooke &

Warren, 1973). أما الأراضى الفاصلة بين الكتبان الطولية فيغطيها فرشاة رملية وسطوح

حصوية خشنة، كما قد يظهر من بينها أحيانا قاع المنخفض الأصيل من الحجر الطباشيرى

حيث تظهر عليه الحزوز الناتجة عن نحت الرياح.

أما ديناميكية النحت والإرساب على الكتبان الطولية فتتميز بالتعقيد، إذ يتوقف ذلك على زاوية

هبوب الرياح على قمة الكتيب. فالجانب الواقع فى ظل الرياح leeseide ليس نطاق إرساب فقط،

وإنما أيضا يتعرض لعملية نحت بسبب إنحراف الرياح (Tsoar, et al., 1985). ويتوقف ذلك على

زاوية سقوط الرياح على قمة الكتيب، فعندما تقل هذه الزاوية عن ٤٠° تزداد قدرة الرياح على النحت

ونقل الرمال على طول الجانب الواقع فى ظل الرياح. وعندما تقترب زاوية السقوط من ٩٠° تنخفض

سرعة الرياح وتبدأ فى الترسيب.

كما أوضحت التجارب التي قام بها (Parteli, et al., 2009) أن مورفولوجية الكثبان الرملية في بيئة رياح ثنائية الإتجاه bimodal ترتبط بعاملين رئيسيين هما مقدار الزاوية بين إتجاهي الرياح Q_w ، وزمن أو مدة هبوب الرياح t_w من كل جانب. فعندما تكون الزاوية المحصورة بين إتجاهي الرياح حادة ($Q_w = 40^\circ$) فإن الأشكال الرملية تكون مستعرضة (الكثبان العرضية) على إتجاه الرياح، وكلما زاد مقدار تلك الزاوية لأكثر من 90° ($Q_w = 120^\circ$) فإن الأشكال الرملية تستطيل مع إتجاه هبوب الرياح (كثبان طولية). من ناحية أخرى كلما قل زمن الهبوب تشكلت كثبان طولية مستقيمة، وكلما زاد زمن الهبوب تكونت كثبان السيف المتعرجة وذلك في حالة وفرة الرمال، حيث ينتشى الكثيب للتكيف مع إتجاهي الرياح المؤثرة.

٥) كثبان العوائق الطبوغرافية :

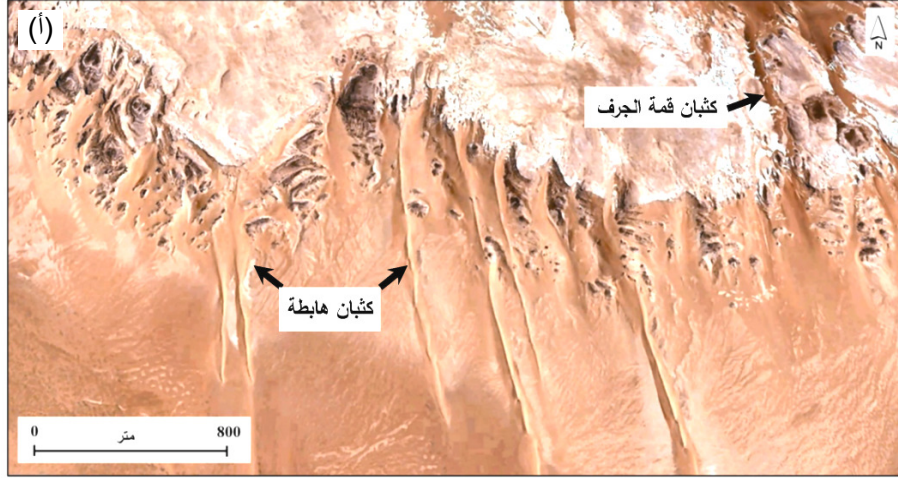
يصنف (Pye & Tsoar (2009) كثبان العوائق الطبوغرافية على النحو التالي:

- كثبان الصدى Echo أوالكثبان الصاعدة Climbing، وتتكون في الجانب المواجه للرياح.
- كثبان الظل Lee Dunes، وتتكون على جانب ظل الرياح.
- كثبان قمة الجرف Cliff-top، وتتكون فوق سطح العائق الطبوغرافي.

ويعد النوعان الأول والثاني هما الأكثر انتشارا بين أنواع كثبان العقبات الطبوغرافية في بحر رمال الفرافرة، ذلك إذ أن أغلب العوائق الطبوغرافية التي يتكون أمامها أو خلفها هذا النوع من الكثبان تمثل قارات صخرية صغيرة نسبيا أو بقايا الأعمدة الكارستية المتآكلة. أما كثبان قمة الجرف فتظهر في مواضع قليلة جدا عند الحافة الشمالية الشرقية للمنخفض حيث تهبط الرمال منها إلى قاع المنخفض، وكذلك فوق قمة جبل شاوشاو قبل هبوط الكثبان ناحية الجنوب بإتجاه منخفض الداخلة (شكل ٨).

وكثبان العوائق الطبوغرافية بوجه عام قليلة الإنتشار في بحر رمال الفرافرة مقارنة بأنواع الكثبان الأخرى، إذ تظهر موضعيا بفعل المظاهر التضاريسية التي تعوق مسار الرمال لا سيما بالقرب من هوامش المنخفض. ويبدو واضحا في الجزء الشمالي والغربي من المنخفض بوجه عام، حيث تحمل مسارات الرياح الشمالية الرمال وتتحرك بها عبر بطون الأودية. كما تظهر كذلك على طول الحافة الجنوبية لجبل شاوشاو في الأطراف الجنوبية لمنخفض الفرافرة، حيث تبدأ الرمال في الهبوط عبر بطون الأودية إلى منخفض الداخلة. أما عن خصائصها المورفومترية (جدول ٦) فيتراوح طولها بين ٨٦٣ - ٢٧٤٠ مترا، بمتوسط عام ١٧٢٧ متر تقريبا، أما عرضها فهو ضئيل بالنسبة للطول، وإن كانت البدايات الأولى للكثبان أكثر إتساعاً عن أطرافها النهائية. ويتراوح عرض الكثبان عند بداياتها بين ٣٣ - ١٣٣ مترا، بينما يضيق العرض عند الأطراف ليتراوح بين ١١ - ٣٠ مترا.

وبالمثل يتباين الارتفاع بين بداية الكثيب ونهايته، حيث تتراوح إرتفاعات الكثبان عند بدايتها بين ٥ - ٢٠ مترا، بينما يقل الارتفاع عند الأطراف الجنوبية للكثبان ليتراوح بين ٢ - ٤ أمتار. ويشير التضائل التدريجي في عرض الكثبان مع تناقص الارتفاع إلى الضعف التدريجي في قدرة الرياح على نقل الرمال على طول محور الكثيب في إتجاه منصرف الرياح. أما محاورالكثبان الرئيسية فتتفق مع الرياح الشمالية والشمالية الغربية بوجه عام، حيث تتراوح إتجاهات الكثبان بين ٣٤٥ - ٣٥٨°.



شكل (٨) : (أ) نمو كثبان الظل على طول الحافة الجنوبية لجبل شاوشاو (من Google Earth)، (ب) كثبان الظل تهبط عبر الحافة الشمالية لمنخفض الداخلة إلى الشمال من قرية تنيدة.

٦) الكثبان المركبة والمعقدة (الذراع) :

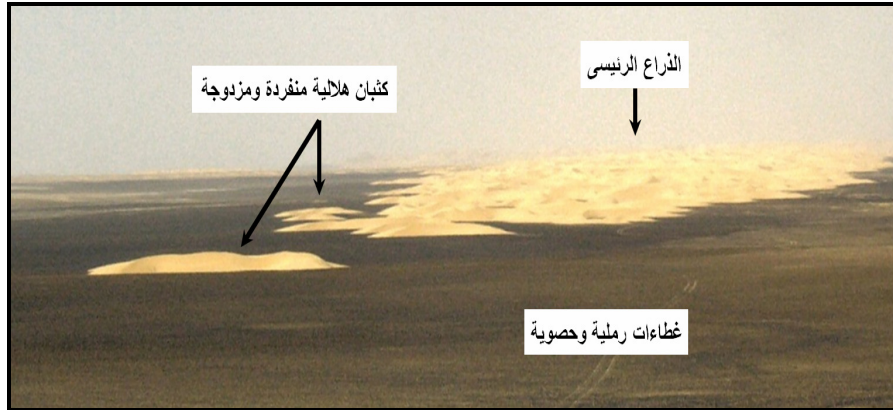
يعتبر تباين أحجام الكثبان الرملية هو أحد الخصائص المميزة لبحار الرمال (Goudie, 2013)، من ثم تشغل الكثبان المركبة والمعقدة حوالي ٤٦,٦% من الكثبان الموجودة في بحار الرمال في العالم (Fryberger & Goudie, 1981). فالأشكال الرملية الكبرى تغطيها الأشكال الأقل حجماً، والأقل حجماً تغطيها أشكالاً أخرى أصغر وهكذا. وتبدو في النهاية التجمعات الرملية داخل بحار الرمال في شكل مركب ومعقد، والذي يضم بداخله مجموعة من الأشكال الرملية المتداخلة فيما بينها بأحجام مختلفة، والتي تنتظم في نطاقات أو حافات موازية لمسارات هبوب الرياح. ويستخدم كل من (Wilson, 1972) مصطلح ذراع draa للإشارة إلى الكثبان المركبة والمعقدة، كما تعرف كذلك بالكثبان العملاقة mega-dunes (Lancaster, 1995; Goudi, 2013). وكان (Bagnold, 1931) أول من ميّز الذراع عن الكثبان الرملية الأخرى، حيث أطلق عليها مصطلح ظهور الحيتان back whales أو الجسور الرملية sand levees (Bagnold, 1941). أما (Bubenzer & Besler, 2005) و (Besler, 2008) فيميزا الذراع عن بقية الأشكال الرملية الأخرى من حيث عظم أبعادها المورفولوجية مثل الطول والتباعد، علاوة على الطول الموجي الذي قد يزيد عن ١ كم. كما أنها تنشأ في الجزء الأدنى من الطبقة الحدية من الغلاف الجوى، والذي يقل فيه التأثير الناجم عن الإحتكاك بسطح الأرض، بينما تنشأ أنواع الكثبان البسيطة تحت تأثير الرياح السطحية وخشونة السطح (Besler, 2008).

والكثبان المركبة والمعقدة (الذراع) هي الشكل الرملى الأكثر إنتشاراً في بحر رمال الفرافرة، شأنه في ذلك شأن بحر الرمال العظيم حسب دراسة (Besler, 2008). فالأشكال الرملية تنتظم في مجموعة من النطاقات أو الأذرع الطولية إلى الجنوب مباشرة من دائرة عرض ٠٣° ٢٧°، ويختلف عدد هذه النطاقات باختلاف دائرة العرض، إذ قد يلتحم بعضها البعض فتزداد إتساعاً، أو قد ينسلخ عن النطاق الواحد بضعة نطاقات (أذرع) أخرى ثانوية نتيجة لظروف السطح المحلية، مثل إعتراض القارات الصخرية مسار النطاق الرئيسى (شكل ٩). ويصل عدد هذه النطاقات ١٥ نطاقاً عند دائرة عرض ٠٣° ٢٦° إلى الشمال قليلاً من جبل شاوشاو. أما إلى الجنوب من ذلك فيقل عدد النطاقات للنصف تقريباً حيث يمكن بالكاد تمييز ٥ نطاقات، أكثرها وضوحاً هو ذلك النطاق الموازى مباشرة للحافة الغربية لجبل شاوشاو، بينما يقل وضوح النطاقات الأخرى بالإتجاه شرقاً أو غرباً، نظراً لتحلل dismantling نهايات نطاقات الكثبان المعقدة إلى مجموعة من الكثبان الهلالية البسيطة المفردة أو المزدوجة double barchans حسب تسمية (Bagnold, 1941)، كنتيجة طبيعية لنقص كمية الرمال والإرتفاع التدريجى لقاع المنخفض

(شكل ١٠). بذلك تتخفف بشدة كثافة الكثبان في الجنوب نتيجة لضيق عرض نطاقات الكثبان الرئيسية، والذي يقابله إتساع نسبي لأراضى ما بين الكثبان.



شكل (٩) : النهايات الجنوبية لبعض نطاقات الكثبان في بحر رمال الفرافرة من أعلى جبل شاوشاؤ.



شكل (١٠) : ظهور الكثبان الهلالية المنفردة والمزدوجة عند نهايات نطاقات الكثبان الرئيسية.

ويتراوح إرتفاع الكثبان المعقدة في بحر رمال الفرافرة بين ٤٧ - ٦٦ مترا فوق الأراضى المجاورة، بمتوسط عام قدره ٣٥ مترا. ويتألف النطاق في الأساس من وحدتين رئيسيتين هما الجزء السفلى أو القاعدة وتمثلها ظهور الحيطان حسب تسمية (Bagnold, 1941)، ثم الوحدة العليا وتمثلها مجموعة الكثبان الحديثة المركبة والمعقدة، وذلك يعنى أننا بصدد التفريق بين مجموعة من الكثبان الثابتة fixed dunes، تعلوها مباشرة مجموعة من الكثبان الحديثة التي تمتاز بقممها المتغيرة.

أما الوحدة السفلى (ظهور الحيتان) فتتميز في بحر رمال الفرافرة بعدة سمات جيومورفولوجية يمكن إيجازها على النحو التالي (شكل ١١):

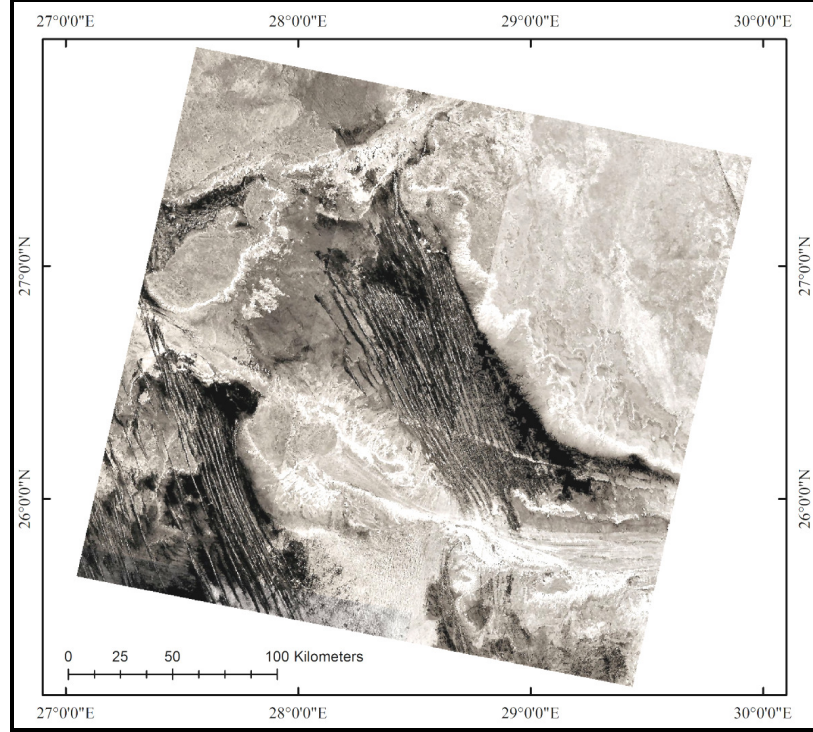
- تبدو ظهور الحيتان على شكل كثبان عملاقة mega dunes طولية متوازية، تمتد لعشرات الكيلومترات.
- تتميز بقممها المستديرة rounded غير الحادة.
- رمال سطحها متماسكة نسبياً، ويغلب عليها اللون الرمادي الداكن نتيجة لتطور غطاء خفيف من التربة السطحية مع سيادة الرمال الخشنة (٠,٥ - ١ مم)، ومن ثم فهي أقل تأثراً بالتغيرات الفصلية التي تطرأ على إتجاهات الرياح على عكس أنواع الكثبان الحديثة الأخرى التي تعلوها.



شكل (١١) : ذراع بلايستوسيني يغطيه موضعياً كثيب طولى حديث، ويلاحظ إستدارة القمة وإختلاف لون رواسبه السطحية.

ويمكن تمييز ظهور الحيتان في الميدان بوضوح من خلال شكلها المميز وخصائص رمالها، غير أنه يصعب تمييزها من الصور الفضائية في المجال المرئي optical remote sensing ، إلا أن تحليل صور الرادار ENVISAT من نوع أسار المتقدم (ASAR Advanced Synthetic Aperture Radar) يكشف عن إمتداداتها بوضوح في بحر رمال الفرافرة (شكل ١٢)، حيث تبدو في شكل مجموعة من الخيوط المتوازية parallel strings على حد وصف (Holm 1961)، يتدرج لونها بين اللونين الرمادي والأبيض، بينما يعكس اللون الأسود قاع المنخفض أسفل منها مباشرة. ذلك إذ أن لنظام التصوير أسار المتقدم ASAR قدرة على إختراق الرواسب الرملية الجافة

وإظهار خصائص ما تحت السطح وذلك في القناة C ذات الطول الموجي ٣,٧٥ - ٧,٥ سم (ESA 2007).

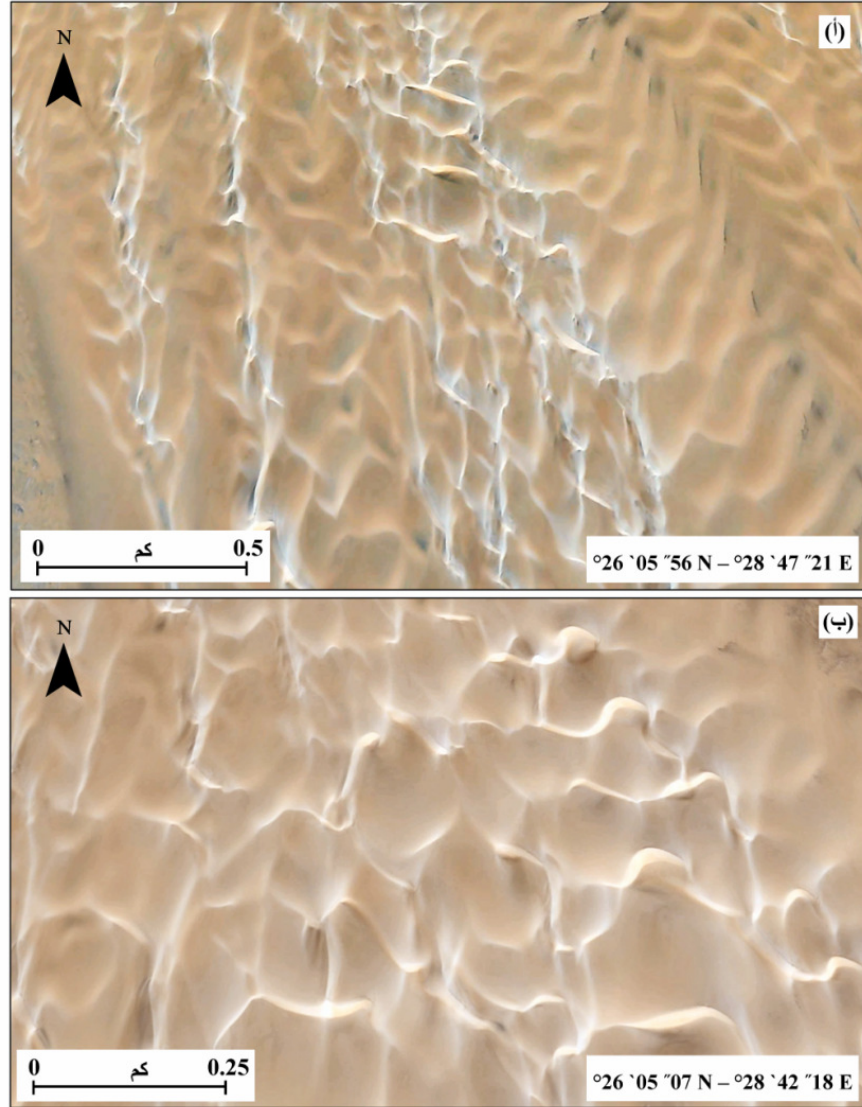


شكل (١٢) : موزايك من صور ENVISAT من نوع اسار المتقدم ASAR يوضح الأذرع البلايستوسينية في بحر رمال الفرافرة في شكل خطوط متوازية يتدرج لونها بين الأبيض والرمادي ، بينما يشير اللون الأسود إلى قاع المنخفض.

أما الوحدة العليا فتتألف من مجموعة من الكثبان المركبة والمعقدة الحديثة ذات الرمال المفككة، وقد نشأت هذه الوحدة في ظل ظروف الجفاف الحالية (الهولوسين) والتي يمكن تسميتها بالذراع الهولوسينية، ذلك إذ أن زيادة كمية الرمال المتدفقة مع الرياح الرئيسية تؤدي إلى تراكم وتلاحم الكثبان الهلالية لتكون حافات هلالية غير منتظمة الشكل والحجم وكثيرة التعرج، حيث يمكن تمييز الألسنة والأهلة barchanoid and linguoid elements فيها بوضوح، إذ تبدو الحواف معقوفة بشدة حتى أن نهايات الصباب لكل حافة منها تمتد لتتلاقق

بدايات الكساح في الحافة التالية لها، لتحصر فيما بينها بذلك منخفض رملي ببيضاوى الشكل. أما أسنة تلك الحافات فإنها تمتد هي الأخرى تحت تأثير الرياح حتى تتصل بالحافة التالية لها، ومن ثم تبدو على هيئة حواف رملية خطية، سرعان ما تتطور في شكل كثبان طولية نتيجة للتغيرات المحلية في طبوغرافية السطح بفعل تلاحم الكثبان، ومن ثم يؤثر ذلك في مسارات الرياح موضعيا، بحيث يتغير نمط الرياح أحادي الإتجاه الذى كان سائدا إلى نمط آخر ثنائى الإتجاه يتعامد فيه كل إتجاه على الآخر بدرجات متفاوتة، مما يعمل على إستطالة أحد أسنة الحافات المستعرضة في إتجاه منصرف الرياح. ويزيد هذا كله من تعقيد الشكل العام للكثبان في بحر رمال الفرافرة، بحيث تعكس في النهاية كل هذه الأنواع مجتمعة من الكثبان ما يعرف بالكثبان الشبكية lattice or network dunes، وهو نمط يتميز بتعدد الصبابات نتيجة لتداخل أكثر من نوع من الكثبان، وتعامد الكثبان الطولية على بعضها البعض بزوايا كبيرة نتيجة لتعدد إتجاهات الرياح بما لا يسمح بوجود ممرات فاصلة بين الكثبان بسبب شدة كثافة الكثبان (شكل ١٣). وتتخذ الصبابات إتجاها عاما ناحية الجنوب والجنوب الشرقى والجنوب الغربى. ويتراوح إنحدارها بين ٣٠ - ٣٤°، بينما يقل إنحدارها عند أجزاءها الدنيا ليتراوح بين ٥ - ١٠°.

نخلص من هذا أن الكثبان المركبة والمعقدة (الأدرج) في بحر رمال الفرافرة تنتظم في نطاقات أو سلاسل رملية ضخمة تمتد من الشمال الشرقى إلى الجنوب الغربى بوجه عام لمسافات طويلة تتراوح بين ٤٠ - ١٧٣,٢٥ كم، بمتوسط عام قدره ١٠٦,٥ كم قيست من خلال الصور الفضائية. على أن أكثرها طولاً وإمتداداً هو ذلك النطاق الموازى مباشرة للحافة الغربية لجبل شاوشاو، حيث يمتد لمسافة ١٧٣,٢٥ كم من الشمال الغربى عند دائرة عرض ١٧° ٢٧' إلى الجنوب الشرقى عند دائرة عرض ٤٩° ٢٥'، حيث يصعد آخر كثيب هلالى في هذا النطاق فوق سطح العتبة الصخرية الفاصلة بين منخفض الفرافرة في الشمال ومنخفض الداخلة في الجنوب. أما أقلها إمتداداً هو ذلك النطاق الغربى الذى يمتد من دائرة عرض N ٠٢° ٣٥' وخط طول E ٢٤° ١٧' ٢٨° حتى دائرة عرض N ٥٦° ١٥' وخط طول E ٢٩° ٢٩' ٢٨°، لمسافة قدرها ٤٠ كم. أما عن العرض فيتباين بوجه عام من مكان لآخر وفقا لتوافر الرمال وطبوغرافية قاع المنخفض ومقدار التباعد بين نطاقات الكثبان، ويوضح جدول (٦) متوسط عرض تلك النطاقات في بحر رمال الفرافرة (من الشرق للغرب)، وذلك عند دائرتى عرض ٤٩° ٢٦' و ٣° ٢٦' شمالا. ونستنتج من الجدول أن متوسط عرض نطاقات الكثبان المركبة والمعقدة يتراوح بين ١,٣ - ٦,٨ كم، بمتوسط عام يصل ٢,٩٤ كم.



شكل (١٣) : تداخل الكثبان في نمط شبكى في بحر رمال الفرافرة، حيث تظهر الصورة العليا (أ) تطور الكثبان الطولية ذات القمم المتعرجة عن الحافات الرملية المستعرضة، كما تظهر الصورة السفلى (ب) الألسنة والأهلة التي تميز الحافات المستعرضة مع تعدد الصبابات.
المصدر: Google Earth.

جدول (٦) : متوسط إتساع نطاقات الكثبان الرملية في بحر رمال الفرافرة (من الشرق للغرب).

عند دائرة عرض ٢٦°٤٩ شمالاً					
النطاق	العرض (كم)	النطاق	العرض (كم)	النطاق	العرض (كم)
١	٧,٦	٢	٣,٢	٣	٢,٨
٤	٢,٢	٥	٠,٩	٦	٢,٥
٧	٦,٨	٨	٢,٦	٩	٢,٤
١٠	٢,٤	١١	٤,٦	١٢	١,٦
١٣	٢	١٤	٣,٨	١٥	١,٦
عند دائرة عرض ٢٦°٠٣ شمالاً					
النطاق	العرض (كم)	النطاق	العرض (كم)	النطاق	العرض (كم)
١	١,٣	٢	١,٨	٣	٢,٥
٤	١,٦	٥	٤,٧	٦	٢,٧
٧	١,٣	٨	١,٦	٩	٣,٢
١٠	٥,٣				
متوسط عام					٢,٩٤ كم

المصدر: قيست من موزايك الصور الفضائية لاندسات-٧.

وتتفصل نطاقات الكثبان الرئيسية فيما بينها بممرات corridors تخلو أحيانا من الرمال، إذ قد يظهر من خلالها قاع المنخفض الصخري محليا ممثلا في التكوينات الطباشيرية المتأثرة بفعل الرياح. أو قد يغطيها فرشاة من الرمال الخشنة (٠,٥ - ١ مم) والحصى الأسود (٢ - ٤ مم) متوسط الإستدارة (٠,٥). ويتراوح مقدار التباعد بين هذه النطاقات في بحر رمال الفرافرة بين ٠,١٨ - ١,٣ كم، بمتوسط قدره ٠,٦٢ كم قيست من الصور الفضائية. وكثيرا ما تختفى الممرات الفاصلة بين نطاقات الكثبان نتيجة لتلاحم الكثبان جانبيا، ومن ثم تبدو على هيئة سطح رملي مموج، خاصة في الأجزاء الوسطى من بحر الرمال.

خامساً - التجمعات الرملية الثابتة :

كثبان تغطيها قشرة رملية خارجية متماسكة الحبيبات بسمك يصل نحو ١,٥ مترا في المتوسط، ويبدو مظهرها متائرا بعمليات النحت والتقطيع، كما ينمو على سطحها بعض الأعشاب والشجيرات. ويعتبر هذا النوع هو الأقل إنتشارا في بحر رمال الفرافرة، حيث يختفى تحت أنواع الكثبان الرملية النشطة.

وقد عثر على أحد تلك التجمعات الرملية المتماسكة بارزة مكشوفة فوق سطح الأرض إلى الجنوب من الطريق المؤدى إلى منطقة بئر كراوين على بعد ١٠,٥ كيلومترات إلى الشرق من قصر الفرافرة (E ٢٨° ٤٥' ٢٧' N و ٢٧° ٠٣' ٢٧'). ويبدو الشكل العام لهذا النوع من التجمعات الرملية في الفرافرة على هيئة سهل رملي متسع نسبياً (~ ١٨,٥ كم^٢) تظهر عليه علامات التقطيع. ويرتبط التوزيع الجغرافي للكثبان المتحجرة المكشوفة بالجزء الشمالي الشرقي من منخفض الفرافرة عند دائرة عرض (N ٢٧° ٠٣') حيث البدايات الأولى لبحر رمال الفرافرة، ويمتد لمسافة ٧ كيلومترات تقريبا باتجاه الجنوب الشرقي، قبل أن ينتهي تدريجياً دون وجود حافة واضحة المعالم جنوباً فوق قاع المنخفض مباشرة. ويتراوح ارتفاع هذا النوع من التجمعات الرملية المتماسكة بين ٧ - ١٠ أمتار محلياً فوق مستوى سطح الأرض المجاورة، ونحو ٨٣ متراً في المتوسط فوق منسوب سطح البحر سجلت من خلال متوسطات قراءات أجهزة الـ GPS. وقد تم حفر قطاع رأسى في رواسب هذه التجمعات المتماسكة بعمق واحد متر تقريباً من أعلى السطح، وتم توصيف رواسبه وفقاً للحجم بواسطة Grain Size Chart واللون بإستعمال Munsell Colours System وتقسيمها إلى وحدات laminas ثانوية مختلفة من أعلى لأسفل كما يوضحها جدول (٧). ويتضح من الجدول تبادل طبقات الرمال المتماسكة وعروق الجبس الأبيض على أعماق مختلفة، مما يشير إلى كون عملية التماسك قد تمت وفق دورات متبادلة من الرطوبة والجفاف الشديد. كما يشير كذلك تواجد الحصى الصغير إلى تتابع مستويات القص الريحي مع إختلاف فترات النحت والترسيب على جسم الكثيب، فتركز الحصى عند عمق معين يشير إلى سطح تآرية قديم. أما إختلاف الخصائص الشكلية لحبيبات الرمال فهو نتاج طبيعي لحركتها تحت تأثير الرياح، فالرمال الكروية قد تدرجت لمسافات طويلة تكفى لإستدارتها عكس حبات الرمال الزاوية، والتي من المرجح أنها قد جلبت من مسافات قريبة ومن ثم لم تستغرق الوقت الكافى لإستدارتها، أو أنها قد تعرضت لتكسير حوافها بفعل إرتطامها بحبيبات الرمال الأخرى. أخيراً يشير تركيز الرمال الناعمة والمتوسطة المفككة في الطبقات السفلى إلى أن عملية التماسك تمت من الخارج نحو الداخل، بمعنى أنها نتاج الرطوبة الجوية (المطر) وليس الرطوبة الأرضية. وبالمثل فقد تم رصد بقايا بعض من الكثبان الطولية الثابتة في المنطقة الواقعة إلى الجنوب مباشرة من الصحراء البيضاء (E ٢٨° ٢٩' ٤٥' و N ٢٧° ٠٧' ٥٢') على إرتفاع ١١٨ متراً فوق منسوب سطح البحر. وتحدد بقايا هذه الكثبان الطولية القديمة محاور الكثبان الحديثة التي تتماشى مع إتجاه الرياح بإنحراف قدره ٦° عن الشمال. ويميل لون الكثيب الثابت إلى اللون الداكن، حيث يسوده الرمال الخشنة (٠,٥ - ١ مم)، والتي تشكل قشرة سطحية متماسكة يصل متوسط سمكها ١٠ سم. ويقع أسفل منها مباشرة طبقة من الرمال المفككة الناعمة (> ٠,٥ مم). وتشير نتائج العمل الميدانى مع تحليل صور الفضاء من نوع ASAR أسار إلى أن هذا النوع من الكثبان المتماسكة يخفى منه مساحات واسعة أسفل الأشكال الرملية النشطة حالياً، وهى نقطة بحثية تحتاج إلى دراسة تفصيلية وحفر المزيد من القطاعات الرأسية في رواسب الكثبان القديمة والحديثة.

جدول (٧) : قطاع رأسى فى أحد التجمعات الرملية المتماسكة شمال شرق بحر رمال الفرافرة.

م	السمك	التوصيف
١	١	السطح: قشرة شديدة الصلابة من الرمال الخشنة (٠,٥ - ١ مم) صفراء اللون شبه كروية (٠,٧ - ٠,٩).
٢	٢	رمال مفككة خشنة (~ ١ مم) صفراء اللون.
٣	١٥	طبقات متبادلة من الرمال الخشنة (~ ١ مم) صفراء اللون، والحصى (< ٢ مم) الأسود.
٤	٦	رمال خشنة جدا (١ - ٢ مم) يتخللها حصى (< ٢ مم) متماسك شبه كروي (٠,٧ - ٠,٩) تختلف ألوانه بين الأبيض والأصفر المائل للحمرة و الأسود فى بعض الأحيان.
٥	١٢	رمال خشنة (~ ١ مم) صفراء اللون يسودها الشكل الكروي (٠,٩)، ونسب محدودة من الرمال قليلة إلى متوسطة الكروية (٠,٣ - ٠,٥)، يتخللها طبقة من الحصى رمادى اللون.
٦	١,٥	جيبس.
٧	٢	رمال خشنة جدا (١ - ٢ مم) يتخللها حصى (< ٢ مم) متماسك شبه كروي (٠,٧ - ٠,٩) تختلف ألوانه بين الأبيض والأصفر المائل للحمرة و الأسود.
٨	١٠	جيبس.
٩	١٣	رمال خشنة جدا (١ - ٢ مم) يتخللها حصى متماسك كروي يتراوح لونه بين الأحمر والأسود.
١٠	١	رمال مفككة متوسطة الحجم (٠,٢٥ - ٠,٥ مم)، يتدرج لونها بين اللونين الأبيض والأحمر، مع قليل من الحبيبات ذات اللون الأسود.
١١	٧	رمال خشنة جدا (١ - ٢ مم) يتخللها حصى متماسك كروي يتراوح لونه بين الأحمر والأسود.
١٢	١,٥	قشرة متصلبة من الرمال الخشنة.
١٣	٥	رمال مفككة ناعمة إلى متوسطة الحجم (> ٠,٥ مم) ، يتخللها حبيبات من الحصى الأسود المائل للحمرة.
١٤	٢	رمال مفككة متوسطة الحجم يميل لونها للون الأصفر.
١٥	٦	رمال مفككة ناعمة إلى متوسطة الحجم (> ٠,٥ مم) ، يتخللها نسب قليلة من الحصى الأسود.
١٦	٢	طبقات رقيقة من الرمال المتماسكة.
١٧	١٠	رمال مفككة ناعمة إلى متوسطة الحجم ، لونها شفاف إلى أصفر مائل للحمرة، مع القليل من حبات الرمال السوداء.

المصدر: الدراسة الميدانية، إحداثيات الموقع E ٤٥° ٢٨' ٠٤ و N ٢٧° ٣٠' ٢٧.

سادساً - المناقشة والخاتمة :

(١) بحر رمال أم حقل كثبان ؟

يعطى مصطلح بحر الرمال Sand Sea إنطباعاً عاماً عن وجود غطاء رملي متسع يخفى أسفله مساحة شاسعة من سطح الأرض، كما تنتوع بداخله الأشكال الرملية. ويعد Wilson (1973) أول من أقترح إطلاق لفظ erg على الأراضي التي تغطي الرمال نحو ٢٠% منها فأكثر، وهو يشير في لغة بدو صحراء شمال أفريقية إلى الأراضي التي تغطيها الرمال بوجه عام بكميات وفيرة، بحيث تسمح بتكوين الذراع draa أو الكثبان الضخمة mega-dunes (Goudi, 2013). ويستخدم مصطلح العرق كذلك كمرادف لمفهوم بحر الرمال (Pye & Tsoar, 2009)، على أن تغطي الرمال مساحة قدرها ١٢٥ كم^٢ على الأقل (Fryberger & Ahlbrandt 1979; Thomas, 1989). أما لو صغرت المساحة لأقل من ذلك تعرف بحقل من الكثبان، أو الفرشات الرملية في حالة عدم وجود تجمعات مميزة من الكثبان (Pye & Tsoar, 2009). ويعتمد Embabi (2004) في تحديده لبحر الرمال في مصر على المساحة ونسبة ما تغطيه الكثبان الرملية من تلك المساحة، حيث يحدد مساحة ٥٠٠٠ كم^٢ كحد أدنى لإطلاق لفظ بحر رمال عليها، شريطة أن تغطي الكثبان الرملية ما لا يقل عن ٥٠% من تلك المساحة. ووفقاً لذلك يميز (Embabi, et al., 1998, 2000) في مصر ستة بحار رملية رئيسية هي على الترتيب: ١. بحر الرمال العظيم، ٢. سهل سليمة، ٣. غرد أبو المحاريق، ٤. بحر رمال جنوب منخفض القطارة، ٥. بحر رمال الفرافرة، ٦. بحر رمال شمال سيناء.

وتغطي الأشكال الرملية في بحر رمال الفرافرة مساحة قدرها حوالي ١١,٢٨٢ كم^٢ داخل منخفض الفرافرة وحده (قيست من موزايك صور لاندسات-٧)، أي ما يمثل ٦١,٥% من إجمالي مساحة منخفض الفرافرة. وتتعدد الأشكال الرملية بين فرشات رملية، وكثبان رملية بسيطة، وأشكال رملية أخرى أكثر تعقيداً على نحو ما تبين سلفاً. وتتنظم الكثبان الرملية بوجه عام في مجموعة من النطاقات الطولية، والتي تنفصل فيما بينها بممرات تغطيها فرشات رملية متباينة السمك، وأحياناً يظهر من خلالها قاع المنخفض الأصلي. وقد قام الباحث بحساب مساحات أراضي ما بين النطاقات الرئيسية للكثبان والتي تكاد تخلو من الإرسابات الرملية من خلال موزايك صور لاندسات-٧ مع الاستعانة بـ Google Earth عالية الوضوح، وقدرت مساحتها بنحو ٦٥٠ كم^٢. بذلك فإن التكوينات الرملية تشغل وحدها ١٠,٦٣٢ كم^٢ بنسبة ٩٤,٢% من إجمالي مساحة بحر رمال الفرافرة. وينطبق المعايير التي حددها كل من Wilson (1973) و Embabi (2004) فإن الباحث يتفق تماماً مع إمبابي في إطلاق أسم "بحر رمال الفرافرة" على هذا التجمع الكبير من الأشكال الرملية في منطقة الدراسة.

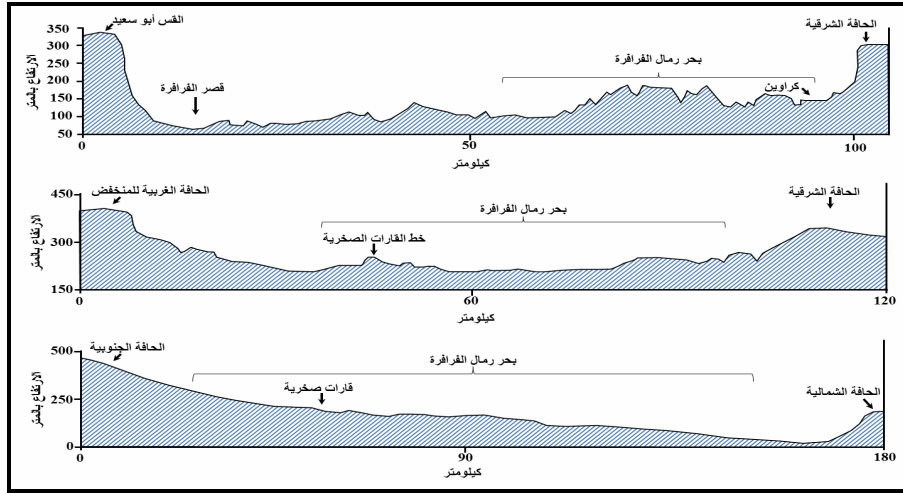
٢) العوامل التي ساهمت في نشأة بحر رمال الفرافرة :

٢-١ مورفولوجية المنخفض:

يتمد منخفض الفرافرة من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي، بإنحراف عام من الغرب للشرق بداية من دائرة عرض E ١٢ ٠٤ ٢٩°، N ٥٦ ٠٢ ٢٦°. ويوضح تحليل الخريطة الكنتورية ونماذج الإرتفاعات الرقمية أن للمنخفض حافات واضحة المعالم من جهة الشرق والشمال والغرب (شكل ١٤). وتتخذ الحافة الشرقية للمنخفض إتجاه عام شمالي غربي - جنوبي شرقي، ويقبل إرتفاعها تدريجياً من الجنوب (٣٢٩ م) إلى الشمال (٢٨٩ م) فوق منسوب سطح البحر. كما ترتفع محليا فوق قاع المنخفض بما يتراوح بين ١٠٥ متراً في الجنوب، و ١٦٤ متراً في الشمال عند بئر كراوين. ويرجع هذا التباين في إرتفاع الحافة فوق قاع المنخفض إلى قرب الكثبان الرملية من الحافة. كما تمتد الحافة الشمالية من الشرق للغرب بوجه عام تحت تأثير أحد خطوط البنية الرئيسية. ويصل أقصى إرتفاع لها إلى الشمال من وادي الأبيض ٣٠٠ م فوق مستوى سطح البحر، ويقبل الإرتفاع تدريجياً ناحية الشرق. كما أنها ترتفع محليا لنحو ١٧٥ متراً شمال منخفض الفرافرة مباشرة. أما الحافة الغربية فهي أكثر حافات المنخفض تأثراً بعوامل التعرية، ومن ثم تبدو على هيئة مجموعة من الحافات غير المتصلة تقطعها مجموعة من الأودية المنحدرة إلى قاع المنخفض. وتتخذ إتجاهها عاما من أقصى الجنوب إلى الشمال الغربي، غير أنها فعليا تتصل بالأطراف الجنوبية للمنخفض (حافة جبل شاوشاو) في شكل قوس هائل يرتبط بأحد خطوط البنية، مع ظهور فجائي لمجموعة متجاورة من القور الصخرية (قور الزقاق). والحافة الغربية مع شدة تقطعها إلا أنها أكثر حواف المنخفض إرتفاعا حيث يتراوح إرتفاعها بين ٤١١ م فوق منسوب سطح البحر جنوبا و ٢٧٢ متر في الشمال، وترتفع محليا لما يتراوح بين ١٢١ م و ٥٨ م من الجنوب إلى الشمال على الترتيب.

أما في الجنوب فلعل حافة جبل شاوشاو هي الأكثر بروزا حيث ترتفع لنحو ٤٠١ م فوق مستوى سطح البحر. ثم ترتفع الأرض تدريجياً بعد ذلك لمنسوب ٥٠٥ م فوق مستوى سطح البحر، مع بروز بعض القمم المفردة التي يصل إرتفاع بعضها إلى ٥٦٠ م فوق منسوب سطح البحر.

نخلص من ذلك أن منخفض الفرافرة في الواقع عبارة عن حوض مغلق من جميع الجهات تقريبا، ومن ثم يعد بذلك بيئة مناسبة لإصطياد الرواسب الهوائية. وتلتزم الإرسابات الهوائية الجانب الشرقي من المنخفض تحت تأثير كل من الرياح الشمالية الغربية المؤثرة، علاوة على أنها تحتل أخفض أجزاء المنخفض في الجانب الشرقي بالقرب من أقدم الحافة الشرقية.



شكل (١٤) : القطاعات التضاريسية لمنخفض الفرافرة.

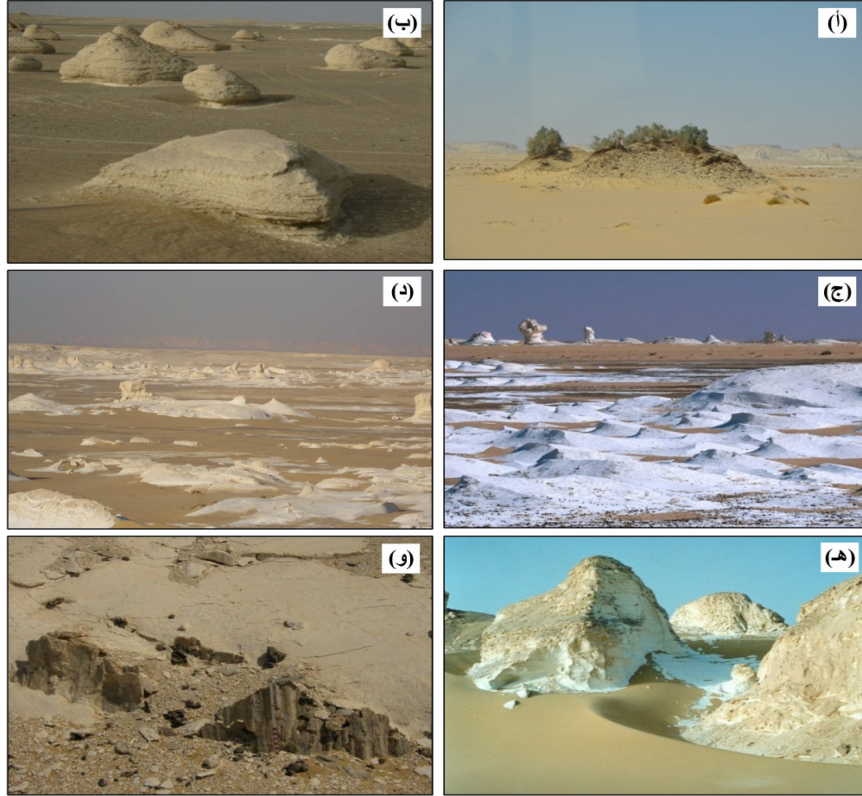
المصدر: رسمت من الخرائط الطبوغرافية ١:١٠٠,٠٠٠، مواقع القطاعات موضحة بالشكل (١).

٢-٢ خشونة قاع المنخفض :

يتميز قاع منخفض الفرافرة بالانحدارات الخفيفة بوجه عام، حيث يصل معدل إنحداره العام إلى ١ م / ٢١٠٠ م ، ومع ذلك تقطع رتابة هذا الإنبساط مجموعة من التباينات الرأسية التي تؤدي إلى تعديل مسارات تدفق الهواء سواء بالتقارب أو التباعد، كما ينشأ عنها حركة حلزونية eddy motion للهواء حول العقبات. ويمكن أن نصف خشونة السطح في قاع منخفض الفرافرة وفق تلك التباينات الرأسية على النحو التالي (شكل ١٥):

- **سطوح دقيقة الخشونة** : تتراوح خشونة السطح في هذه الفئة لأقل من ١ سم وحتى ١ م، حيث تمثلها الحزوز والخدوش الناتجة عن نحت الرياح في صخور الحجر الجيري والطباشيري، والسطوح الحصوية وعروق الكالسيت والجبس البارزة من قاع المنخفض، والتجمعات النباتية التي تتشكل خلفها بعض النباك والتموجات الرملية.
- **سطوح متوسطة الخشونة** : وتتراوح فيها خشونة السطح بين ١ - ٥ م، وتضم تلال الينابيع وبقايا البلايا الطينية والكدوات الصخرية وبقايا الأعمدة الكارستية المتآكلة مثل الصحراء البيضاء.
- **سطوح عالية الخشونة (< ٥ م)** : وتضم القور الصخرية والتلال المتبقية عن تراجع حواف المنخفض والتي تؤدي إلى ظهور كتبان العقبات الطبوغرافية.

وحسب دراسة كل (Bagnold (1941) & Belly (1964) فإن ٠,٣ سم من خشونة السطح تكفي لتكوين الكتبان الرملية، حيث تؤدي هذه التباينات المحلية الدقيقة إلى تقليل سرعة القصر الريحي، وظهور أنماط مختلفة من تدفق وإنسياب الرياح المحملة بالرمال، يصاحبها تعدد وتنوع للأشكال الرملية.



شكل (١٥) : المظاهر التضاريسية السائدة في قاع منخفض الفرافرة: (أ) تلال الينابيع القديمة، (ب) بقايا سهول البلايا، (ج- د- هـ) بقايا السطوح التحتاتية الناتجة عن تآكل صخور الطباشير بفعل الرياح، (و) عروق الكالسيت.

٢-٣ التغيرات المناخية وتقدير عمر الرواسب الرملية :

أوضحت الدراسة الحالية أن الكتبان الرملية في بحر رمال الفرافرة تتكون من وحدتين أساسيتين، الوحدة العليا وتمثلها الكتبان الحديثة أو النشطة، والوحدة السفلى وتمثلها ظهور الحيطان أو الأذرع البلايستوسينية. ويحتاج تكوين هذه الأذرع إلى ظروف شديدة الجفاف يصاحبها رياح قوية، وهو ما دعى (Besler (2008 إلى القول بأن ظهور الحيطان في بحر الرمال العظيم وصحراء ناميبيا

تمثل تجمعات رملية موروثية عن فترات الجليد البلايستوسيني ، نتجت عن الرياح الشديدة بفعل التفاوت الكبير في درجات الحرارة والضغط الجوي إبان الفترات الجليدية. وتشير (Besler 2000) إلى أن الأذرع الطولية في بحر الرمال العظيم قد تكونت في الفترة من ٢٣ - ٢٠ ألف سنة قبل الآن، أي في غضون أوج الفترة الجليدية الأخيرة LGM، وهي فترة سادت فيها ظروف الجفاف الشديدة في شرق الصحراء الكبرى (Kuper & Kröpelin, 2006). بينما تكونت الأذرع العرضية في الفترة من ٢٠-١٢ ألف سنة قبل الآن (Besler, 2000).

وتشير نتائج التأريخ بواسطة Optically-Stimulated Luminescence حسب دراسة (Bubbenzer & Besler 2005) إلى أن الأذرع الرملية في بحر رمال الفرافرة قد ظهرت في الفترة من ٣٥ - ٢٨ ألف سنة قبل الآن، وأن رواسبها قد تعرضت للتعرية وإعادة الترسيب مرة أخرى reworked منذ ١٣ ألف سنة مضت، أي مع نهاية فترة فيرم الجليدية تقريبا. كما تشير دراسة (Donner et al. 1999) إلى أن الiardانج الواقعة جنوبا من قصر الفرافرة قد بدأت في التشكيل منذ ١٠ آلاف سنة قبل الآن تحت تأثير الرياح الغربية الباردة، وذلك من خلال الأدوات الأشولية التي عثر عليها فوق سطوح التذرية بين الiardانج. كما تشير الدراسة ذاتها إلى أن تأريخ قشر بيض النعام يرجع للفترة بين ٩,٠٠٠ - ٦,٠٠٠ سنة مضت (Donner et al., 1999)، أي قبل تحول الصحراء الغربية إلى ظروف الجفاف الحالي منذ حوالي ٥,٣٠٠ سنة قبل الآن (Kuper & Kröpelin, 2006; Riemer, 2009). ويتفق هذا أيضا مع ما توصل إليه Brooks (2003) من زيادة نشاط الرياح الغربية في نفس الفترة (٩,٠٠٠ - ٦,٠٠٠ سنة قبل الآن) في الصحراء الغربية، من خلال دراسته للأشكال التحاتية القديمة في بحر الرمال العظيم، وتحليل رواسب بعض الiardانج في منخفض الفرافرة بواسطة كربون -١٤.

٢-٤ ظروف الجفاف المعاصرة :

ذكرنا سلفا أن منخفض الفرافرة يقع ضمن الأقاليم شديدة الجفاف، حيث تتخفف جدا كمية الأمطار وبشكل ملحوظ عن كمية التبخر- نتح لأقل من حدود الإقليم شديد الجفاف ($P/PET < 0.05$)، وهي ظروف مثالية لنشاط الرياح الجافة. وتسود المنخفض الرياح الشمالية بوجه عام، على أن الغلبة للرياح الشمالية الغربية (٤٠,٦٩%) في معظم شهور السنة، بينما تسود الرياح الشمالية والشمالية الشرقية في شهور إبريل ومايو ويونيه فقط. وينعكس هذا بوضوح على محصلة الرياح السنوية والتي تأتي من شمال الشمال الغربي (٣٥٥°) بإتجاه جنوب الجنوب الشرقي (١٧٦°). ولهذا دور واضح في توجيه محاور الكثبان الرملية من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي، وكذلك في معدلات الحركة الشهرية المحتملة للرمال (DP) drift potential بالنسبة لوحدة الإتجاه vector

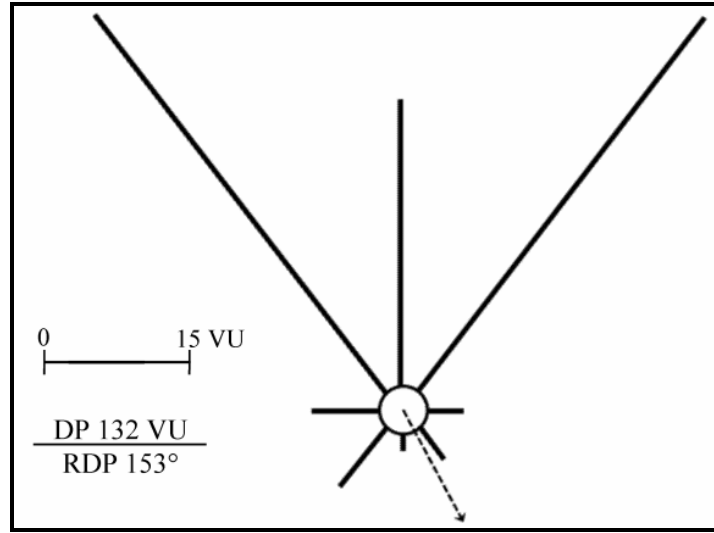
(جدول ٨) (VU) unit حيث تتراوح معدلات الحركة المحتملة بين ٨٣,٥ VU في شهر يناير و ١٧٠ VU في شهر يونيه، بمتوسط سنوي ١٣٢ VU. كما تتراوح محصلة إتجاه الحركة المحتملة للرمال شهريا بين ١٣٣ - ٢٢٥°، أى تتراوح بين الجنوب الشرقى والجنوب الغربى. وتصل المحصلة السنوية للحركة المحتملة للرمال إلى ١٥٣° بإتجاه الجنوب الشرقى لتتقارب بذلك مع إتجاه الرياح السائدة والإتجاه العام للمنخفض (شكل ١٦). أما مؤشر التغير الشهري لإتجاه حركة الرمال (IDV) index of direction variability فيتميز بتقاربه النسبى حيث يتراوح بين ٠,٩٨ - ١,٦٧ بمتوسط سنوي ١,١٦، ورغم ذلك التقارب إلا أنه المسئول عن تغير إتجاه الواجهة الحرة لقمم الكثبان الطولية بين الغرب والشرق طوال شهور السنة.

جدول (٨) : محصلة إتجاه الرياح وحركة الرمال المحتملة فى محطة الفرافرة

فى الفترة من ١٩٧٥-٢٠٠٠.

الشهر	WR	RDP	DP	IDV
يناير	١٤١°	١٤٠°	٨٣,٥	١,٦٨
فبراير	١٥٤°	١٣٣°	١٠٦,٤	١,٢٥
مارس	١٦٨°	١٤٩°	١٣٦,١٥	١,٠٩
ابريل	١٨٩°	٢٢٥°	١٥١,٣٨	١,٤٩
مايو	١٩١°	٢١٨°	١٦٠,٨٩	١,٣٥
يونيه	١٨٥°	٢١٢°	١٧٠,١٣	١,٢٥
يوليه	١٧٠°	١٥٤°	١٥٦,٢	٠,٩٨
اغسطس	١٧٦°	١٤٤°	١٤٥	٠,٩٩
سبتمبر	١٦٩°	١٥٥°	١٥٦,٩	٠,٩٨
اكتوبر	١٧٨°	١٤٦°	١٢٢,٨	١,١٩
نوفمبر	١٧٨°	١٤٧°	١١٥	١,٢٨
ديسمبر	١٧٨°	١٣٦°	٧٧,٢	١,٧٦
المتوسط السنوى	١٧٦°	١٥٣°	١٣٢	١,١٦

* الجدول من حساب الباحث من واقع المعدلات المناخية لمحطة الفرافرة فى الفترة ١٩٧٥-١٩٩٩. حيث أن: WR محصلة الرياح بإتجاه المنصرف، DPR محصلة إتجاه زحف الرمال المحتمل بالدرجات، DP معدل زحف الرمال المحتمل بالنسبة لوحدة الإتجاه (VU) vector unit، IDV مؤشر التغير فى إتجاه الرياح. (من حساب الباحث من بيانات المعدلات المناخية لمحطة الفرافرة للفترة ١٩٧٥-٢٠٠٠).



شكل (١٦) : واردة الرمال والمحصلة السنوية لحركة الرمال المحتملة لمحطة الفرافرة.
(من حساب الباحث).

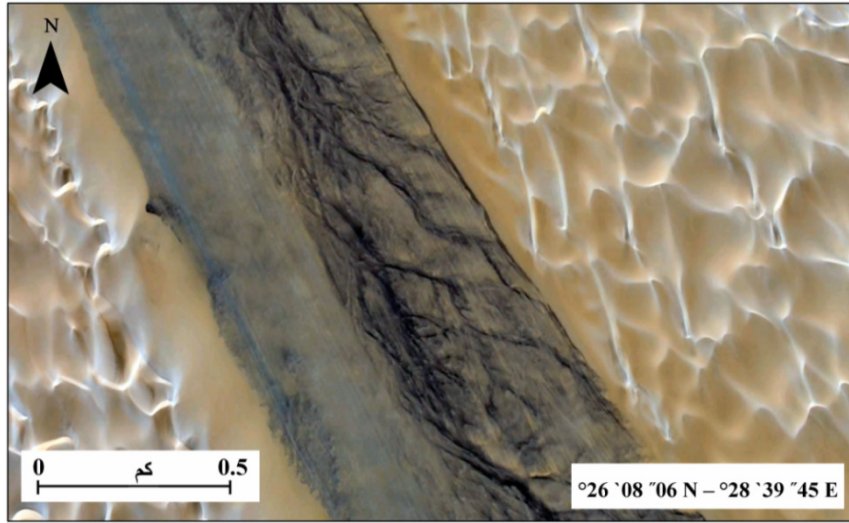
٢-٥ توافر مصادر الرمال :

يتوقف توافر الرمال على نوع وخصائص التكوينات الصخرية الغنية بها بوجه عام مثل الحجر الرملي، فضلا على نشاط فعل عوامل التحات المختلفة التي تعمل على تفكك هذه الرمال ونقلها من مصادرها وترسيبها في عدة أشكال رملية مختلفة. ويمكن من خلال بعض الدلائل التي تم رصدها في الميدان، وكذلك من خلال تحليل الصور الفضائية والخرائط أن نستنتج أهم مصادر الرمال في منخفض الفرافرة على النحو التالي:

- **مصدر محلي:** يمثل منخفض الفرافرة بمورفولوجيته أحد أحواض التصريف الداخلية المغلقة، حيث تتحدر إليه مجارى الأودية القديمة من جميع الإتجاهات دونما إستثناء تقريبا، حاملة معها الرواسب المحلية التي إشتقتها من صخور الهضاب المجاورة وحافات المنخفض، ويؤكد ذلك وجود مساحات مختلفة من سهول البلايا الطينية وتلال الينابيع والعيون المتمركزة في الجزء الشمالى من المنخفض فى عدة بقاع متفرقة. وقد لعبت سيادة ظروف الجفاف الحالى دورا هاما فى إعادة تقطيع رواسب الأودية القديمة بفعل الرياح التى قامت بإنقضاء أحجام الرمال وإعادة ترسيبها على هيئة كتبان رملية داخل الحوض. وتبدو مجارى الأودية المائية القديمة واضحة المعالم على كل حواف المنخفض الشمالية والشرقية والغربية، حيث تتراكم رواسب الأودية عند أقدام منحدراتها، فضلا عن مجارى الأودية المضفرة واضحة المعالم. أما فى الجزء

الجنوبي من المنخفض فلا زالت بقايا الأودية القديمة التي كانت تقطع المنخفض من الجنوب إلى الشمال واضحة بين نطاقات الكثبان الرئيسية كما تظهرها الصور الفضائية عالية الدقة (شكل ١٧).

▪ **مصدر خارجي:** يحظى منخفض الفرافرة كذلك بقدر لا بأس به من الرمال القادمة إليه من مناطق تقع خارج حدود المنخفض، وتحديدًا من جهة الشمال والشمال الشرقي. فالأودية المنحدرة على حافة المنخفض الشمالية والشمالية الشرقية على وجه التحديد تمتلأ بطونها بالرمال الهابطة من سطح الهضاب المجاورة لتترسب داخل المنخفض في شكل مجموعة من الكثبان الهابطة، والتي سرعان ما تتطور لأنواع أخرى من الكثبان الرملية داخل المنخفض (شكل ١٨).

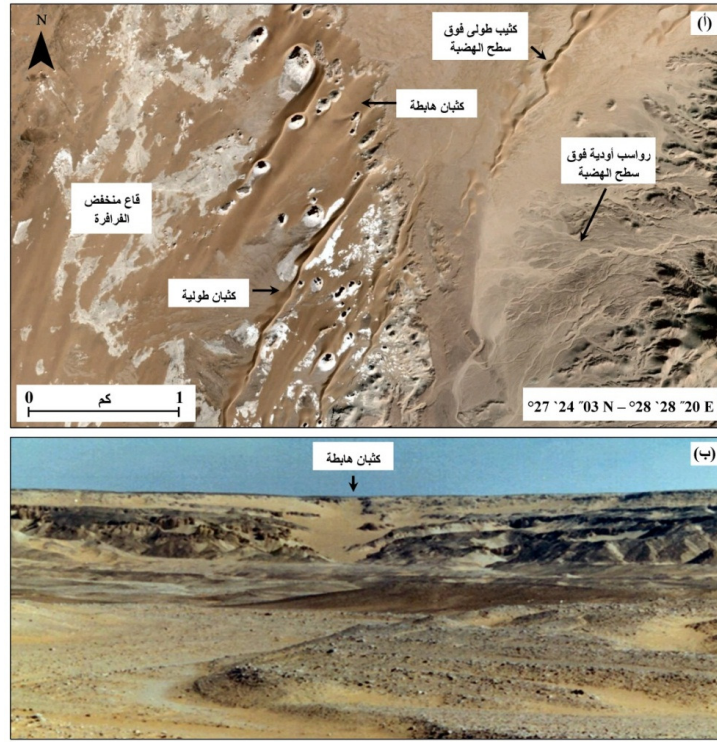


شكل (١٧) : بقايا مجارى الأودية القديمة فى الممرات الفاصلة بين نطاقات الكثبان.

المصدر: Google Earth.

٣) خصائص الرمال :

تعتمد دراسة خصائص الرمال على التحليل الميكانيكى والمعدنى والتصوير الالكترونى لعدد ست عينات من الرمال تتراوح أحجامها بين ٢٠٠ - ٢٥٠ جم، ومواقعها موضحة فى شكل رقم (١). وقد روعى أن تكون هذه العينات ممثلة لكل من قمم الكثبان الرملية وأراضى ما بين الكثبان كما يتضح فى جدول (٩).



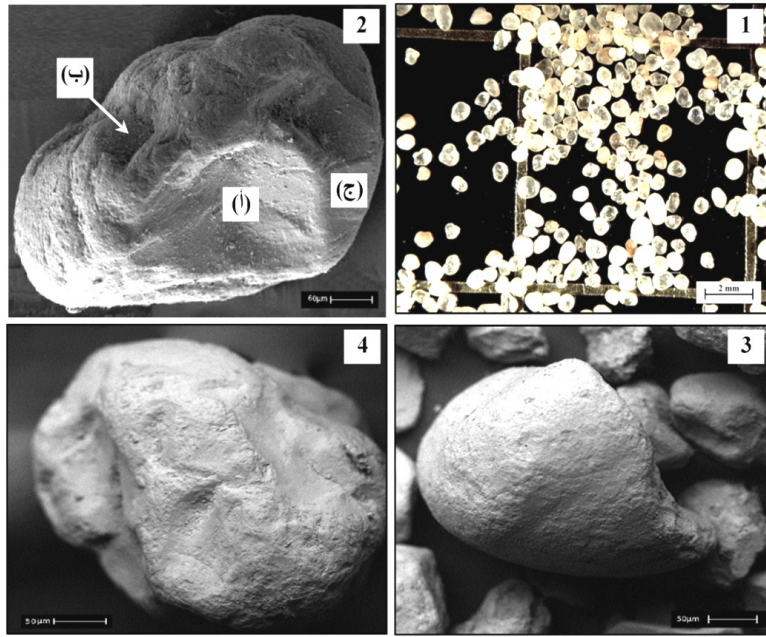
شكل (١٨) : مصادر الرمال الخارجية فى بحر رمال الفرافرة. (أ) الكثبان الهابطة من الحافة الشمالية الشرقية، (ب) الرمال الهابطة عبر أحد مجارى الأودية التى تقطع الحافة الشمالية لمنخفض الفرافرة. المصدر: Google Earth

جدول (٩) : التحليل الحجمى لعينات الكثبان الرملية فى بحر رمال الفرافرة حسب تصنيف (Folk & Ward (1957).

مج %	ناعمة جدا		رمال ناعمة		رمال متوسطة		رمال خشنة		العينة *
	Φ ٥	Φ ٤	Φ ٣	Φ ٢	Φ ١	Φ ٠	Φ ٠,٥-	Φ ١-	
١٠٠	-	١٢,٤	٣١,٤	٤٠,٥	١٥,٣	٠,٤	-	-	١
١٠٠	-	١١,٥	٣١,٩	٤٠,١	١٦,١	٠,٤	-	-	٢
١٠٠	٠,٩	٣,٤	٣,٦	٢٥	٢٦,٢	١٨,٤	١٣,٥	٩	٣
١٠٠	٠,٨	٣	٤	٢٥	٢٦,٥	١٨,٤	١٣,٢	٩,١	٤
١٠٠	٠,٢	٣,٦	٤٢,٧	٥٠,٧	٢,٨	-	-	-	٥
١٠٠	٠,٥	٤,٢	٤١,١	٥١,٢	٣	-	-	-	٦

* (١، ٢) قمم الكثبان الهلالية، (٣، ٤) أراضي ما بين الكثبان، (٥، ٦) قمم الكثبان المعقدة.

ونستنتج من هذا الجدول أن نسبة الرمال السائدة في منطقة الدراسة هي الرمال المتوسطة والناعمة (2 - 3 Φ)، ويتراوح معامل إنتواءها بين 2 - 2,15، وهي بذلك تتفق مع معامل الكثبان الرملية الرئيسية في العالم حسب دراسة Besler (2002) والذي يتراوح بين 2 - 3 Φ. أما عن شكل الحبيبات فيتراوح بين المستدير وشبه المستدير بالنسبة لعينات الرمال بوجه عام، وتمثل النسبة الغالبة 74,3%، يليها الحبيبات شبه الحادة بنسبة 14,8% وتمثل النسبة المتبقية (10,9%) الرواسب الحادة والحادة جدا (شكل 19). أما عن المحتوى المعدني فيمثل الكوارتز النسبة الغالبة (97,56%) ونسب قليلة جدا من الفلسبار والمعادن الكلسية والطينية 2,44%. أما المعادن الثقيلة فتتمثل المعادن غير المعتمدة non-opaque النسبة الغالبة (52,5%) وتضم مجموعة معادن مثل zircon , tourmaline, rutile, epidotes, pyroxene (Embabi 2000)، بينما تمثل المعادن المعتمدة opaque حوالي (47,5%).



شكل (19) : التصوير المجهرى لبعض حبيبات عينات الرمال من بحر رمال الفرافرة : (1) سيادة الحبيبات المستديرة وشبه المستديرة، (2) حبة رمال شبه مستديرة عليها حفرة حديثة ناتجة عن عمليات السحج (أ) ذات حواف حادة، وحفرة على شكل حرف V (ب)، وحزوز طولية (ج)، (3) حبة رمال مستديرة تعرضت للكسر بفعل التصادم، (4) منخفضات طولية ناتجة عمليات الاذابة على طول خطوط المكسر.

٤) الخاتمة :

قدمت الدراسة تحليلاً لخصائص الأشكال الرملية في بحر رمال الفرافرة لمعرفة سماتها الجيومورفولوجية العامة، وإلقاء الضوء على العوامل التي ساعدت على تكوينها، فضلاً عن إستنتاج المصادر الرئيسية للرمال. وقد صنفت الدراسة الكثبان الرملية في بحر رمال الفرافرة وفقاً للظروف البيئية السائدة إلى كثبان نشطة حديثة، وأخرى ثابتة متماسكة الحبيبات. أما من حيث التصنيف المورفولوجي والتوزيع الجغرافي فهناك ثمة ترتيب (هيراركى) في طبيعة الأشكال الرملية في المنخفض. وتعد الغطاءات الرملية هي أكثر الأشكال الرملية شيوعاً في المنخفض، في المقابل يندر إنتشار النباك. أما عن الكثبان الرملية فتسود الكثبان الهلالية البسيطة على الهوامش الشمالية والشرقية والغربية لبحر الرمال، حتى الهوامش الجنوبية حيث تنتهى نطاقات الكثبان الرئيسية بمجموعة من الكثبان المفردة أو المزدوجة. كما ميزت الدراسة بين عدة أنماط من الكثبان الطولية هي: الكثبان الطولية المتوازية والكثبان الطولية متعرجة القمم والكثبان المتشعبة على شكل حرف Y اللاتينى. أما كثبان العوائق الطبوغرافية فهي قليلة الإنتشار في بحر رمال الفرافرة، إذ تظهر موضعياً بفعل المظاهر التضاريسية بالقرب من هوامش المنخفض بوجه عام.

أخيراً تعد الكثبان المركبة والمعقدة (الذراع) هي الشكل الرملى الأكثر إنتشاراً في بحر رمال الفرافرة، حيث تنتظم الأشكال الرملية في مجموعة من النطاقات أو الأذرع الطولية إلى الجنوب مباشرة من دائرة عرض ٢٧°٠٣. وتتكون هذه النطاقات من وحدتين رئيسيتين هما: الوحدة السفلى وتمثلها ظهور الحيطان، ثم الوحدة العليا من الكثبان الحديثة والتي يمكن تسميتها بالذراع الهولوسينية. وتتصف الكثبان المركبة والمعقدة في بحر رمال الفرافرة بتعدد الصبابات شديدة الإنحدار، نتيجة لتداخل أكثر من نوع من أنواع الكثبان، مع تعامد الكثبان الطولية على بعضها البعض بزوايا مختلفة.

وقدمت الدراسة مناقشة لأهم العوامل التي ساهمت في نشأة بحر رمال الفرافرة ممثلة في مورفولوجية المنخفض، وخشونة السطح، والتغيرات المناخية في البلايستوسين، وظروف الجفاف المعاصرة، وتوافر مصادر الرمال. ومن خلال تلك المناقشة تبين أن ظهور الحيطان في بحر رمال الفرافرة ليست حديثة النشأة، ولكنها تمثل أحد الأشكال الرملية الناتجة عن فعل الرياح الشديدة أبان الفترات الجليدية منذ ٣٥ - ٢٨ ألف سنة مضت، ثم تعاقبت عليها دورات من الرطوبة والجفاف منذ نهاية البلايستوسين وحتى وسط الهولوسين. كما ترجح الدراسة أن المصدر الرئيسى للرمال في منخفض الفرافرة يتمثل في رواسب مجارى الأودية المحلية القديمة التي تتحدر من حواف المنخفض، علاوة على قدر من الرمال التي تصل بحر رمال الفرافرة من مصادر أخرى تقع خارج حدود منخفض الفرافرة، خاصة من جهة الشمال والشمال الشرقى.

المراجع

أولاً : المراجع العربية

١. أحمد عبد السلام على، ١٩٩٩، جيومورفولوجية الكثبان الرملية في شمال شرق منخفض البحرية، الصحراء الغربية - مصر، المجلة الجغرافية العربية (الجمعية الجغرافية المصرية)، العدد ٣٤، القاهرة، ص ص ٣٢٣-٣٦٦.
٢. صابر أمين دسوقي، ١٩٨٨، التحليل المورفومتري للكثبان الرملية الهلالية في الجزء الأدنى من حوض وادي المساجد شمالي سيناء، المجلة الجغرافية العربية (الجمعية الجغرافية المصرية)، العدد ٢٠، القاهرة، ص ص ١٣٧-١٦٠.
٣. نبيل سيد إمبابي ومحمود محمد عاشور، ١٩٨٣، الكثبان الرملية في شبه جزيرة قطر، الجزء الأول، مركز الوثائق والبحوث الإنسانية، جامعة قطر، الدوحة، ٢٤٦ ص.
٤. نبيل سيد إمبابي ومحمود محمد عاشور، ١٩٨٥، الكثبان الرملية في شبه جزيرة قطر، الجزء الثاني، مركز الوثائق والبحوث الإنسانية، جامعة قطر، الدوحة، ٢٣٧ ص.

ثانياً : المراجع الأجنبية

1. Bagnold, R. A., 1931. Journeys in the Libyan Desert, 1929 and 1930. Geogr. J. 78, 13-39, 524-533.
2. Bagnold, R.A., 1941. The physics of blown sand and desert dunes, Chapman and Hall, London, 265 p.
3. Belly, P.Y., 1964. Sand movement by wind, with Addendum 2, by Abdel-Latif Kadib: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Eng. Research Center Tech. Memo, 1-85p.
4. Besler, H., 2002. The Great Sand Sea (Egypt) during the late Pleistocene and the Holocene, Zeitschrift für Geomorphologie. N. E., Suppl.-Bd. Vol.127:1-19.
5. Besler, H., 2008. The Great Sand Sea in Egypt: formation, dynamics and environmental change: a sediment-analytical approach. Elsevier, Amsterdam, 250 p.
6. Brooks, I.A., 2003. Geomorphic indicators of Holocene winds in Egypt's Western Desert. Geomorphology, 56: 155-166.
7. Bubbenzer, O., Besler, H., 2005. Human occupation of sand seas during the early and mid-Holocene - examples from Egypt. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. -Bd., N.F. 138: 153-165.
8. Cooke, R.U., Warren, A., 1973. Geomorphology in deserts. Batsford London, 374p.

9. Donner, J.J., Ashour, M.M., Embabi, N.S., Siirianainen, A., 1999. The Quaternary geology of a playa in Farafra, Western Desert of Egypt. *Ann. Acad. Sci. Fenn., Geol.-Geogr.* 160, 49–112.
10. Embabi, N.S., 1982. Barchans of the Kharga Depression. In: F.El-Baz and T.A. Maxwell (Eds.): *desert landforms of Egypt: a basis for comparison with Mars.* NASA, Washington D.C., pp. 141–156.
11. Embabi, N. S., 1998, Sand seas of the Western Desert of Egypt. In: Al-Sharhan A. S., Glennis, K. W., Whittle, G. L. and Kendall, C. G. STC. (Eds.): *Quaternary Deserts and Climatic Change, Proc. Inter. Conference on Quaternary Deserts and Climatic Change, Al-Ain, United Arab Emirates, 9-11 Dec. 1995, Balkema, Rotterdam, 495-509.*
12. Embabi, N.S., 2000. Sand dunes in Egypt. In Soliman M. Soliman (Ed.) *Sedimentary Geology of Egypt, the Sedimentological Society of Egypt, - Cairo, Part 1: 45-87.*
13. Embabi, N. S., 2004. The geomorphology of Egypt: landforms and evolution. vol. 1, The Nile Valley and the Western Desert. *The Egyptian Geographical Society, Cairo, 447 p.*
14. Embabi, N. S., Mostafa, A.A., Mahmoud, M.A., Azab, M.A., 2012. Geomorphology of Ghard Abu Moharik Sand Sea in Egypt. *Bulletin de la Société De Géographie d'Égypte.* 85: 4-28.
15. ESA, 2007. ASAR product handbook. Available at: https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar-ProductHandbook.2_2.pdf, 564p. (Accessed: 20 October 2016).
16. Finkel, H. J., 1957. The barchans of southern Peru. *Journal of Geology*, 67: 614-647.
17. Fryberger, S.G., Ahlbrandt, T.S., 1979. Mechanisms for the formation of eolian sand seas. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, vol. 23, No. 4, pp. 440-460.
18. Fryberger, S.G., 1979. Dune forms and wind regimes. In: E.D. McKee (Ed.): *A study of global sand seas: United States Geological Survey, Professional Paper. U.S.G.S. Professional Paper*, pp. 137–140.
19. Fryberger, S.G., Goudie, A.S., 1981. Arid geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 5: 420–428.
20. Goudie, A., 2013. *Arid and semi-arid geomorphology.* Cambridge University Press, Cambridge, 454 p.
21. Hersen, P., Anderson, K.H., Elbelrhiti, B., Andreotti, B., Claudin, P. and Douady, S., 2004. Corridors of barchans dunes: stability and size selection. *Physics Review, E*, 69: 011304.
22. Holm, D. A., 1961. Desert geomorphology in the Arabian Peninsula. *Science* 132: 1369–1379.
23. Kuper, R., Kröpelin, S., 2006. Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara: Motor of Africa's Evolution. *Science*, vol. 313: 803-807.
24. Lancaster, N., 1995. *Geomorphology of desert dunes.* Routledge, London, 244 p.

25. McKee, E. D., 1979. A study of global sand seas. Geological Survey Professional Paper 1052. U.S. Government Printing, Washington, 448 p.
26. Parteli, E. J.R., Durán, O., Tsoar, H., Schwämmle, V., Herrmann, H.J., 2009. Dune formation under bimodal winds, PNAS, vol. 106 -52: 22085–22089.
27. Pye, K., Tsoar, H., 2009. Aeolian sand and sand dunes. Springer Berlin Heidelberg, 458 p.
28. Riemer, H., 2009. Risks and resources in an arid landscape: an archaeological case study from the Great Sand Sea, Egypt. In: M. Bollig, O. Bubbenzer (eds.), African Landscapes, Springer Science + Business Media, LLC, pp. 119-157.
29. Tsoar, H., Rasmussen, K.R., Sørensen, M., Willetts, B.B., 1985. Laboratory studies of flow over dunes, in Proceedings of the International Workshop on the Physics of Blown Sand (eds. O.E. Barndorff, J.T. Møller, K.R. Rasmussen and B.B. Willetts), University of Aarhus, Aarhus, Denmark, pp.327–350.
30. Wilson, I.G., 1971. Desert sand flow basins and a model for the development of ergs'. Geographical Journal, 137: 180–199.

Geomorphology of The Farafra Sand Sea

ABSTRACT

The main objective of this paper is to study the major sand forms in the Farafra Sand Sea. The study revealed the main geomorphological settings of the sand forms in the Farafra Sand Sea and shed light on the factors of dune genesis. In this study, dunes were classified in the study area according to the dominant environmental characteristics into active and lithified sand dunes. However, the morpho-geographical distribution revealed a hierarchical pattern where barchan dunes occupy the margins of the Farafra Sand Sea and the main body of the sand sea is dominated by compound and complex dunes. These compound and complex dunes are organized and reflect a specific spatial pattern of longitudinal zones or draa. It has been deduced that lithified or Pleistocene draa were formed by strong wind during the glacial stage between 35-28 ka and then it is subjected to wet and dry cycles since late Pleistocene and mid Holocene. Finally, the study deduced that the major source of sands is the local old alluvial wadi deposits, which debouch into the Farafra Depression as stated from the satellite images and field studies. Another secondary source is that sand blowing from the outside of the Farafra Depression especially from the north and north-east direction.

Key Words: Farafra Depression, Western Desert of Egypt, Farafra Sand Sea, Pleistocene Draa.