مجلة جامعة الملك سعود، م٢٠، الآداب (٢)، ص ص ٣٨٧- ٤٣٢ (٢٠٠٨م /١٤٢٩هـ)

الخواص الفيزيوكيميائية لمياه البحر الأحمر وديناميكيتها

عساف بن علي الحواس
أستاذ مساعد، قسم الجغرافيا، كلية الآداب،
جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية
alhawas@ksu.edu.sa

(قدم للنشر في ١٤٢٩/٤/٧هـ، وقبل للنشر في ١٤٢٩/١٢/٢٣هـ)

ملخص البحث. للإجابة على تساؤلات البحث فقد استخدمت مجموعة كبيرة من البيانات عن حوض البحر الأحمر، وعن مياهه. نشأة حوض البحر الأحمر التي تحاكي نشأة المحيط الأطلسي تدفع لتتبع نتائج البحوث في هذا الشأن وتلمس اتجاهات التغير وتوقعات المستقبل الجيولوجي لهذا الحوض. كما أن وضع هذا البحر الفريد وامتداده الطولي الضيق بين مناطق صحراوية جافة، جعل مياهه من أشد مياه البحار في العالم ملوحة، مما يدفع للتساؤل عن خواص مياهه، وحركتها داخله، وتبادل المياه بينه وبين البحار المتصلة به. وقد تبين من تحليل البيانات المتوفرة تميز مياه الطبقات المتوسطة والعميقة للبحر الأحمر عن غيرها. وتأثر حركة تبادل المياه بينه وخليج عدن بالتغير الموسمي في دورة المياه في شمالي المحيط الهندي. كما وجد أن كتل مياه البحر الأحمر عالية الملوحة وعالية الكثافة تتكون في أجزائه الشمالية. وأن دورة مياهه السطحية رغم ضعفها يظهر أثرها على خطوط الملوحة المتساوية في طبقة المياه السطحية.

أولاً: مقدمـــة

١ - أهمية البحث

أضفى موقع البحر الأحمر، وامتداده، وظروف نشأته على أي دراسة لأي جانب من هذه الجوانب أهميةً خاصةً. فموقعه في النطاق المداري الحار، وامتداده بين الشمال والجنوب تحف به أراض صحراوية جافة، وظروف نشأته التي تحاكي نشأة المحيط الأطلسي جعلته محل اهتمام المختصين في علوم شتى. فالمهتمون بالمياه والمختصون بإعذاب المياه المالحة يولون دراسة مياهه وحركتها وتغير نسب الملوحة فيها أهمية خاصة. فإذا وضع في الحسبان محدودية المصادر المائية في الأراضي المحيطة به، وسرعة النمو السكاني وزيادة النشاط الصناعي في هذه الأراضي والعدد الكبير لمحطات إعذاب (تحلية) مياه البحر على جانبيه فإن للدراسات في هذا المجال أهميةً حيويةً فائقة. والمعنيون بالبيئة يولون تفرد مياه البحر الأحمر باحتضان عدد كبير من المخلوقات المدارية النباتية والحيوانية عناية خاصة، فأي تغير في خواص مياهه قد يهدد استقرار هذه البيئات وقد يعرض بعض الأحياء، التي تعيش في ظروف حدية حرجة للانقراض. وكان البحر الأحمر ولا يزال محل اهتمام المختصين في علوم الأرض، وفي الجيولوجيا، وعلماء البحار والمحيطات بصفته شاهداً حياً على تباعد الصفائح التكتونية ونشأة المحيطات.

ينصب الاهتمام في هذا البحث على خواص مياه البحر الأحمر، مع التفصيل في دراسة متغيري الحرارة والملوحة من حيث التوزيع المكاني في طبقة المياه السطحية، والتغير الرأسي مع العمق ثم النظر إلى التغير الزماني الشهري والفصلي، مع الإشارة إلى بعض المتغيرات الأخرى حسب حاجة البحث. دورة المياه في البحر الأحمر ستظهر من خلال النظر إلى نمط توزيع الملوحة ومن خلال النظر إلى حركة الرياح والتغير الفصلي في اتجاهها. كما يمكن استخلاص تبادل المياه مع المحيط الهندي وحركة الكتل المائية عبر مضيق باب

المندب بالنظر إلى اتجاهات حركة المياه وتوزيع الملوحة في جنوبي البحر الأحمر وفي خليج عدن. و نظراً لصدور عدد كبير من الأبحاث الحديثة التي عنيت بإيضاح وتحليل بعض جوانب نشأة البحر الأحمر ومستقبل الحركة فيه، ولعدم توفر بعض هذه المعلومات للقارئ العربي فسنعرض في البداية لأهم ما توصلت إليه هذه البحوث بشكل مفصل.

٢- مشكلة البحث وتساؤلاته

يمتد البحر الأحمر بشكل مستطيل ضيق مابين دائرتي عرض ~ ١٢,٥° - ٢٧,٧٠° شمالاً. تحف به من الجانبين أراض صحراوية حارة جافة، فلا يوجد أنهار دائمة الجريان تصب فيه، ومعدلات التساقط السنوي منخفضة، فيفقد كميات كبيرة من المياه بالتبخر خاصة في فصل الصيف. وهذا ما جعل مياهه السطحية من أشد مياه البحار المفتوحة في العالم ملوحةً، فكان من الأهمية بمكان النظر إلى التغير في التوزيع المكاني للملوحة، ولدرجة حرارة المياه، والأكسجين المذاب، والمغذيات في هذا البحر.

يعوض العجز في الميزان المائي للبحر الأحمر تبادل المياه عبر مضيق باب المندب، منفذه الوحيد إلى خليج عدن فالمحيط الهندي. بالنظر إلى معدلات التبخر التي ترتفع خلال المدة من يونيو- أغسطس فالمتوقع نظرياً أن المياه تتدفق من خليج عدن إلى البحر الأحمر خلال هذه المدة وذلك للتعويض عن ما يفقد بالتبخر. ولكن النظر إلى دورة المياه في شمالي المحيط الهادي خلال هذه الأشهر، والنظر إلى اتجاهات حركة الرياح على البحر الأحمر يقودان إلى القول إن المياه تندفع خارجةً من البحر الأحمر نحو خليج عدن خلال هذه المدة. وهذا يقود إلى التساؤل عن الاتجاه الفعلي لحركة تبادل المياه عبر مضيق باب المندب، وهل هناك تغير فصلي ملحوظ في اتجاه تحرك المياه؟ وهل يقتصر تبادل المياه على الطبقة السطحية؟ أم أن هناك تغيراً في اتجاه تحرك المياه مع العمق.

ثانياً: منهجية البحث

١- أهداف البحث

أ) التعريف بآخر ما توصلت إليه الأبحاث والدراسات حول نشأة حوض البحر الأحمر، وتطوره، ومستقبل التغير فيه.

ب) رصد التغيرات المكانية في الخواص المحافظة (Conservative properties) لمياه البحر الأحمر خاصة درجات حرارة المياه وملوحتها وفي الخواص غير المحافظة خاصةً تركيز الأكسجين.

جـ) رصد التغيرات الفصلية في خواص مياه البحر الأحمر خاصة درجات حرارة المياه وملوحتها.

د) التعرف على دورة المياه في البحر الأحمر.

هـ) استخلاص نمط تبادل المياه بين البحر الأحمر وخليج عدن- فالمحيط الهندي.

٢- فرضيات البحث

نظراً لاتصال البحر الأحمر المحدود بالبحار المجاورة، ولامتداده الطولي الضيق بين النطاقين المداري وتحت المداري في النصف الشمالي ؛ فإنه صار حوض تركيز للمياه نتيجة لارتفاع معدلات التبخر، ونتيجة للتبريد الشتوي مما جعل مياهه السطحية من أشد مياه بحار العالم ملوحة[١] لذا يمكن صياغة الفرضيات التالية :

أ) مياه البحر الأحمر لها خصائص مميزة عن البحار المجاورة :

---

(١) S. S. Sofianos, W. E. Johns and S. P. Murray, Heat and freshwater budgets in the Red Sea from direct observations at Bab el Mandeb, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 49, Issues 7-8, World Ocean Circulation Experiment, 2002, 1323.

- الفرضية الصفرية ف١ : *مياه البحر الأحمر متجانسة في درجة حرارتها مع مياه البحار المجاورة.*
- الفرضية الصفرية ف٢ : *مياه البحر الأحمر متجانسة من حيث الملوحة مع مياه البحار المجاورة.*

ب) لوجود منفذه الوحيد في أقصى الجنوب ولامتداده الطولي بين الشمال والجنوب عبر دوائر العرض يتدرج التغير في خواص المياه من جنوبي البحر الأحمر نحو شماليه.

- الفرضية الصفرية ف٣ : *لا يوجد تغير ذو دلالة في ملوحة المياه بين شمالي البحر الأحمر وجنوبيه.*
- الفرضية الصفرية ف٤ : *لا يوجد تغير ذو دلالة في توفر المغذيات في المياه بين شمالي البحر الأحمر وجنوبيه.*

ج) تتأثر عملية تبادل المياه مع خليج عدن بالانقلاب الفصلي في دورة المياه السطحية في بحر العرب.

- الفرضية الصفرية ف٥ : *تخضع عملية تبادل المياه عبر مضيق باب المندب للوضع الداخلي ومعدلات التبخر في حوض البحر الأحمر.*

د) يمكن تلمس مظاهر حركة المياه السطحية، رغم ضعفها، من تتبع المياه المتدفقة من خليج عدن بخصائصها المميزة.

- الفرضية الصفرية ف٦ : *تمتد خطوط الملوحة المتساوية بين شرقي البحر الأحمر وغربية مستقيمة دون تعرج.*

٣- بيانات البحث

لتحقيق أهداف البحث والتحقق من صحة فرضياته جرى توظيف عدد من قوائم البيانات المناخية، وبيانات الأعماق، وبيانات خواص المياه مثل الملوحة ودرجات الحرارة وغيرها.

البيانات المناخية وبشكل خاص بيانات التساقط على البحر الأحمر إضافة إلى بيانات مصلحة الأرصاد وحماية البيئة لبعض محطات الساحل الغربي للمملكة العربية السعودية، مصدرها بيانات التساقط على البحر من بعثة قياس الأمطار المدارية Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية NASA، وبيانات المركز المناخي العالمي للتساقط Global Precipitation Climatological Center (GPCC) في ألمانيا. ويتم تقدير كميات التساقط على البحار والمحيطات من مرئيات الاستشعار من بعد بعدة تقنيات منها، قياس التفاضل في الأشعة الرادارية المنبعثة من قطرات المطر على القنوات ١٩,٣٥GHz و ٢٢,٢٣٥GHz، ومنها قياس تشتت الأشعة الصادرة من سطح الأرض بتردد ٨٥GHz.

تشكل ETOPO2 من تجميع مركز الجيوفيزياء الوطني الأمريكي قاعدة بيانات موثقة لعمق القاع. هذه القاعدة تغطي البحر الأحمر بمربعات تتوزع على درجات الطول ودرجات العرض لكل دقيقتين. قام المركز باستخلاص بيانات الأعماق من بيانات الارتفاعات من التوابع الفضائية satellite altimetry observations إلى جانب بيانات المجسات الصوتية لقياس الأعماق من السفن.

لقد جُمع لهذا البحث عددٌ من عينات المياه السطحية بغرض تحليل التغيرات المكانية على الساحل الشرقي للبحر الأحمر في نسب الملوحة. جمعت العينات من عدد من المواضع قرب الساحل الشرقي للبحر، خاصةً في أجزائه الشمالية قرب مستورة(١)، وينبع(٢)، وشرم قفافة (٣) جنوبي ضبا- الأرقام بين الأقواس تشير إلى رقم الموقع. أخذت العينات على مسافات غير كبيرة من الساحل داخل البحر، وقد روعي عند أخذها البعد عن أي مصادر خارجية قد تلوث المياه أو تؤثر في ملوحتها. وقد جرى جمع ثلاث عينات من المياه السطحية من كل موقع. وحللت العينات بطريقتين، طريقة التبخير

وطريقة التوصيل الكهربي electrical conductivity. جعل متوسط ملوحة العينات الثلاث المأخوذة من كل موقع ممثلاً لقيمة الملوحة في ذلك الموقع.

إضافة إلى عينات المياه السطحية التي قام الباحث بجمعها وتحليلها، اعتمد الجزء الأكبر من التحليل في هذا البحث على قاعدة المركز الامريكي الوطني لبيانات جغرافية المحيطات NRDC للعام ٢٠٠١م. وتشمل قاعدة البيانات الهيدروغرافية قياساً مباشراً لمتغيرات درجة حرارة المياه، وملوحتها، والأكسجين المذاب، والتشبع بالأكسجين، والمغذيات (Phosphate, Nitrate and Silicate). وقد قيست المتغيرات على السطح وللأعماق ١٠، ٢٠، ٣٠، ٥٠، ٧٥، ١٠٠، ١٢٥، ١٥٠، ٢٠٠، ٢٥٠، ٣٠٠، ٤٠٠، ٥٠٠، ....، ١٥٠٠ متر في مياه البحر الأحمر في ٢٦ موقعاً موزعة على مساحة البحر الأحمر طولاً وعرضا، بعض هذه المواقع قد يكون العمق الفعلي فيها أقل من ١٥٠٠متر.

٤- أسلوب التحليل

في الشق الأول من هذا البحث المرتبط بحوض البحر الأحمر خصائصه و نشأته وتطوره سيتم بسط نتائج عدد من البحوث الحديثة المنشورة عن البحر الأحمر للقارئ الكريم. وفي الشق الثاني سيتم التحقق من فرضيات البحث بعرض رسوم بيانية، وخرائط خطوط التساوي رأسيا وأفقيا للمتغيرات محل التساؤل، إضافة إلى إجراء الاختبارات الإحصائية المناسبة للتحقق من الدلالة الإحصائية للفروق بين البحر الأحمر والبحار المجاورة وبين قيم المتغيرات في شمالي البحر وجنوبية. سيتم التحقق من الفرضيتين ف١ و ف٢، باستخدام الطريقة التقليدية لتمييز الكتل المائية لدى المختصين بدراسة البحار والمحيطات، وذلك بالتمثيل البياني لنسبة درجة حرارة المياه إلى ملوحتها[٢]. من

(٢) R.E. Roman, and Lutjeharms, J.R.E., Red Sea Intermediate Water at the Agulhas Current termination, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Volume 54, Issue 8, August 2007, 1331.

الاختبارات الإحصائية التي ستستخدم مان وتني، وهو اختبار بسيط يعنى بالتحقق من وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين مجموعتين من البيانات، وسيستخدم للتحقق من الفرضيتين ف٣-ف٤.

ثالثاً: حوض البحر الأحمر

١- تسميته

سماه العرب القدماء والجغرافيون المسلمون بحر القُلْزُم، وسُمّي القُلْزُم لالتهامه من ركبه، والقَلْزَمَة في لغة العرب ابتلاع الشيء[٣]، وهو الذي غرق فيه فرعون وآله[٤]. يعرف حالياً بالبحر الأحمر وليس لاسمه علاقة بلون مياهه لأنها ليست حمراء. و قد يكون ذلك إشارةً إلى النشاط الفصلي لبعض أنواع الطحالب Cyanobacteria Trichodesmium Erythraeum التي تشوب مياهه السطحية بالحمرة خاصة في فصل الصيف. ويقال إن تسميته تعود لألوان الاتجاهات علي البوصلة قديماً، إذ لُوِّن الشمال باللون الأسود ومنه سمي البحر الأسود، ولُوِّن الجنوب بالأحمر ومنه جاءت هذه التسمية.

٢- خصائصه الطبيعية

البحر الأحمر مسطح مائي قاري ضيق. يفصل شبه الجزيرة العربية، في جنوب غربي آسيا، عن شمال شرقي القارة الإفريقية. ويغطي مساحةً تربو على ٤٥٠٠٠٠ كم٢، ومتوسط عمقه يبلغ ٤٩٠م. ويستطيل امتداده باتجاه شمالي غربي من مضيق باب المندب إلى شبه جزيرة سيناء لمسافة تصل إلى ١٩٨٠ كم. ويتفاوت عرضه من قرابة ٣٨٠ كم جنوب جيزان، إلى ٣٤ كم في مضيق باب المندب، ولا يتجاوز عرضه ٢٢٥ كم

(٣) محمد بن مكرم بن منظور، " لسان العرب"، دار صادر، بيروت، ١٩٩٠م، ٤٩٢.

(٤) محمد بن أحمد القرطبي، " الجامع لأحكام القرآن"، دار إحياء التراث، بيروت، ٢٠٠٢م، ٢٧١.

مقابل جدة. ويصل عمق أعمق نقطة فيه إلى ٣٠٤٠ م تحت مستوى سطح البحر. تقسمه شبه جزيرة سيناء في طرفه الشمالي إلى شعبتين، خليج العقبة في الشرق بطول يبلغ ١٧١ كم، وخليج السويس في الغرب بطول ٣٠١ كم. يرتبط البحر الأحمر من الشمال بالبحر المتوسط عبر قناة السويس، المحفورة بجهد بشري، وتمتد القناة بين خليج السويس حتى بورسعيد على البحر المتوسط لمسافة تناهز ١٤٢ كم. ويربطه من الجنوب مضيق باب المندب بخليج عدن فالبحر العربي والمحيط الهندي. ويتكون باب المندب من عدد من المظاهر الطبوغرافية المعقدة، بطول ٢٠٠ كم. يبدأ من عتبة حنيش التي لا يتجاوز عرضها ٥ كم عند القاع بعمق ١٦٠م. ثم خانق بريم بعرض ٢٠ كم وعمق ٣٠٠م، مع زيادةٍ سريعةٍ في العمق نحو خليج عدن. يظهر في قاع المضيق هنا أخدودين على شكل قناتين عميقتين يطلق عليهما القناة الشمالية، والقناة الجنوبية. تشكل القناة الشمالية المنفذ الرئيس لمياه البحر الأحمر بطول يبلغ ١٢٠ كم وعرض لا يتجاوز ٥ كم(٥).

حوض البحر الأحمر جزء من نظام صدعي يمتد من بلاد الشام في الشمال عبر حوض وادي الأردن والبحر الميت وخليج العقبة فالبحر الأحمر ومنخفض عفار فالأخدود الإفريقي الشرقي حتى جنوبي إفريقيا(٦). يتكون حوض البحر الأحمر من الناحية المورفولوجية من رفّين قاريين ضحلين على طول جانبيه، ومنخفض رئيس واسع يمتد بينهما من ١٥° شمالاً إلى أطراف شبه جزيرة سيناء (~ ٢٨° شمالاً) بعمق يراوح بين

---

(٥) Aiki Hidenori, Keiko Takahashi and Toshio Yamagata, The Red Sea outflow regulated by the Indian monsoon, Continental Shelf Research, Volume 26, Issues 12-13, Recent Developments in Physical Oceanographic Modelling: Part III, August 2006, 1450.

(٦) Alebachew Beyene, and Mohamed G. Abdelsalam, "Tectonics of the Afar Depression: A review and synthesis", *Journal of African Earth Sciences*, Volume 41, Issues 1-2, January 2005, 41.

٦٠٠ و ١٠٠٠ متر. ويمتد في وسطه منخفض محوري ضيق (عرضه < ٥٠ كم) من ١٥°-٢٤° شمالاً، يمتاز بشدة انحدار الجوانب وخشونة وعدم انتظام طبوغرافية القاع الذي يصل عمقه هنا إلى ٢٠٠٠متر[٧]. ويمتد جزؤه الجنوبي مع صدع شمال إثيوبيا الرئيس وصدع غربي خليج عدن في إطار منخفض عفار، مشكلةً نظاماً ذا ثلاثة صدوع يفصل بين الصفيحة النوبية، والصفيحة الصومالية، والصفيحة العربية[٨].

٣- نشأته وتطوره

يعود ضرب البحر الأحمر مثلاً على تباعد قارتين أو صفيحتين إلى زمن الفريد فجنر ١٩٢٩م، والبحر الأحمر، أيضاً، أحد المواضع التي شُرحت في إطار نظرية الصفائح التكتونية[٩]. تكوّن حوض البحر الأحمر؛ نتيجة لانفصال الصفيحة العربية عن الصفيحة الإفريقية خلال الإيوسين و الأوليجوسين (منذ ~٥٧-٢٤ مليون سنة) (الشكل رقم ١). ولكن التصدع الذي نتج عنه حوضي كل من البحر الأحمر وخليج عدن كان استمراراً لسلسلة من العمليات التي بدأت في العصر البرمي (٢٨٦- ٢٤٥ مليون سنة)[١٠] وأدت إلى اجتزاء شرائح من جندوانا (جزءاً من بانجايا) على طول الهوامش القارية لبحر تيثس القديم والحديث Paleo- and neotethyan continental margins. ذلك النظام التصدعي نشأ بمعزل عن حيد وسط المحيطات mid-oceanic ridges ولم يكن متصلاً به، في

---

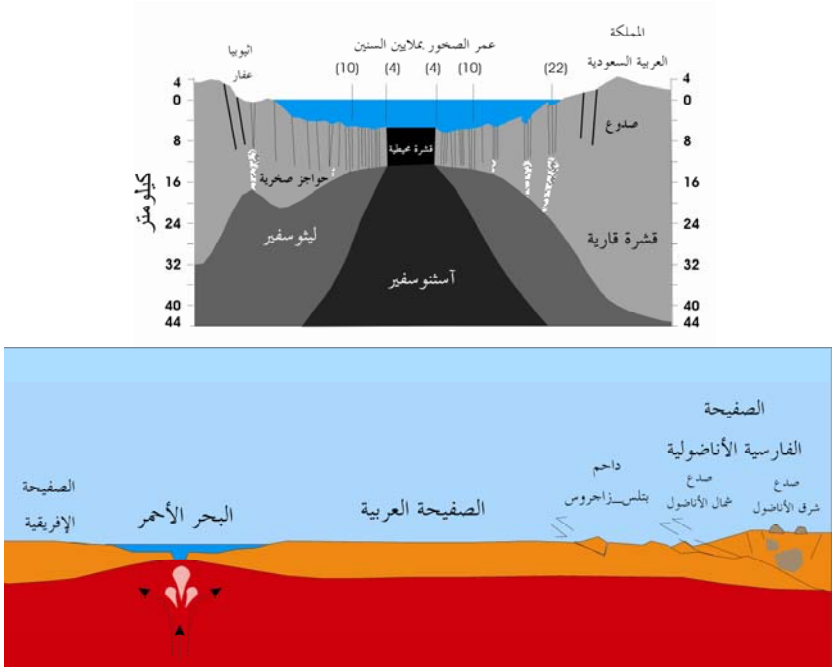
(٧) Woldai Ghebreab, "Tectonics of the Red Sea region reassessed", Earth-Science Reviews, Volume 45, Issues 1-2, November 1998, 5.

(٨) عساف بن علي الحواس، " نشأة الأحواض المحيطية من منظور نظرية الصفائح التكتونية"، رسائل جغرافية، ٣٢٧، أغسطس ٢٠٠٧م، ١٧.

(٩) Woldai Ghebreab, "Tectonics of the Red Sea…", 5.

(١٠) William Bosworth, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea and Gulf of Aden Basins", *Journal of African Earth Sciences* , Volume 43, Issues 1-3 , 2005, 335.

البداية، بل بدأ في غلاف صخري قاري تماماً. كانت بداية الزحزحة على جانبي الصدع متعامدةً على محور اتجاهه ولكنها في مرحلة لاحقة تحولت إلى مائلة. كما كان نشاط الصدع يمتد شمالاً في خليج السويس، ولكن نشوء خليج العقبة وامتداده شمالاً حتى حدود الصفيحة الأوراسية أدى إلى تجاوز خليج السويس[١١] وانغلاقه عن البحر المتوسط؛ نتيجةً لاستدارة سيناء بعكس اتجاه عقارب الساعة؛ ونتيجة لحركة الرفع التي صاحبت تلك الأحداث التكتونية.



الشكل رقم (١). قطاع عرضي لصدع البحر الأحمر، ولنحرك الصفيحة العربية

المصدر: بتصرف Ghebreab, Woldai, "Tectonics of the Red Sea….", 14 & 30.

(١١) Ibid., 335.

أربع عمليات رئيسة أدت إلى الانفصال التكتوني للصفيحة الإفريقية-العربية[١٢] على طول نظام البحر الأحمر- السويس الأخدودي:

أولاً: إغلاق نطاق أوين الصدعي شمال حيد كارلزبرق الذي نتج عن اصطدام الصفيحة الهندية بأوراسيا أجبر شمال شرقي الصفيحة الإفريقية- العربية على الانحراف محورياً توافقاً مع الصفيحة الهندية.

ثانياً: انتفاخ الركن الشمالي الشرقي من الصفيحة الإفريقية- العربية بسبب ريشةٍ حراريةٍ في وشاح الأرض تحت عفار خلال الإيوسين- الأوليجوسين(٥٧- ٢٤ مليون سنة). وتبع ذلك نشاط بركاني بدأ في الأوليجوسين[١٣].

ثالثاً: اقتراب الصفيحة العربية من الصفيحة الأوراسية حتى اصطدمت بها في منتصف الميوسين(٢٤- ٥.٣ مليون سنة)، وراوح التقاء الصفيحتين بين الاصطدام في الغرب والاندساس في الشرق.

رابعاً: تفريغ حراري وارتفاع الدرع العربي والدرع النوبي.

هناك اتفاق عام بين الباحثين على وجود قشرة محيطية حديثة على طول أجزاء من البحر الأحمر، ولكن الجدل يدور حول تحولها علي الجانبين إلى القشرة القارية[١٤]. ويمكن تلخيص التسلسل الزمني للأحداث التكتونية التي مر بها البحر الأحمر من المراجع المختصة بما يلي[١٥]:

---

(١٢) U. Schattner, Z. Ben-Avraham, M. Reshef, G. Bar-Am and M. Lazar, "Oligocene-Miocene formation of the Haifa basin: Qishon-Sirhan rifting coeval with the Red Sea-Suez rift system", Tectonophysics, Volume 419, Issues 1-4, 12 June 2006, 1.

(١٣) عساف بن علي الحواس، " نشأة الأحواض المحيطية...."، ١٨.

(١٤) Woldai Ghebreab, "Tectonics of the Red Sea…", 6.

(١٥) William Bosworth, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea…", 334-37.

زناد الحركة الصدعية الرئيس أثاره ريشة عفار قبل قرابة ٣١ مليون سنة، تزامن معه وتلاه نشاط بركاني بازلتي rhyolitic volcanism في اثيوبيا وشمال شرق السودان وجنوب غربي شبه الجزيرة العربية، نتج عنه مثلاً بازلت دروديب Derudeb basalts في السودان، وحرات حضن Harrat Hadan والسراة H. as Sirat وغربي حرة عويرض H.Uwayrd (تعرف في المصادر العربية القديمة بحرة سلامان[١٦] في المملكة العربية السعودية. ولكن أعمار الصخور في هذه الحرات تتدرج من الجنوب نحو الشمال مما يقود إلى الاعتقاد بأن الأنشطة البركانية بدأت حول الانتفاخ القبابي في الجنوب ثم أخذت في الاتساع شمالاً مابين ٣٠-٢٥ مليون سنة مضت.

في ذلك الوقت كان معظم البحر الأحمر وخليج عدن عند مستوى سطح البحر، ونطاق أوين الصدعي ممتد في المحيط الهندي، ونطاق الالتحام (التداخل القاري) بين أوراسيا وتيش يصل إلى ١٢٠كم (الشكل رقم ٢).

قبل ٢٤ مليون سنة بدأت مرحلة جديدة من النشاط البركاني وظهرت حواجز صخرية بازلتية dike swarms في الإقليم عموماً(الشكل رقم ٣). تلاها قبل ٢٠ مليون سنة مرحلة التصدع الرئيسة صاحبها رفع الجانبين وهبوط موازي زادت معه أعماق المياه بشكل سريع[١٧]. مع استمرار آلية الدفع- والسحب على طول نطاق التحام بحر تيش، الآخذ بالتناقص، مع أوراسيا امتد خليج عدن ليصل بين نطاق أوين الصدعي، بقشرته المحيطية، وعفار خلال بضعة ملايين من السنين. لقد فرض تأثر الشكل الهندسي للبحر الأحمر، في مراحله الأولى، بالبناء الصفائحي الأصلي عليه امتداداً معقداً من عفار حتى مقدمة الصدوع عند سيناء.

---

(١٦) عبدالله بن يوسف الغنيم، " أشكال سطح الأرض في شبه الجزيرة العربية في المصادر العربية القديمة"، الكويت، ٢٠٠٥م، ١٤١.

(١٧) Woldai Ghebreab, "Tectonics of the Red Sea….", 12.

الشكل رقم (٢). إعادة تمثيل من الشواهد الجيولوجية للوضع خلال الأوليجوسين

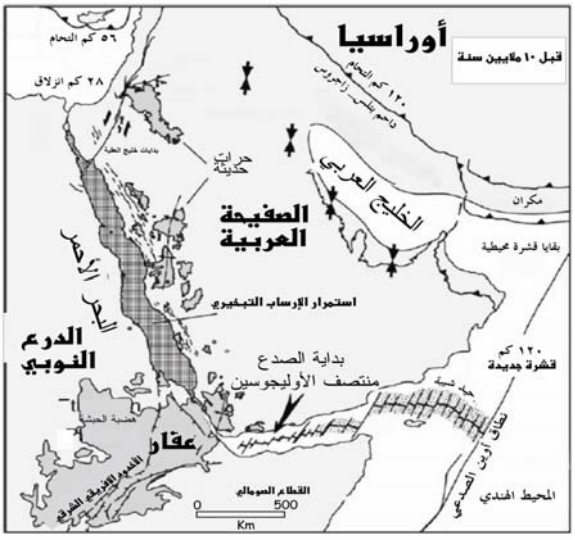
المصدر:بتصرف Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 364.

الشكل رقم (٣). إعادة تمثيل من الشواهد الجيولوجية للوضع بنهاية الأوليجوسين.

المصدر: بتصرف Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 364.

بدأ الاتساع المحيطي في حيد شيبة إلى الشرق من نطاق علولا- فارتاق الصدعي أولاً منذ ١٨-١٩ مليون سنة مضت، ليمتد بعدها غرباً متوسطاً خليج عدن قبل ١٦ مليون سنة مضت. باصطدام الصفيحة العربية مع الصفيحة الأوراسية منتصف المايوسين(قبل ~١٤ مليون سنة) جرى تحول حدي وظهرت حدود صفائحية جديدة، بحدوث صدعٍ بين سيناء والصفيحة العربية أدى إلى ربط البحر الأحمر بداحم بتلس-زاجروس. ولكن هذا الاصطدام أبطأ من سرعة الصفيحة العربية[١٨]، فأدى انضغاط سيناء شمال السويس إلى الحد من الاتصال البحري بين البحر المتوسط والبحر الأحمر الذي أصبحت بيئة الإرساب فيه تبخيرية.

استمر حيد شيبة بالاتساع وامتد غرباً بشكل سريع لما يزيد على ٤٠٠ كم في خليج عدن فوصل إلى لا توافقية شكرا-الشيخ قبل قرابة ١٠ ملايين سنة(الشكل رقم ٤).

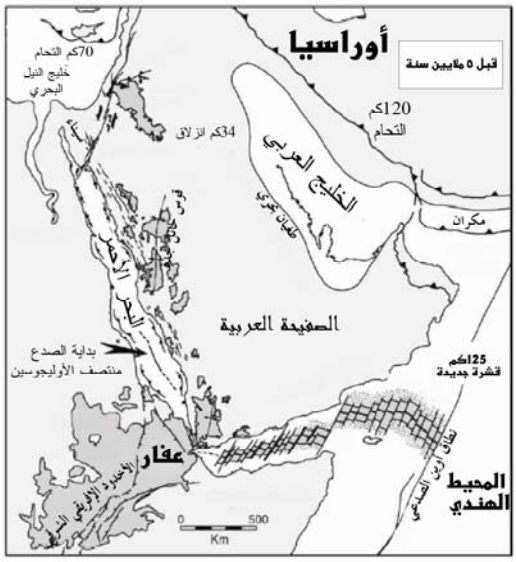


الشكل رقم (٤). إعادة تمثيل من الشواهد الجيولوجية للوضع أواخر المايوسين.

المصدر:بتصرف Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 365.

(١٨) Woldai Ghebreab, "Tectonics of the Red Sea…", 13.

تبع ذلك اتساع جنوبي البحر الأحمر وازدياد تدفق المياه البحرية إليه عبر مضيق باب المندب، فعادت بيئة الإرساب فيه من تبخيرية إلى بحرية قبل قرابة ٥ ملايين سنة(الشكل رقم ٥). بعد ذلك استمر خليج عدن بالاتساع والامتداد غرباً متجاوزاً لا توافقية شكرا- الشيخ حتى أصبح صدعاً محيطياً يتصل بالحدود الصفائحية جنوبي البحر الحمر عبر خليج تاجورا وخليج زولا فاصلاً بين دناكل وعفار.



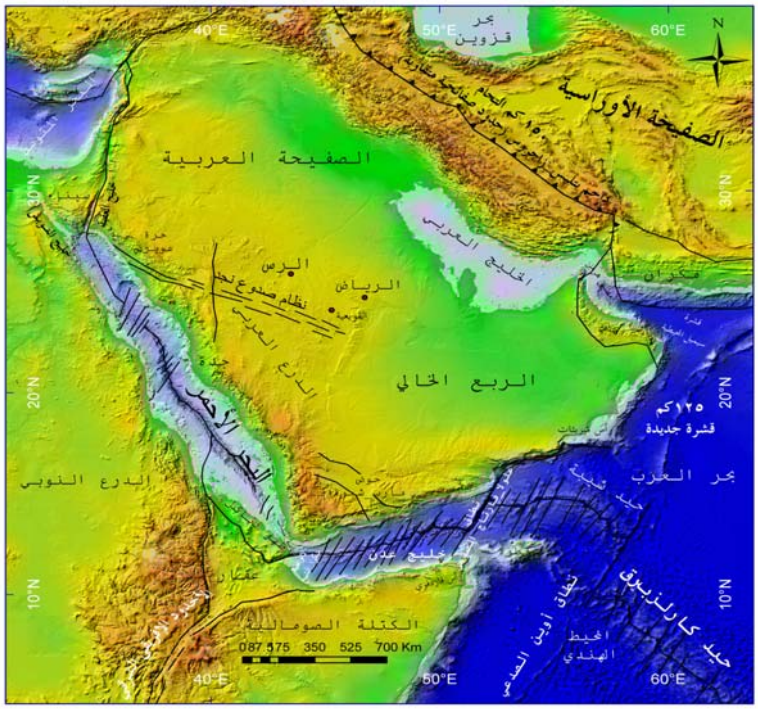
الشكل رقم (٥). إعادة تمثيل من الشواهد الجيولوجية للوضع في مايوسين- بلايوسين

المصدر:بتصرف Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 365.

حديثاً يتطور مركز الاتساع في البحر الأحمر ممتداً شمالاً ليتصل بخليج العقبة[١٩]، مع استمرار الأنشطة البركانية البازلتية القلوية في الحرات الحديثة غربي المملكة العربية السعودية واليمن وجزر البحر الأحمر الجنوبية(الشكل رقم ٦). من ذلك ما تذكره المصادر

(١٩) عبدالله بن ناصر الوليعي، "*بحوث في الجغرافيا الطبيعية للمملكة العربية السعودية* (القسم الأول): جيولوجية وجيومورفولوجية المملكة العربية السعودية"، ب ن، الرياض، ١٩٩٦م..

العربية من الثورانات البركانية وتدفق الحمم في حرة رهاط (واقم) سنة ١٢٥٦م[٢٠]، ومنها ثوران بركان جزيرة جبل الطير جنوبي البحر الأحمر سنة ٢٠٠٧م.



الشكل رقم (٦). أهم الظواهر التكتونية في الوقت الحاضر.

المصدر:بتصرف Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 365.

باستمرار العمليات التكتونية بمعدلاتها واتجاهات حركتها الحالية فالمتوقع بعد ١٠ ملايين سنة أن يوجد ٢٥٠ كم قشرة محيطية جديدة في حيد شيبة، وأن يفصل بين دناكل وعفار ١٧٠ كم من القشرة الجديدة، مع استمرار انبثاق الحرات في المنطقة عموماً (الشكل رقم ٧). بدأ ظَهْر دناكل، الذي يُعد أحياناً صفيحة صغيرة micro-plate وتُقارب

(٢٠) عبدالله بن يوسف الغنيم، " أشكال سطح الأرض..."، ١٣٨.

أبعاده ٥٠٠ كم طولاً و ١٠٠ كم عرضاً، ينفصل عن الصفيحة الإثيوبية منذ ٢٠ مليون سنة[٢١]. وفي الوقت الذي يصل فيه عرض نطاق الالتحام في داحم بتلس- زاجروس إلى ٣٠٠ كم يكون منخفض الخليج العربي فوق مستوى سطح البحر.

الشكل رقم (٧). تصور لأهم الظواهر التكتونية بعد ١٠ ملايين سنة.

المصدر: Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea ..", 365.

رابعاً: مياه البحر الأحمر

يقدر حجم المياه في حوض البحر الأحمر بحوالي ٢٢٠٥٠٠ بليون م٣. وتراوح تقديرات معدلات التبخر من مياه البحر الأحمر بين ٣,٥ – ١,٥ م سنة-١[٢٢] ولكن الرقم

(٢١) Alebachew Beyene, and Mohamed G. Abdelsalam, "Tectonics of the Afar…", 49.

(٢٢) S. S. Sofianos, W. E. Johns and S. P. Murray, Heat and freshwater budgets in the Red Sea ,1325.

الأكثر شيوعاً، بين الباحثين، للتبخر من البحر الأحمر هو ٢.١ م سنة-١. وذلك يعني أن البحر الأحمر يفقد قرابة ٩٤٥ بليون م٣ سنة-١. ولقلة حجم المياه في حوضه وارتفاع معدل التبخر منه، فإن معدل تدوير المياه Turnover rate في هذا الحوض لا يتجاوز ٣٥٠ سنة مقارنة بالمعدل العام للمحيطات البالغ ٣٠٠٠ سنة [٢٣]. يستقبل البحر الأحمر عن طريق التساقط قرابة ٢٧ بليون م٣ سنة-١، بافتراض معدل تساقط سنوي يبلغ ٦٠ملم. تتأثر مياه البحر الأحمر من حيث الملوحة والحرارة والكثافة بتكتونيته وبامتداده الطولي الضيق في بيئة مدارية ضد إعصارية قليلة التساقط، فلا يتجاوز المعدل السنوي للتساقط ٦٠ملم. تحفه من الجانبين أراضٍ صحراويةٍ جافةٍ، ولا يوجد أنهارٌ دائمة الجريان تصب فيه. وبسبب ارتفاع معدلات التبخر من مياهه السطحية فإن مصدر التعويض الرئيس عن ما يفقده بالتبخر يأتي من خليج عدن عبر مضيق باب المندب.

١- الملوحة

ترتفع معدلات ملوحة مياه البحر الأحمر السطحية كثيراً عن المتوسط العام لملوحة مياه المحيطات الذي لا يتجاوز ٣٥٪ (٣٥ في الألف). تراوح ملوحة المياه في المتوسط بين ٣٧-٣٩٪، وتبلغ أقصاها في أواخر فصل الصيف خاصةً في أجزائه الشمالية، وهو من أكثر البحار المفتوحة ملوحةً. كما ترتفع ملوحة المياه بشكل كبير في بؤر ساخنة في أعماق المنخفض المحوري في قاع البحر؛ نتيجة ارتفاع الحرارة والانبثاق البازلتي.

كانت نتائج تحليل العي نات منسجمة مع ما هو متوقع نظرياً ومع ما هو منشور في أدبيات البحث (الجدول رقم ١). ويلحظ من الجدول اتجاه نسب ملوحة المياه السطحية

---

(٢٣) عساف بن علي الحواس، " الماء في النظام الإيكولوجي"، جامعة الملك سعود، الرياض، ٢٠٠٦، ٤٧.

للارتفاع بالاتجاه شمالاً. كما يلحظ أن الزيادة ليست كبيرة جداً فالفارق بين الموقعين ١ و ٣ أقل من ١٪. ، ولكن نسب الملوحة بشكل عام عالية.

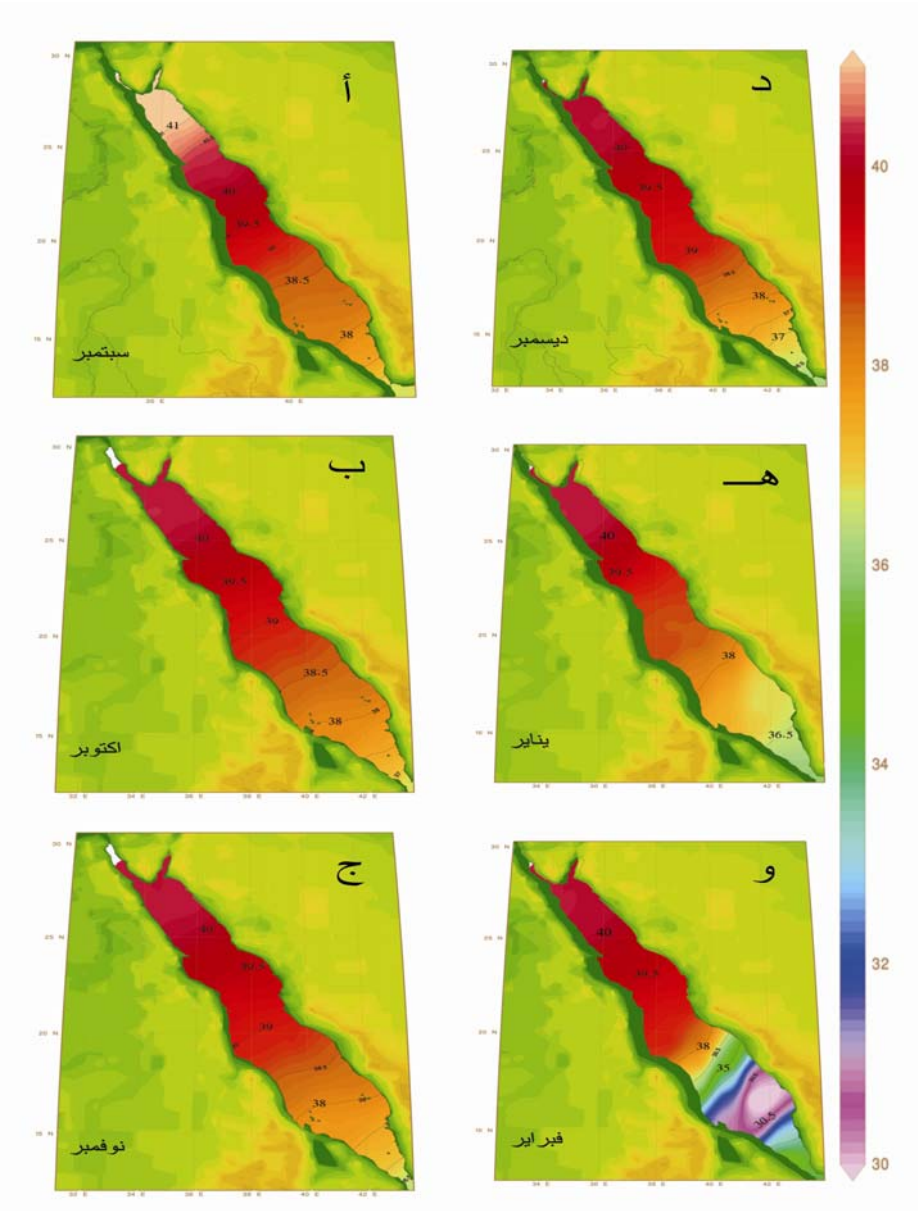
الجدول رقم (١).

رقم الموقع	الإحداثيات درجة	عدد العينات	متوسط الملوحة ٪
١	٢٣,١١° ش ؛ ٣٨,٦٨° ق	٣	٣٩,١
٢	٢٣,٩٧° ش ؛ ٣٨,٨٦° ق	٣	٣٩,٤
٣	٢٨,٤٢° ش ؛ ٣٤,٧٥° ق	٣	٤٠,٠

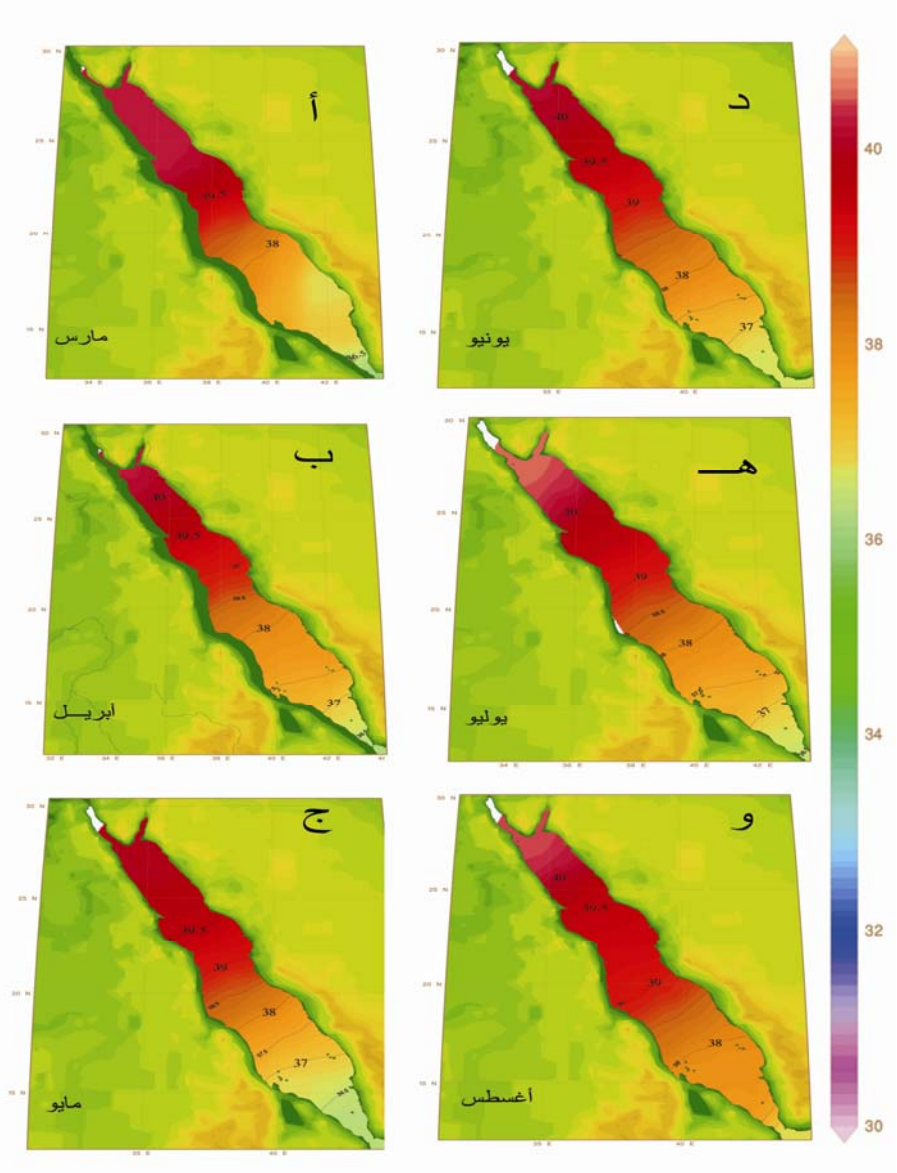
بالنظر إلى خطوط الملوحة المتساوية، من قاعدة البيانات الهيدروغرافية، لطبقة المياه السطحية خلال شهور السنة (الشكلان رقما ٨ ، ٩) يمكن أن نلحظ عموماً أن الملوحة تتدرج في الارتفاع من الجنوب نحو الشمال في كل شهور السنة. ولكن من تفحص الشكلين أعلاه يمكن استخلاص نمط التغير في ملوحة المياه السطحية خلال العام. بالنظر إلى خط الملوحة المتساوية ٣٨٪ نجده في أقصى امتدادٍ له جنوباً بنهاية الصيف وبداية الخريف في شهر سبتمبر، إذ يتقاطع حينها مع دائرة العرض ١٥° شمالاً. يأخذ بعدها بالتزحزح شمالاً خلال الشهور من أكتوبر حتى فبراير، إذ يتقاطع طرفه الشرقي مع دائرة عرض ٢٠° شمالاً في منتصف شهر فبراير قبل أن يبدأ بالتزحزح جنوباً مرةً أخرى. من الواضح أن الملوحة في المياه السطحية تبلغ أقصاها بنهاية فصل الصيف إذ تتجاوز ٤١٪. شمال دائرة عرض ٢٦° شمالاً ولا تقل عن ٣٧٪. في أقصى جنوبي البحر عند باب المندب في شهر سبتمبر. وتبلغ أدناها في الشتاء خاصة في شهر فبراير. والواقع أن جزءاً من انخفاض نسب الملوحة في الجزء الأدنى من البحر الأحمر كان بتأثير كميات التساقط

الكبيرة خلال شهر يناير ٢٠٠١م والتي تجاوزت ٦٠ملم. ولاشك أن كمية التساقط الكبيرة هذه صاحبها تدفق للمياه في البحر من الأودية المنصرفة نحوه مثل وادي بيش والأودية المجاورة أدى إلى انخفاض ملوحة الطبقة السطحية من المياه. فالملوحة في هذا الشهر تصل إلى ٣٤٪. عند باب المندب، ولكنها تنخفض أكثر إلى الشمال قليلاً عند دائرة عرض ١٧,٣٠° شمالاً، لتعود للارتفاع تجاه الشمال فتتجاوز ٤٠٪. شمال دائرة عرض ٢٥,٥° شمالاً. وقد تبين أن الفروق في الملوحة بين الشمال والجنوب ذات دلالة احصائية بتطبيق اختبار مان وتني على مجموعتي البيانات للمحطات الشمالية ونظيرته الجنوبية. وعليه يمكن رفض الفرضية الصفرية ف٣ عند مستوى دلالة ٠,٠٥.

يتبع التغير الرأسي، مع العمق، في ملوحة مياه البحار والمحيطات عادةً النمط التالي: تزداد الملوحة مع العمق عموماً وذلك لطبيعة العلاقة الطردية الموجبة بين ملوحة المياه وكثافتها، فالمياه الأشد ملوحةً تكون كثافتها أكبر فتغوص للأعماق. ومن تتبع التغير الرأسي في ملوحة المياه تعارف المختصون على تمييز ثلاث طبقات. الطبقة السطحية وهي الأقل ملوحةً، ومياهها متجانسة فلا يوجد تغير يذكر في الملوحة مع العمق نتيجة لعمليات خلط المياه وتقليبها المستمر بواسطة الأمواج. هذه الطبقة يراوح عمقها عادةً بين ١٥٠ إلى ٢٠٠ متر من السطح حسب سرعة الرياح. وتكون فيها خطوط التساوي رأسيةً أو قريبةً من الرأسية. طبقة هالوكلاين (هالو- Haline = ملوحة ؛ كلاين= انحدار) وهي طبقة التغير الرأسي السريع في الملوحة مع العمق. تبدأ هذه الطبقة أسفل طبقة المياه السطحية مباشرةً حتى عمق ١٥٠٠متر في المحيطات. تتقارب في هذه الطبقة خطوط التساوي وتمتد مائلةً أفقيةً أو قريبةً من الأفقية. ثم طبقة المياه العميقة وفيها كتل المياه العميقة المتجانسة. فتقل فيها حدة التغير الرأسي في ملوحة المياه مع العمق. تمتد خطوط التساوي فيها رأسياً أو قريباً منه.

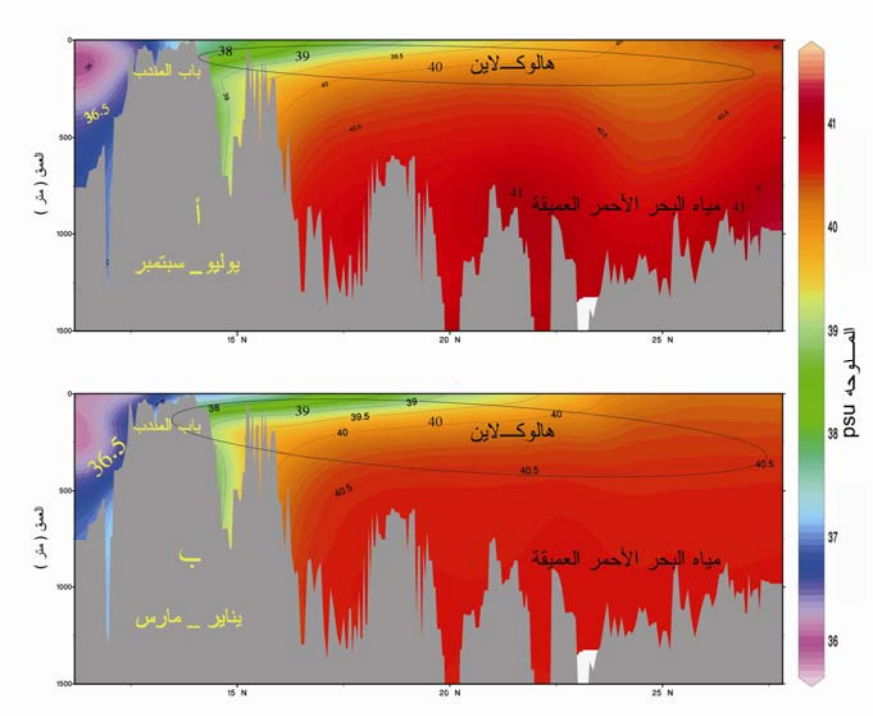


الشكل رقم (٨). خطوط الملوحة المتساوية للمياه السطحية في الخريف والشتاء.



الشكل رقم (٩). خطوط الملوحة المتساوية لطبقة المياه السطحية في الربيع والصيف.

نظراً لطبيعة التغير البطيئة في خواص طبقات المياه المتوسطة والعميقة، واستنادا إلى ما أظهرته دراسة التغير الشهري في ملوحة المياه السطحية فسيقتصر التحليل هنا على متوسط التغير الفصلي في الملوحة مع العمق في الفترتين يوليو -سبتمبر و يناير- مارس (الشكل رقم ١٠).



الشكل رقم (١٠). التغير الفصلي في ملوحة مياه البحر الأحمر مع العمق.

بالنظر إلى خطوط الملوحة المتساوية في الشكل رقم ١٠ نجد أن النمط العام هو ارتفاع ملوحة المياه السطحية من باب المندب نحو شمالي البحر الأحمر، وارتفاع الملوحة مع العمق. فالملوحة في أواخر فصل الصيف تتدرج من ٣٧٪ في الجنوب إلى ٤٠٪ على السطح في الشمال، وتتجاوز ٤١٪ في الأعماق وتتبع نفس النمط في الشتاء. طبقة المياه

السطحية قليلة العمق عموماً (~٥٠ متر) ولكن عمقها يزداد تدريجياً نحو الشمال ليتجاوز ١٠٠ متر شمالي دائرة عرض ٢٠° شمالاً. ذلك باستثناء مابين دائرتي عرض ٢٣-٢٥° شمالاً في المدة من يوليو- سبتمبر إذ يزداد عمق الطبقة السطحية بشكل واضح، ربما نتيجة لحركة الرياح النشطة خلال هذه المدة. طبقة هالوكلاين لا يتجاوز عمقها في البحر الأحمر ٥٠٠ متر وإن كانت تبدو في فصل الشتاء أكثر عمقاً. وهي أشد ملوحةً من نظيرتها في العمق في خليج عدن. يقول رومان وليتارمز[٢٤] Roman and Lutjeharms أن مياه الهالوكلاين من البحر الأحمر هي الأعلى ملوحةً، و هي الأقل في محتواها من الأكسجين مقارنةً بالكتل المائية من المحيط الهندي.

وارتفاع نسب ملوحة المياه في البحر الأحمر ناتج عن :

١- العجز في الميزانية المائية المرتبط بزيادة المخرجات المائية بالتبخر عن المدخلات بالتساقط أو التدفق من اليابس. تصل تقديرات معدلات التبخر من مياه المحيط الهندي إلى ١.٢٩م سنة-١[٢٥].

٢- محدودية تبادل المياه مع المحيطات الأخرى، لضيق وقلة عمق اتصاله الطبيعي الوحيد مع المحيط الهندي في باب المندب.

٢- درجات الحرارة

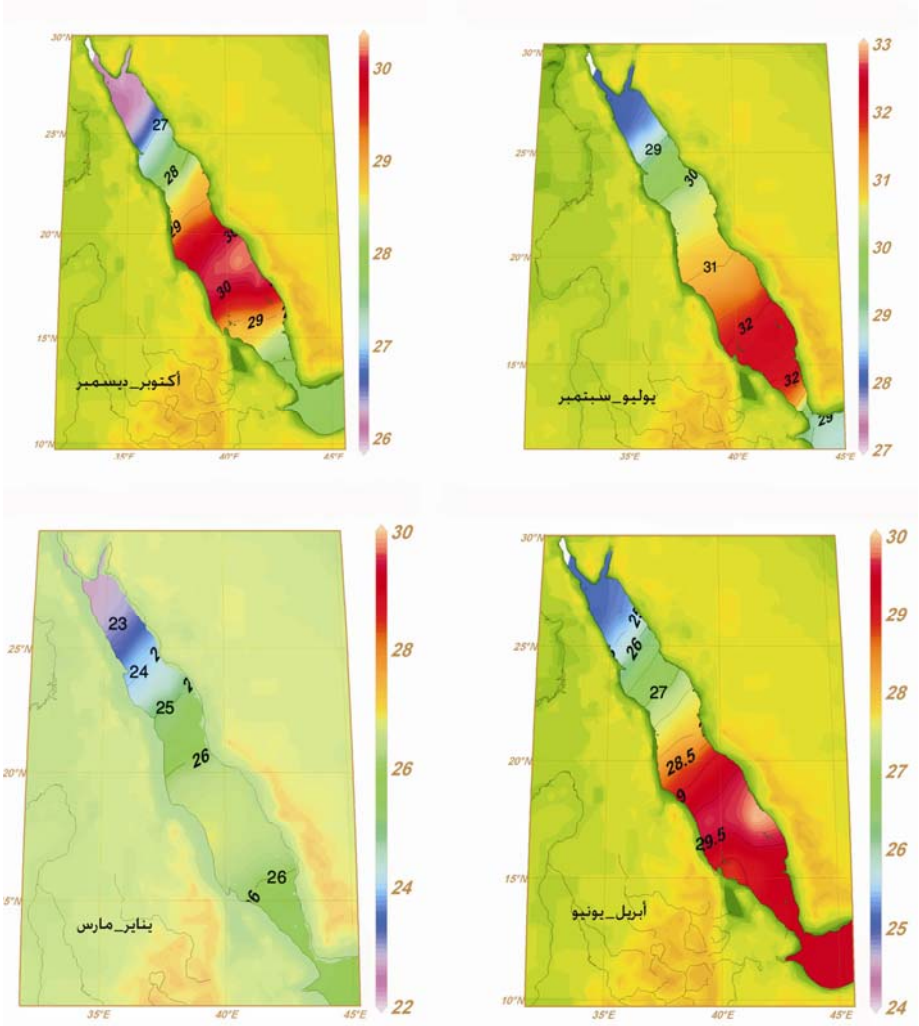
المتوسط العام لدرجة حرارة المياه السطحية يصل إلى ٢٢° مئوية، ولكن متوسطات الصيف تصل إلى ٢٦° في شماليه و٣٠° في جنوبيه. تبلغ درجة حرارة المياه السطحية أدناها في فبراير فتقل في أقصى الشمال عن ٢٣° مئوية، بل إن متوسط درجة حرارة المياه

---

(٢٤) R. E. Roman and Lutjeharms, 1329.

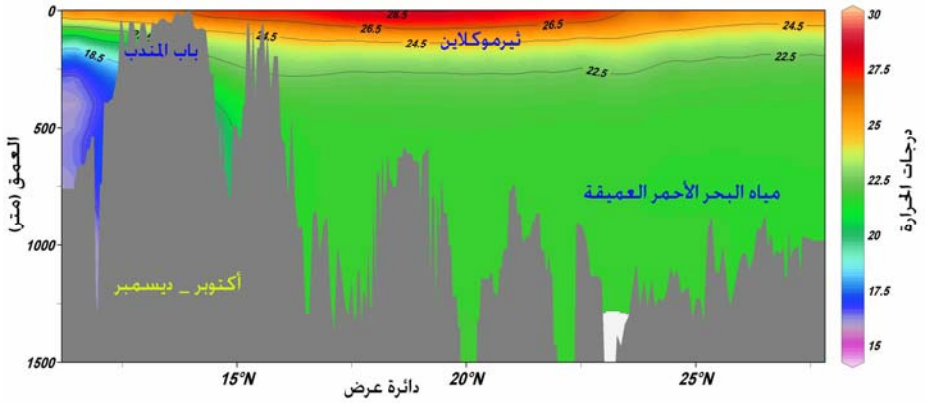
(٢٥) Jose P. Peixoto, and Oort Abraham H., "Physics of Climate", American Institute of Physics, 1992, 172.

السطحية خلال المدة من يناير- مارس يقل عن ٢٣° مئوية في الشمال ولا يتجاوز ٢٧° مئوية. والملحوظ أن أشد القطاعات ارتفاعاً في درجة الحرارة هو القطاع الأوسط مابين ١٥- ٢٠° شمالاً (الشكل رقم ١١). وهي أشد ارتفاعاً في هذا القطاع على الضفة الشرقية للبحر في الصيف (يونيو)، وعلى الضفة الغربية في الشتاء(فبراير).



الشكل رقم (١١). خطوط الحرارة المتساوية على سطح البحر الأحمر.

بالنظر إلى التغير الرأسي في درجات حرارة المياه نجدها تنخفض مع العمق عموماً، ولكنها لا تتدنى إلى أقل من ٢٠ درجة مئوية. ولا يوجد تمايز بين الفصول في موقع طبقة ثيرموكلاين ولا في سمكها، ولا في طبقات المياه العميقة، غير ما هو ملحوظ في الطبقة السطحية؛ لذا يكتفى بعرض متوسط درجة حرارة المياه مع العمق للمدة من أكتوبر- ديسمبر تجنباً للتكرار(الشكل رقم ١٢).



الشكل رقم (١٢). التوزيع الرأسي لدرجات حرارة مياه البحر الأحمر مع العمق.

٣- النشاط الحيوي

تحتضن مياه البحر الأحمر تنوعاً حيوياً مذهلاً، يتمثل في الهائمات، والأعشاب البحرية، والمانجروف، والمخلوقات المرجانية، والكثير من أنواع الأسماك المدارية. تشكل الهائمات النباتية – البلانكتون النباتي- قاعدة الهرم الغذائي في مياه البحار والمحيطات[٢٦]. و يحتاج البلانكتون النباتي phytoplankton إلى جانب الضوء للعديد من المواد المذابة في ماء البحر ليتكاثر. من هذه المواد ما هو موجود بوفرة في مياه البحار مثل ثاني أكسيد الكربون CO2، والكالسيوم Ca++، والصوديوم Na+، والبوتاسيوم K++، والماغنيسيوم

(٢٦) عساف بن علي الحواس، "*الماء في النظام الإيكولوجي*"، ص ١٤٨.

++Mg، والسلفات $SO_4^{=}$. ومنها ما يكون وجوده شحيحاً وهي ما يطلق عليها المغذيات nutrients مثل مركبات النيتروجين، والفسفور، والسيليكا. تستهلك المغذيات من طبقة المياه السطحية حيث يتوفر الضوء وينشط النمو النباتي البلانكتوني، وقلة المغذيات هي ما يحد من نمو البلانكتون النباتي في مساحات واسعة من سطح المحيطات بعيداً عن السواحل القارية خلال الصيف. قرابة ٩٠٪ من المغذيات الموجودة في خلايا البلانكتون النباتي تنطلق منه في الطبقة السطحية بعد موته وتحلل خلاياه. ولكن ١٠٪ من الخلايا لا تتحلل إلا تحت طبقة البيكنوكلاين[٢٧] حيث لا يتوافر الضوء اللازم للنشاط الحيوي فتتراكم المغذيات في الطبقات من المتوسطة حتى القاع، ولا يمكن أن تعود للدورة الغذائية المحيطية إلا بواسطة تيارات المياه الرأسية الصاعدة[٢٨]. يزداد تركز المغذيات في ماء البحر مع العمق ويقل محتواها من الأكسجين المذاب مع ضعف عمليات التمثيل الضوئي في نطاق الشفق Twilight zone. عند الحد الأعلى لطبقة المياه المتوسطة Mesopelagic على عمق ٢٠٠م تبدأ زيادة سريعة في محتوى المياه من المغذيات يناظرها انخفاض حاد في محتواها من الأكسجين نتيجةً لعدم وجود نباتات تحت عمق ١٥٠م، ولتحلل المخلفات العضوية المتساقطة من الطبقة السطحية بالأكسدة البكتيرية bacterial remineralization. في هذه الطبقة يوجد أدنى محتوى للمياه من الأكسجين وأعلى محتوى من المغذيات عند عمق يراوح بين ٣٠٠-٤٥٠م[٢٩].

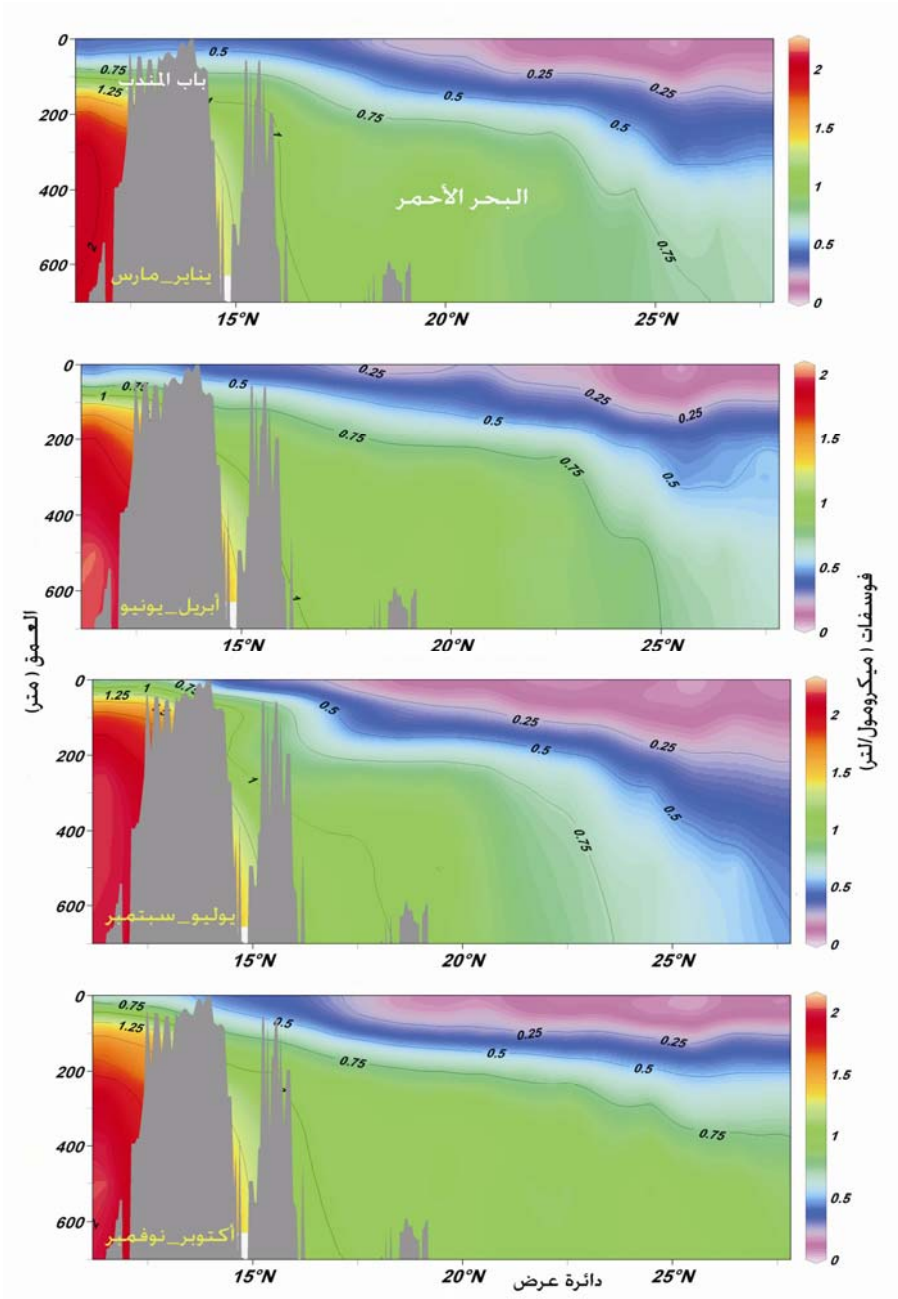
---

(٢٧) البيكنوكلاين هي نظير طبقتي الهالوكلاين والثيرموكلاين ولكن فيما يتعلق بكثافة المياه، فهي طبقة التغير الرأسي السريع في كثافة المياه، وتشكل فاصلاً فيزيائياً بين مياه الأعماق ومياه الطبقة السطحية.

(٢٨) Grant Gross, "Oceanography", Merrill, London, 1985, 124-125.

(٢٩) عساف بن علي الحواس، " الماء في النظام الإيكولوجي"، ١٣٨.

لا يختلف توزيع المغذيات في طبقات مياه البحر الأحمر كثيراً عن ما هو متوقع نظرياً. فبالنظر إلى توزيع المغذي النباتي الفوسفات phosphate PO4 ، نجده يقل في الطبقة السطحية ؛ نتيجة لاستهلاكه بالأنشطة الحيوية في نطاق التمثيل الضوئي ، ويزداد تركزه مع العمق (الشكل رقم ١٣). ولكن هذا النمط في التوزيع ليس متوازناً في شمالي البحر مع جنوبيه ، فالفقر في المغذيات في الطبقة السطحية يزداد حدةً في فصلي الصيف والخريف (يوليو- سبتمبر و أكتوبر-نوفمبر) خاصة في الأجزاء الشمالية. وفي هذه الأجزاء يزيد سمك الطبقة السطحية المستنفذة منها المغذيات خاصة في فصل الصيف ، ربما لتعامد الإشعاع الشمسي عليها وتعمق الضوء فيها أكثر. كما يلحظ تناقص تركز المغذيات في المياه العميقة (٢٠٠ م) بالاتجاه شمالاً ، عدا في فصل الربيع. هذا النمط التوزيعي له دلالاته ليس على النشاط الحيوي فحسب بل على تحرك المياه وتكوّن الكتل المائية كما سيأتي لاحقاً. وقد جرى تطبيق اختبار مان وتني للتحقق من دلالة الفروق في تركيز المغذيات بين شمالي البحر وجنوبيه ، ووجد أن القيمة المحسوبة أقل من القيمة الحرجة مما يمكننا من رفض الفرضية الصفرية ف٤. وعليه فالفروق في تركيز الفوسفات بين مياه شمالي البحر الأحمر وجنوبيه ذات دلالة إحصائية عند مستوى ٠,٠٥.



الشكل رقم (١٣). التوزيع الفصلي للفوسفات في مياه البحر الأحمر.

٤- حركة المياه

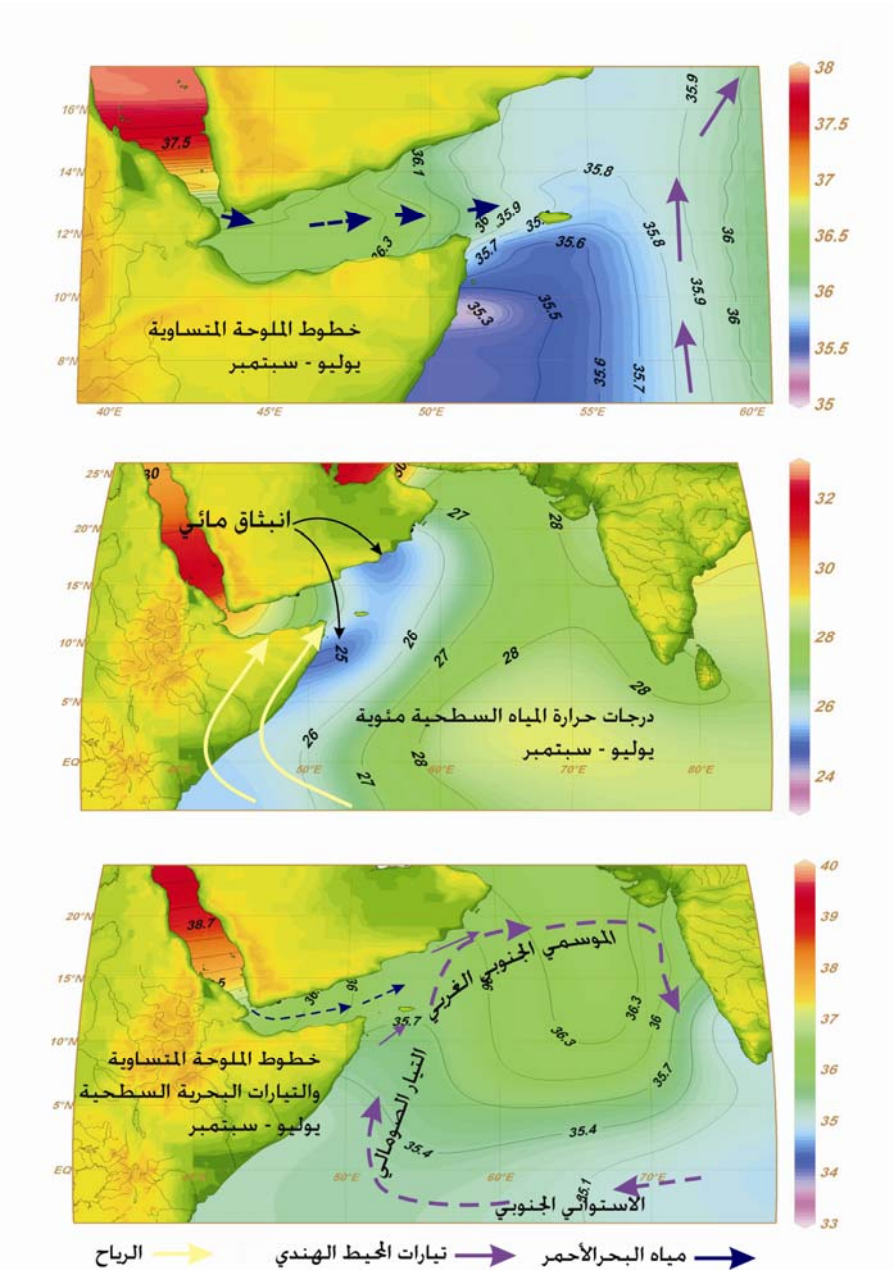
أ) حركة المياه عبر باب المندب

تتسم دورة المياه السطحية في البحر الأحمر بالنمط الموسمي لتأثرها بالرياح الموسمية. فبالنظر إلى القوانين الفيزيائية التي تحكم سرعة واتجاه تحرك المياه نسبةً للرياح الدافعة لها، مثل قوة كوريلوس ولولبية ايكمان، نجد حركة المياه السطحية في البحر الأحمر تنسجم مع انقلاب اتجاه الرياح الموسمي وانقلاب اتجاه تحرك التيارات البحرية الموسمي. إذ تتحرك المياه السطحية من خليج عدن داخلةً البحر الأحمر خلال فصل الشتاء؛ نتيجة لدوران المياه السطحية في شمالي المحيط الهندي بعكس اتجاه عقارب الساعة. ويحدث العكس تماماً حين ينقلب اتجاه دوامة شمالي المحيط الهندي صيفاً لتوافق اتجاه عقارب الساعة.وبالعودة للنظر إلى الشكل رقم (١٠أ) (يوليو- سبتمبر) فوق باب المندب وفي الجزء الظاهر من خليج عدن (في أقصى يسار الشكل) نجد خطوط الملوحة المتساوية تنحني عند السطح عائدةً نحو خليج عدن، مما يوحي بتقدم مياه الطبقة السطحية، على الأقل، من البحر الأحمر نحو خليج عدن، وهي أشد ملوحةً. وفي الشكل رقم (١٠ب) (يناير- مارس) يحدث العكس تماماً، إذ يوحي اتجاه خطوط الملوحة المتساوية بتحرك مياه الطبقة السطحية من خليج عدن، وهي أقل ملوحةً، داخلةً البحر الأحمر. في الشكل رقم (١٤) نظرة تفصيلية لخطوط الملوحة والحرارة المتساوية في باب المندب وخليج عدن، ودورة التيارات البحرية في شمالي المحيط الهندي خلال المدة من يوليو – سبتمبر. يظهر من الشكل أن الرياح التجارية الجنوبية الشرقية تنحرف إلى يمين اتجاهها بمجرد عبورها خط الاستواء، لتهب بموازاة ساحل الصومال بسرعة تراوح بين ١٠-١٥ م ث-١ ، متجهة نحو المنخفض الموسمي الآسيوي. تدفع هذه الرياح التيار الصومالي في اتجاهها وبتأثير لولبية ايكمان وقوة كوريوليس تنحرف المياه إلى يمين اتجاهها

تاركة فراغاً في الطبقة السطحية بينها وبين اليابس تسده مياه باردة منبثقة من الأعماق. نفس ظاهرة الانبثاق تحدث عند تحرك التيار الموسمي الجنوبي الغربي أمام السواحل العمانية (صلالة) بتأثير الرياح الموسمية أيضاً. بين نطاقي الانبثاق هذين أمام مدخل خليج عدن عندما تندفع المياه السطحية إلى يمين اتجاهها لنفس الأسباب تحل محلها مياه سطحية من خليج عدن وتسحب خلفها مياه سطحية من البحر الأحمر. إذاً تدفع الرياح الموسمية الجنوبية الغربية، ولولبية ايكمان مياه بحر العرب في هذا الفصل باتجاه عام جنوبي شرقي مما يسبب انخفاض منسوب سطح البحر[٣٠]. تندفع مياه خليج عدن ومياه البحر الأحمر اللذين يشهدان ارتفاعاً في منسوب مياههما رغم الفاقد بالتبخر؛ نتيجة لارتفاع محتوى مياههما الحراري في استجابة هيدروستاتيكية.

في فصل الشتاء تهب الرياح الموسمية على شمالي المحيط الهندي شمالية غربية، من الضغط المرتفع الموسمي على وسط آسيا نحو نطاق الالتقاء بين المداري Intertropical Convergence Zone (ITCZ). تدفع الرياح بالمياه السطحية في نفس اتجاهها، مما يوقع المياه المتحركة تحت تأثير قوة كوريوليس وتأثير لولبية ايكمان فتجبر على الانحراف إلى اليمين. فيندفع نطاق عريض من المياه من الشرق نحو الغرب مكوناً ما يعرف بالتيار الاستوائي الشمالي، شمال خط الاستواء حتى ١٠° شمالاً. تتراكم المياه على السواحل الشرقية لقارة إفريقيا فيرتفع منسوب المياه مما يؤدي إلى اندفاعها في الشمال

(٣٠) Lisa M. Beal, T. K. Chereskin, H. L. Bryden and A. Ffield, "Variability of water properties, heat and salt fluxes in the Arabian Sea, between the onset and wane of the 1995 southwest monsoon", Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 50, Issues 12-13, Physical Oceanography of the Indian Ocean: from WOCE to CLIVAR, July 2003, 2071.



الشكل رقم (١٤). أثر دورة المياه السطحية في المحيط الهندي على البحر الأحمر صيفاً.

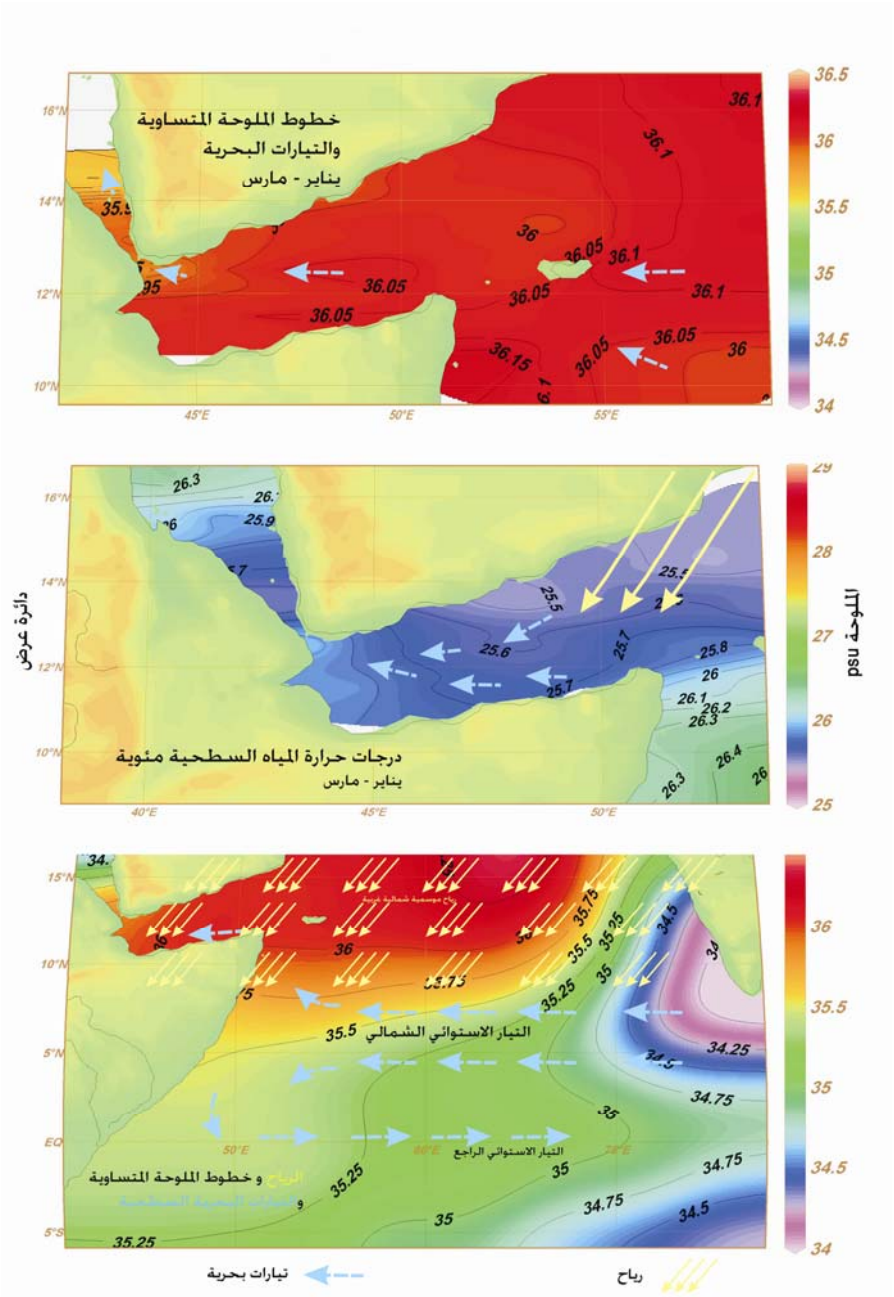
داخل خليج عدن ومن ثم البحر الأحمر، وفي الجنوب يندفع تيار راجع لموازنة سطح الماء يعرف بالتيار الاستوائي الراجع (الشكل رقم ١٥). وهذا التحليل يتفق مع كثير من النتائج والملحوظات التي سيقت في دراسات سابقة. توصلت ليزا بيل وآخرون[٣١] إلى أن الرياح الموسمية تدفع المياه إلى بحر العرب من المحيط الهندي حينما تهب شماليةً غربية، وتدفعها من بحر العرب حينما تهب جنوبيةً غربية، ويقدرون انخفاضاً في منسوب مياه بحر العرب يصل إلى ٧٠ملم في سبتمبر عنه في يونيو.

يؤيد ما ذهبنا إليه من ارتفاع منسوب البحر الأحمر في الصيف كاستجابة هيدروستاتيكية للمحتوى الحراري ما توصل إليه سوفيانوس ورفاقه[٣٢] من أن تبادل المياه بين البحر الأحمر وخليج عدن يكون في ثلاث طبقات في الصيف (يونيو – سبتمبر)، ويقتصر على طبقتين فقط باقي فصول السنة. في الشتاء تزداد سماكة طبقة الهالوكلاين في البحر الأحمر وينخفض منسوب المياه لانخفاض المحتوى الحراري، ويقتصر تحرك المياه بينه وخليج عدن على طبقتين. تتحرك مياه خليج عدن السطحية إلى داخل البحر الأحمر بملوحتها الأقل وبما تحمله من مغذيات، في حين تتحرك مياه الطبقة المتوسطة من البحر الأحمر إلى خليج عدن (الشكل رقم ١٦أ). يلحظ من الشكل أن المياه الخارجة من البحر الأحمر تنساب على قاع باب المندب، لارتفاع ملوحتها وبالتالي كثافتها، فإذا بدأ انحدار القاع نحو خليج عدن انحدرت معه حتى تصل العمق الملائم لكثافتها فتتحرك أفقياً حينئذ. في الصيف تندفع المياه من البحر الأحمر إلى خليج عدن في الطبقتين السطحية والعميقة، إذ يقل سـمك

---

(٣١) Lisa M. Beal, T. K. Chereskin, H. L. Bryden and A. Ffield, "Variability of water properties, heat and salt fluxes in the Arabian Sea……." 2071-2072.

(٣٢) S. S. Sofianos, W. E. Johns and S. P. Murray, "Heat and freshwater budgets in the Red ….", 1323.



الشكل رقم (١٥). أثر دورة المياه السطحية في المحيط الهندي على البحر الأحمر شتاءً.

الطبقة المتوسطة في البحر الأحمر ويرتفع منسوب مياه الطبقة العميقة بالتمدد الحراري فتتمكن مياهها الشديدة الملوحة من عبور عتبة حنيش خارجة من البحر الأحمر. يقابل هذا تحرك المياه في الطبقة المتوسطة داخلة نحو البحر الأحمر لموازنة الكتلة continuity of mass (الشكل رقم ١٦ب). يلحظ هنا أن مياه الطبقة السطحية الخارجة من البحر الأحمر إذا التقت نظيرتها من خليج عدن تنساب تحتها في المضيق بعمق يصل إلى ٣٠ متراً، وذلك لارتفاع كثافتها. وتنساب مياه خليج عدن السطحية الداخلة إلى البحر في الشتاء فوق المياه السطحية للبحر الأحمر للسبب نفسه. يذكر رومان وليتارمز[٣٣] أن الحد الأقصى لتدفق المياه فوق القاع في باب المندب يبلغ ٥٠٠٠٠م٣ ث-١ صيفاً، ويرتفع ليبلغ ٧٠٠٠٠٠م٣ ث-١ في الشتاء.

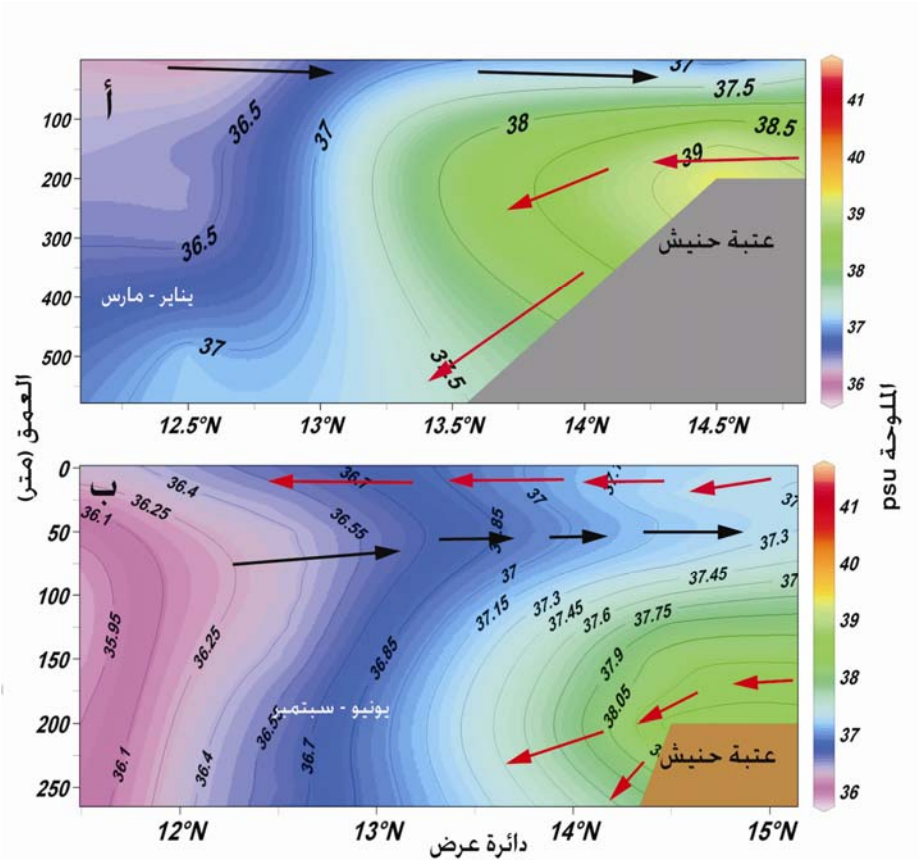
ب) حركة المياه في الداخل

لا تتوافر معلومات تفصيلية من قياسات مباشرة عن حركة المياه داخل البحر الأحمر، سواء المياه السطحية أو مياه الأعماق. ولكن بالنظر إلى النتائج المذكورة سابقاً عن حركة تبادل المياه عبر باب المندب، وبالعودة للنظر إلى الشكلين رقمي ٨ ، ٩ يمكن أن نلحظ أن ملوحة المياه السطحية دائماً أقل في شرقي البحر الأحمر عنها في غربيه. فخطوط الملوحة المتساوية تمتد مائلةً باتجاه شمالي غربي خاصة في الشهور يناير – مارس. يمكن أن نستنتج من ذلك أن المياه الأقل ملوحةً والتي تتدفق إلى البحر الأحمر عبر باب المندب تنحرف إلى يمين اتجاهها بتأثير قوة كوريوليس مما يبقي تحركها نحو شمالي البحر بموازاة ضفافه الشرقية. وفي الجهة المقابلة تتحرك مياه أشد ملوحة من شمالي البحر الأحمر نحو الجنوب بموازاة ضفافه الغربية. هذه الحركة للمياه نحو الشمال ربما تكون أكثر وضوحاً في فصل الشتاء لأن المياه الشمالية أكثر برودةً، وبالتالي انخفاض المنسوب في الشمال سيكون

---

(٣٣) R. E. Roman and Lutjeharms, 1329.

أكبر. نظراً لضعف العوامل المسببة لهذه الحركة وتذبذبها الفصلي والمكاني فإنها ضعيفة. لذا لم يلحظ لها أثر مناخي بيّن على السواحل التي تمر بها، فالمياه تتحرك ببطء مما يتيح لها التأقلم مع الظروف الحرارية لمنطقة مرورها. لذا يكون أثرها في الغالب أكثر وضوحاً على نسب الملوحة والمغذيات والعوالق التي تحملها منه على درجات الحرارة.

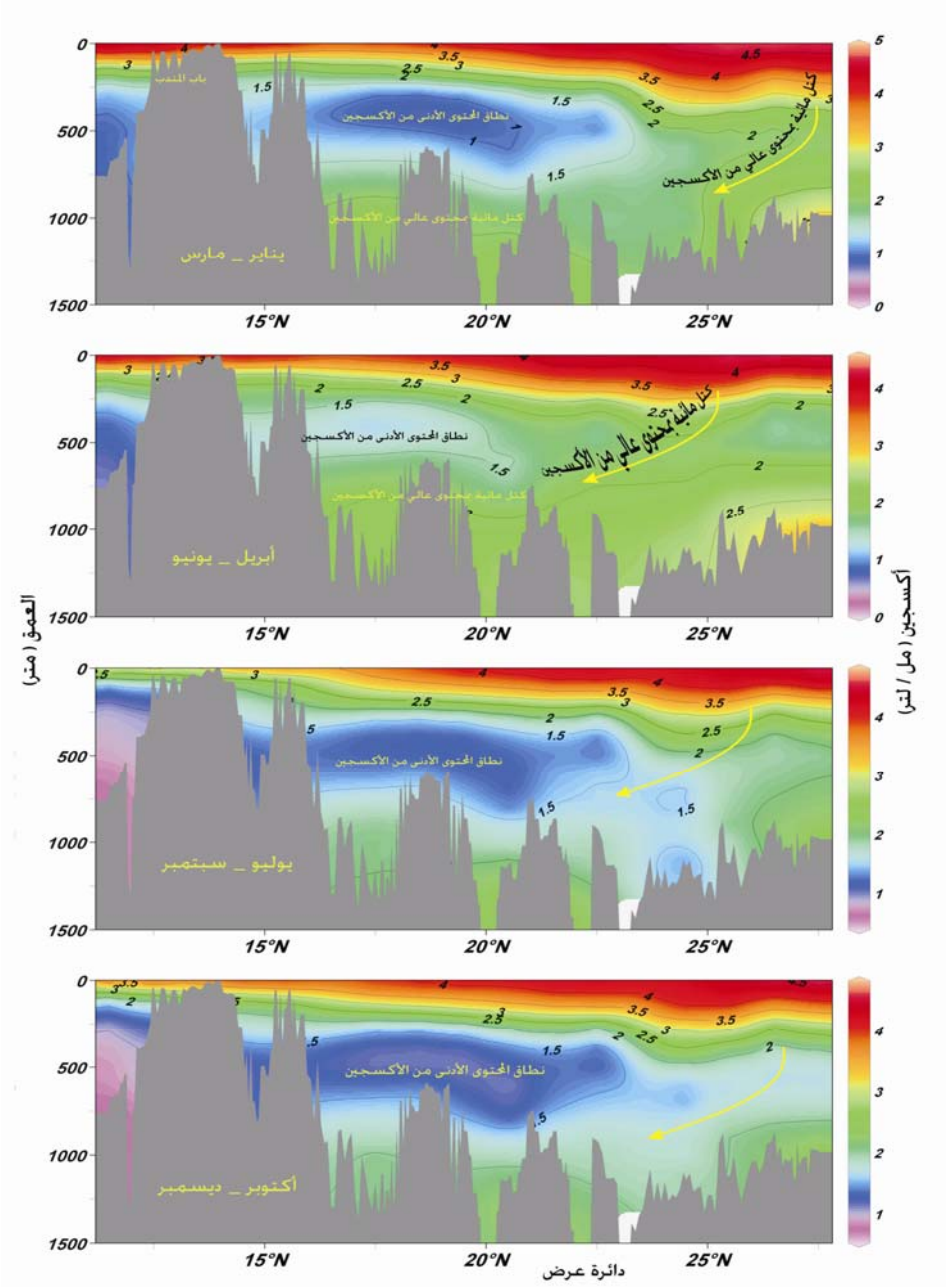


الشكل رقم (١٦). التغير الموسمي في تبادل المياه بين البحر الأحمر وخليج عدن.

٥- كتل المياه

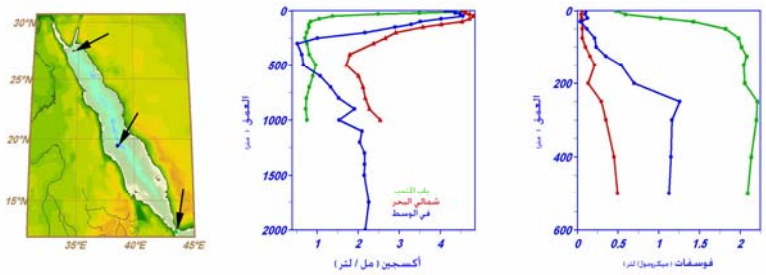
من الواضح أن البحر الأحمر حوض تركيز للمياه. وبما أن شماليه هو الأكثر عزلة عن البحار الأخرى فإن كتل مياه البحر الأحمر المتوسطة والعميقة تتكون في أجزائه الشمالية. يبدو ذلك واضحاً بالنظر إلى التوزيع الرأسي لملوحة المياه، والمغذيات (الشكلان رقما ١٠ و ١٣). ولكن الشاهد الأقوى على صحة ذلك يتجلى في التوزيع الرأسي للأكسجين المذاب في ماء البحر (الشكل رقم ١٧). إذ يرتفع محتوى المياه العميقة في البحر الأحمر من الأكسجين من باب المندب حتى دائرة عرض ٢٣° تقريباً، تحت نطاق المحتوى الأدنى من الأكسجين. يوجد نطاق المحتوى الأدنى من الأكسجين عادةً على عمق ٢٥٠-٥٠٠م تقريباً، و لا يوجد مصدر لرفع محتوى المياه من الأكسجين بعد أن تغوص إلى الأعماق لأن طبقة بيكنوكلاين تحول دون التحرك الرأسي للمياه. فالتفسير الوحيد لهذا هو تحرك الكتل المتكونة في شمالي البحر أفقياً على عمقٍ ملائم لكثافتها. ويبدو الاتصال بين المياه السطحية والعميقة جلياً في شمالي البحر خاصةً في الشهور الأولى من السنه (يناير – يونيو).

يؤدي ارتفاع ملوحة المياه في شمالي البحر ارتفاع كثافتها. كما يكرّس انخفاض درجات حرارة المياه ارتفاع الكثافة فتغوص كتل من المياه السطحية نحو الأسفل. وتنقطع عمليات تبادل الكتل الغاطسة للغازات مع الغلاف الغازي ، لتستقر في العمق الملائم لكثافتها وتتحرك أفقياً على القاع أو فوقه. ولمزيد من الدعم لهذا المنحى في التحليل، فقد جرى اختيار ثلاث محطات قياس الأولى في أقصى شمالي البحر الأحمر (٢٧,٥° شمالاً، ٣٤,٥° شرقاً). والثانية تقريباً في المنتصف (١٩,٥° شمالاً، ٣٨,٥° شرقاً)، والثالثة في أقصى الجنوب في باب المندب (١٢,٥° شمالاً، ٤٣,٥° شرقاً). وبتوقيع منحنيات التغير في درجة محتوى المياه من الأكسجين، وتركيز المغذيات (الفوسفات) مع العمق في المحطات



الشكل رقم (١٧). تكون كتل المياه العميقة شمالي البحر الأحمر.

الثلاث (الشكل رقم ١٨)، يمكن تبين عدد من الحقائق التي تدل على زيادة الحركة الرأسية للمياه في الشمال. يوجد أعلى محتوى للمياه من الأكسجين علي السطح حيث تلتقي المياه بالغلاف الغازي، وتقلبها الأمواج، وتنشط عمليات التمثيل الضوئي. تتقارب قيم هذا المتغير على السطح في المحطات الثلاث، فهي في الشمال ٤,٥٣ مل/لتر، وفي الجنوب ٤,٦٣ مل/لتر، وفي الوسط ٤,١٣ مل/لتر. وفي هذه الطبقة المياه مشبعة بالأكسجين بدرجة ١٠٠٪ في كل المحطات. ويلحظ في فصل الصيف أن الشريحة العليا من طبقة المياه السطحية تتشبع بالأكسجين بمحتوى أقل من مياه الطبقة نفسها التي لا تتعرض للتسخين السطحي الشديد[٣٤]. محتوى المياه من الأكسجين، عموماً، أقل في كل الأعماق في المحطات الجنوبية منها في المحطات الشمالية. يأخذ محتوى المياه من الأكسجين بالانخفاض مع العمق بالابتعاد عن نطاق التمثيل الضوئي في الطبقة السطحية ونتيجة لعمليات أكسدة وتحلل المخلفات العضوية المتساقطة من الطبقة السطحية. يوجد أدنى محتوى للأكسجين في الشمال على عمق ٥٠٠م ويبلغ ١,٧٢ مل/لتر، وفي الوسط على عمق ٣٠٠م، ويبلغ ٠,٥٢ مل/لتر، وفي الجنوب على عمق ٢٥٠م ويبلغ ٠,٧١ مل/لتر.



الشكل رقم (١٨). اختلاف تركيز الأكسجين والمغذيات مع العمق بين شمالي البحر وجنوبية.

(٣٤) تتأثر كمية الغازات المذابة في ماء البحر سلباً بدرجة حرارة المياه وبملوحتها.

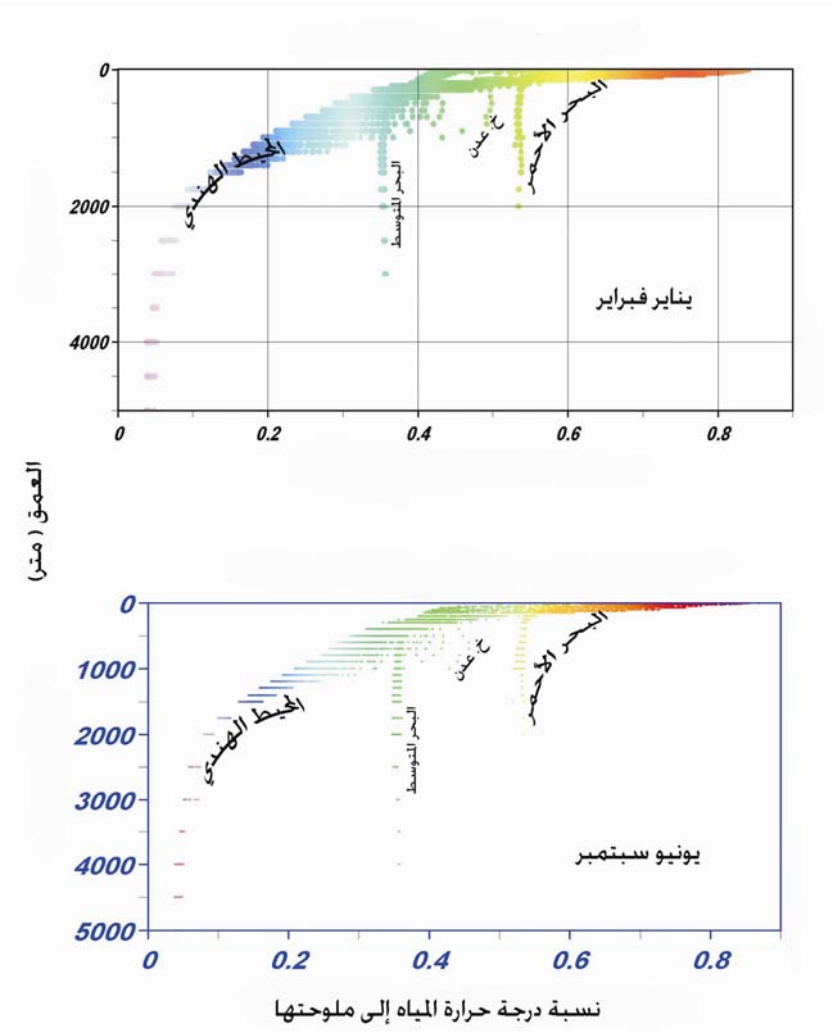
في الأعماق تحت مستوى المحتوى الأدنى من الأكسجين يأخذ محتوى المياه من الأكسجين بالارتفاع مع العمق حتى يستقر عند قيمة متوسطة بين حديه الأعلى (في الطبقة السطحية) والأدنى المذكور أعلاه. يبلغ محتوى المياه من الأكسجين في الشمال على عمق ١٠٠٠م ٢,٥٣ مل/لتر، وفي الوسط في الأعماق ١٠٠٠م فأكثر تراوح القيم بين ١,٥٣ - ٢,٢٦ مل/لتر، وفي باب المندب تبلغ ٠,٧٦ مل/لتر. يلاحظ أن المحتوى الأدنى من الأكسجين يوجد في شمالي البحر الأحمر على أعماق أكبر منها في الوسط والجنوب، مما يدل على حركة رأسية نشطة للمياه الهابطة في هذه العروض. كما أن قيمة المحتوى الأدنى تتناقص بشكل واضح نحو الجنوب. هذا إضافةً إلى إن ارتفاع محتوى المياه من الأكسجين في الأعماق أقل في جنوبي البحر منه في شماليه، بسبب البعد عن المصدر الرئيس لكتل المياه المحملة بالأكسجين. فالفارق في محتوى الأكسجين عند باب المندب بين المياه على عمق ٢٥٠م و عمق ١٠٠٠م لا يتجاوز ٠,٠٥ مل/لتر. ومحتوى الكتل المائية من الأكسجين، كما هو معلوم، ليس من خواصها المحافظة.

في الشكل رقم (١٧) أيضاً التوزيع الرأسي لتركيز المغذي النباتي الفوسفات PO4، في محطات القياس الثلاث. والواضح أن تركيز المغذيات يزداد مع العمق، كما هو متوقع نظرياً، في المحطات الثلاث ولكن هذه الزيادة تخف حدتها في الشمال. كل طبقات المياه في باب المندب أغنى بكثير بالفوسفات من الموقعين الآخرين مع اتجاه للتناقص نحو الشمال. يصل تركيز الفوسفات في الطبقة السطحية في باب المندب ٠,٤٨ ميكرومول/لتر، وفي الوسط ٠,١١ ميكرومول/لتر، وفي الشمال ٠,٠٦ ميكرومول/لتر، يزداد تركيزه مع العمق ليصل إلى أعلى قيمة له عند عمق ٢٥٠م وتبلغ ٢,٢١ ميكرومول/لتر في الجنوب، وفي الوسط توجد أعلى قيمة له عند نفس العمق وتبلغ ١,٢٦ ميكرومول/لتر،

وفي الشمال عند عمق ٢٠٠م وتبلغ ٠.١٤ ميكرومول/لتر. من هذا يمكن القول إن مصدر تموين البحر الأحمر بالمغذيات هو المياه القادمة إليه من بحر العرب عبر خليج عدن.

نظراً للظروف المميزة للبحر الأحمر خاصة في درجة حرارة مياهه، ودرجة ملوحتها، فإن كتل المياه المتكونة فيه والتي تنساب على قاع بابا المندب لتنظم إلى المياه المتوسطة أو العميقة في المحيط الهندي مميزة. بل إن كثيراً من الباحثين تتبعوها وميزوها في جهات بعيدة عن البحر الأحمر(٣٥). ولكن التساؤل عن مدى تجانس مياه البحر الأحمر مع مياه البحار المجاورة. ويمكن التحقق من مدى تميز مياه البحر الأحمر عن غيرها بتوقيع نسب درجات الحرارة إلى الملوحة في كل محطات القياس في البحر الأحمر وفي الأجزاء القريبة منه في البحر المتوسط وفي المحيط الهندي (الشكل رقم ١٩). ويبدو من الشكل جلياً أن مياه البحر الأحمر تلتقي في خصائصها مع مياه البحار المجاورة لها في الطبقة السطحية. ولكن كل من هذه البحار يتميز عن البحار الأخرى في حرارة و ملوحة مياهه في الطبقات المتوسطة والعميقة.

(٣٥) R. E. Roman and Lutjeharms, 1329.



الشكل رقم (١٩). تمييز مياه البحر الأحمر عن البحار المجاورة له.

خامساً: المصادر والمراجع

أولاً: المراجع العربية

ابن منظور، محمد بن مكرم، "*لسان العرب*"، دار صادر، بيروت، ١٩٩٠م.

الحواس، عساف بن علي، "*الماء في النظام الإيكولوجي*"، جامعة الملك سعود، الرياض، ٢٠٠٦.

الحواس، عساف بن علي، "*نشأة الأحواض المحيطية من منظور نظرية الصفائح التكتونية*"، رسائل جغرافية، ٣٢٧، أغسطس ٢٠٠٧م.

الغنيم، عبدالله بن يوسف، "*أشكال سطح الأرض في شبه الجزيرة العربية في المصادر العربية القديمة*"، الكويت، ٢٠٠٥م.

القرطبي، محمد بن أحمد، "*الجامع لأحكام القرآن*"، دار إحياء التراث، بيروت، ٢٠٠٢م.

الوليعي، عبدالله بن ناصر، "*بحوث في الجغرافيا الطبيعية للمملكة العربية السعودية* (القسم الأول): جيولوجية وجيومورفولوجية المملكة العربية السعودية"، ب ن، الرياض، ١٩٩٦م.

ثانياً: المراجع الأعجمية

Beal Lisa M., Teresa K. Chereskin, Harry L. Bryden and Amy Ffield," Variability of water properties, heat and salt fluxes in the Arabian Sea, between the onset and wane of the 1995 southwest monsoon", Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 50, Issues 12-13, Physical Oceanography of the Indian Ocean: from WOCE to CLIVAR, July 2003, Pages 2049-2075.

Beyene, Alebachew and Mohamed G. Abdelsalam, "Tectonics of the Afar Depression: A review and synthesis", Journal of African Earth Sciences, Volume 41, Issues 1-2, January 2005, Pages 41-59.

Bosworth, William, Philippe Huchon and Ken McClay, "The Red Sea and Gulf of

Aden Basins", Journal of African Earth Sciences , Volume 43, Issues 1-3 , 2005, Pages 334-378.

Ghebreab, Woldai, "Tectonics of the Red Sea region reassessed", Earth-Science Reviews, Volume 45, Issues 1-2, November 1998, Pages 1-44.

Gross, Grant “Oceanography”, Merrill, London, 1985.

Hidenori Aiki, Keiko Takahashi and Toshio Yamagata, The Red Sea outflow regulated by the Indian monsoon, Continental Shelf Research, Volume 26, Issues 12-13, Recent Developments in Physical Oceanographic Modelling: Part III, August 2006, Pages 1448-1468.

Peixoto, Jose P. and Oort Abraham H., "Physics of Climate", American Institute of Physics, 1992.

Roman, R.E. and Lutjeharms, J.R.E., "Red Sea Intermediate Water at the Agulhas Current termination." Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Volume 54, Issue 8, August 2007, Pages 1329-1340.

Roman, R.E. and Lutjeharms, J.R.E., Red Sea Intermediate Water at the Agulhas Current termination, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Volume 54, Issue 8, August 2007, Pages 1329-1340.

Schattner, U.; Z. Ben-Avraham; M. Reshef; G. Bar-Am and M. Lazar, "Oligocene-Miocene formation of the Haifa basin: Qishon-Sirhan rifting coeval with the Red Sea-Suez rift system", Tectonophysics, Volume 419, Issues 1-4, 12 June 2006, Pages 1-12.

Sofianos, S. S., W. E. Johns and S. P. Murray, Heat and freshwater budgets in the Red Sea from direct observations at Bab el Mandeb, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 49, Issues 7-8, World Ocean Circulation Experiment, 2002, Pages 1323-1340.

Red Sea Water Physico-chemical Properties and Dynamics

Assaf A. Alhawas
Associate Prof. Dept. Of Geography, College of Arts, King Saud University,
alhawas@ksu.edu.s
a
(Received 7/4/1429H.; accepted for publication 23/12/1429H.)

Abstract. The way the red sea basin was born, and its growth through geologic time that resembles the Atlantic, attracts researchers to dig for further details. The red sea elongated narrow shape, surrounded by arid and semi-arid lands, is what causes its waters to be the saltiest open seawaters on earth. It is of interest in this paper to review and sum up the latest findings about the red sea basin. And to analyze its water characteristics, movement and exchange with the Indian Ocean. It was concluded that highly saline red sea water masses are formed in the northern part of the sea. The halocline and deep water masses are very well distinguished. The exchange of water through Bab el Mandeb is driven by monsoons and the fluctuating direction of surface water currents in the Indian ocean. The exchange is bi-layered in winter and tri-layered in summer.