

أطلس الهيدروجيولوجيا لدولة قطر الجيولوجيا - مصادر المياه - المناخ السحيق

HYDROGEOLOGICAL ATLAS OF QATAR Geology – Water Resources – Paleoclimate

حسام موسى بعلوشة
Husam Musa Baalousha



دار نشر جامعة قطر
Qatar University Press

Hydrogeological Atlas of Qatar

أطلس الهيدروجيولوجيا لدولة قطر

التدقيق والضبط اللغوي

ولين الشيخ ماء العينين

سيد عقيل أحمد

نبيل محمد درويش

المراجعة الفنية

مريم آل خليفة

تصميم الغلاف

غسان البتيري

HYDROGEOLOGICAL ATLAS OF QATAR

Geology – Water Resources – Paleoclimate

أطلس الهيدروجيولوجيا لدولة قطر الجيولوجيا – مصادر المياه – المناخ السحيق

Husam Musa Baalousha

حسام موسى بعلوشة

الدوحة: 1445هـ / 2024م



دار نشر جامعة قطر
Qatar University Press

مكتبة قطر الوطنية بيانات الفهرسة – أثناء – النشر (فان)

بعלוشة حسام موسى، مؤلف.

Hydrogeological Atlas of Qatar: Geology - Water = بعلوشة / حسام موسى بعلوشة - المصادر المياه - المناخ السحيق / حسام موسى بعلوشة / Husam Musa Baalousha - resources - Paleoclimate / الطبعة الأولى. - الدوحة، قطر: دار نشر جامعة قطر، 2024.

x، 123 صفحة: إيضاحيات ملونة، خرائط؛ 24 سم

تدمك 6-738-716-992-978 (مطبوع)

تدمك 3-739-716-992-978 (إلكتروني)

يتضمن مراجع بيلوجرافية (صفحات 117-123).

بالعربية مع نص مواز باللغة الإنجليزية.

1. مصادر المياه -- قطر -- الخرائط. 2. الجيولوجيا -- قطر -- الخرائط. 3. علم المناخ القديم -- قطر -- الخرائط. أ. العنوان.

ب. عنوان مواز: Hydrogeological Atlas of Qatar: Geology - Water Resources – Paleoclimate.

G2249.81.C3 B35 2024

202428774784

333.91095363 – dc23

دار نشر جامعة قطر
Qatar University Press

ص.ب. 2713، الدوحة - قطر

qupress@qu.edu.qa

جميع الحقوق محفوظة. لا يُسمح بإعادة نشر هذا الكتاب أو أي جزء منه، أو تخزينه في أي نظام حفظ معلومات، أو نقله بأي شكل من الأشكال أو بأي وسيلة؛ سواء كانت إلكترونية أو آلية أو بالتصوير أو بالتسجيل أو غير ذلك، دون موافقة خطية مسبقة من الناشر.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

دار نشر جامعة قطر: نحن دار نشر جامعية غير ربحية، تأسست عام 2018، تعمل على تعزيز ونشر الكتب والبحوث المحكّمة في العديد من مجالات المعرفة. تسعى الدار إلى أن تصبح رائدة في نشر الكتب والمجلات العلمية، وتهدف إلى دعم رؤية جامعة قطر نحو التميّز في البحث والتعليم في دولة قطر وخارجها.

Qatar University Press (QU Press): We are a nonprofit university publishing house established in 2018, dedicated to promoting the dissemination of peer-reviewed and research-based publications in various fields. QU Press aims to be a leading publisher of scholarly books and journals. QU Press endeavors to support QU's vision towards excellence in research and education in Qatar and beyond.

هذا الكتاب لا يعبر بالضرورة عن رأي دار نشر جامعة قطر.

This book does not necessarily reflect the opinion of QU Press.



Disclaimer

The maps included in this book were created and produced based on various resources including published reports, books, various models, and open-source data. All pictures included in the book were taken by the author unless otherwise indicated. While every effort was made, and care was taken to ensure the accuracy and completeness of the content of this book, the author accepts no responsibility for any errors, omissions, or positional accuracy, and therefore, cannot be held responsible for any damages due to any error or omission in these maps. The depiction and use of geographic names and boundaries shown on the maps are not warranted to be error-free nor do they necessarily imply official endorsement.

إخلاء مسؤولية

أنشئت الخرائط الواردة في هذا الكتاب وأنتجت اعتماداً على مصادر متنوعة؛ منها التقارير المنشورة، والكتب، والنماذج المختلفة، والبيانات مفتوحة المصدر. التقت جميع الصور الواردة في الكتاب من قبل المؤلف، ما لم يذكر خلاف ذلك. وحيث بذل المؤلف جهده، وحرص على ضمان دقة الكتاب واكتمال محتواه؛ فلا يتحمل المسؤولية عن أي خطأ أو سهو أو عدم دقة في تلك الخرائط، كما لا يتحمل المسؤولية عن أي أضرار قد تنجم عن ذلك. لا يُعد استخدام الأسماء الجغرافية والحدود الموضحة على الخرائط خالياً من الأخطاء، كما لا يعني بالضرورة تأييداً رسمياً.

Dedicated
To the people of Qatar

إهداء
إلى الشعب القطري

المحتويات

Preface	2	تمهيد
I Geography, Geology, and Water Resources	3	I الجغرافيا، الجيولوجيا، الموارد المائية
(1) Geography	5	(1) الجغرافيا
1.1 State of Qatar	7	1.1 دولة قطر
(2) Geomorphology	11	(2) الجيومورفولوجيا
2.1 Introduction	13	2.1 مقدمة
2.2 Topography	13	2.2 الطبوغرافيا
2.3 Land Depressions	15	2.3 المنخفضات السطحية (الروض)
2.4 Arabian Gulf Bathymetry	18	2.4 مناسيب عمق الخليج العربي
2.5 Surface Catchments	21	2.5 مستجمعات المياه السطحية
2.6 Soil Type	24	2.6 أنواع التربة
(3) Geology	27	(3) الجيولوجيا
3.1 Surface Geology	29	3.1 الجيولوجيا السطحية
3.2 Structural Geology	31	3.2 الجيولوجيا التركيبية
3.3 Hofuf Formation	33	3.3 تكوين الهفوف الميوسن - البليوسن
3.4 Dammam Formation—Middle Eocene	34	3.4 تكوين الدمام - الإيوسين الأوسط
3.5 Rus Formation—Early Eocene	37	3.5 تكوين الرس - الإيوسين المبكر
3.6 Umm Er Radhuma Formation—Paleocene/Early Eocene	40	3.6 طبقة أم الرضمة - باليوسين/الإيوسين المبكر
3.7 Aruma Formation-Late Cretaceous	42	3.7 تكوين العرمة - العصر الطباشيري المتأخر
(4) Water Resources	45	(4) الموارد المائية
4.1 Aquifers	47	4.1 الخزانات الجوفية
4.2 Groundwater Wells	51	4.2 آبار المياه الجوفية
4.3 Rainfall	54	4.3 الأمطار

4.4 Submarine Springs	56	4.4 الينابيع البحرية
4.5 Rus Formation Sedimentary Facies	59	4.4 السحنات الرسوبية لطبقة الرس
4.6 Isotopes Hydrology and Groundwater Age	61	4.4 هيدرولوجيا النظائر وعُمر المياه الجوفية
4.7 Groundwater Vulnerability	63	4.4 قابلية تلوث المياه الجوفية
4.8 Groundwater levels in Qatar	67	4.4 مناسيب المياه الجوفية في قطر
4.9 Natural Groundwater Flow	72	4.4 الجريان الطبيعي للمياه الجوفية
II Paleo Hydrogeology, Human and Water	75	II هيدروجيولوجيا الزمن السحيق، الإنسان والمياه
(5) The Last Glacial Period	77	(5) العصر الجليدي الأخير
5.1 Arabian Basin During the Last Glacial Period	79	1.5 الحوض العربي خلال العصر الجليدي الأخير
5.2 Holocene Highstand	85	2.5 الحد الأعلى لمنسوب سطح البحر خلال عصر الهولوسين
5.3 Qatar Climate during the Holocene	88	3.5 مناخ قطر خلال فترة الهولوسين
(6) Paleogeography	91	(6) خرائط الزمن السحيق
6.1 Introduction	93	1.6 مقدمة
6.2 Paleocene-Early Eocene	94	2.6 الباليوسن - الإيوسين المبكر
6.3 Early Eocene	94	3.6 الإيوسين المبكر
6.4 Middle Eocene	95	4.6 الإيوسين الأوسط
6.5 Oligocene	95	5.6 الأوليجوسين
(7) Human & Water	103	(7) الإنسان والمياه
7.1 Man and Water in The Neolithic Period	105	1.7 الانسان والمياه في العصر الحجري
7.2 Man and Water in the Abbasid Period	108	2.7 الانسان والمياه في العصر العباسي
7.3 Man and Water (1500- 900 AD)	110	3.7 الإنسان والمياه (1500-1900 م)
7.4 Pearl Diving around Qatar	113	4.7 مغاصات اللؤلؤ حول قطر
References	117	المراجع

Preface

The idea of writing this book has been in my mind for a long time, as I noticed no such Atlas existed for Qatar, despite its importance. Although numerous studies, publications, books, and technical reports about hydrogeology and water resources in Qatar are available, no single book contains all hydrogeological information and relevant maps. This made it difficult for anyone interested in this topic to find relevant information and maps, which motivated me to write this book.

I was keen on writing this book in both languages English and Arabic to enable outreach to a wider reader community, although map legends are in English. This Atlas is divided into two main parts: the first one is on geology and water resources, and the second part is on paleo-hydrogeology, man and water.

The first part contains four chapters: Geography, Geomorphology, Geology, and Water Resources. For obvious reasons, chapters 3, and 4 (Geology, and Water Resource) are the most important ones in this part, as they contain various aspects of hydrogeology. Chapter 3 describes the surface and subsurface geology of Qatar, down to Late Cretaceous, and chapter 4 contains some interesting results from modelling such as vulnerability assessment and groundwater flow paths.

The second part contains three chapters: Last Glacial, Paleogeography and Human and Water. The fact that one chapter was devoted to the Late Glacial is because of its importance and bearing on the evolution of Qatar's water resources and human development since the early neolithic period until the present. Chapter 6 contains important maps of continental drift and sedimentation of various geological layers in the region. The last chapter connects the human history in Qatar with water resources and climate.

Husam Baalousha (HDR, PhD, MSc, BSc.)

تمهيد

بالرغم من وجود بعض الدراسات والإصدارات والكتب والتقارير الفنية حول الهيدروجيولوجيا والموارد المائية في دولة قطر؛ إلا أنه لا يوجد كتاب واحد يضم جميع تلك المعلومات والخرائط الهيدروجيولوجية. هذا الأمر جعل من الصعب على المهتمين بهذا الموضوع العثور على المعلومات والخرائط ذات الصلة، مما دفعني إلى كتابة هذا الكتاب، الذي كانت فكرة تأليفه في خلدي منذ فترة طويلة؛ حيث لاحظت عدم وجود مثل هذا الأطلس لدولة قطر، على الرغم من أهميته.

لقد حرصت على تأليف هذا الكتاب باللغتين الإنجليزية والعربية؛ من أجل أن ينتفع به مجتمع قراء أوسع؛ إلا أن مفتاح الخرائط مكتوب باللغة الإنجليزية فقط.

ينقسم هذا الأطلس إلى جزأين رئيسين؛ الجزء الأول يتحدث عن الجيولوجيا والموارد المائية، أما الجزء الثاني فيلقي الضوء على الجيولوجيا القديمة والجيولوجيا البشرية والمائية. يضم الجزء الأول أربعة فصول، هي: الجغرافيا، والجيولوجيا، والجيومورفولوجيا، والموارد المائية. لأسباب واضحة، فإن الفصلين الثالث والرابع هما الأكثر أهمية في هذا الجزء؛ حيث يحتويان جوانب مختلفة من علم الجيولوجيا المائية، فيصف الفصل الثالث الجيولوجيا السطحية والجوفية لقطر، وصولاً إلى أواخر العصر الطباشيري، بينما يحتوي الفصل الرابع على بعض النتائج المثيرة للاهتمام من النمذجة، مثل تقييم مخاطر التلوث ومسارات تدفق المياه الجوفية.

يحتوي الجزء الثاني على ثلاثة فصول؛ العصر الجليدي الأخير، وخرائط الزمن السحيق، والإنسان والماء. إن تخصيص فصل واحد للعصر الجليدي الأخير تنبع من أهمية هذا الموضوع، وتأثيره على تطور الموارد المائية والتنمية البشرية في قطر، منذ أوائل العصر الحجري الحديث حتى وقتنا الحاضر. يحتوي الفصل السادس على خرائط مهمة للانجراف القاري، وترسيب الطبقات الجيولوجية المختلفة في المنطقة، بينما يربط الفصل السابع والأخير تاريخ البشرية في قطر بالموارد المائية والمناخ.

د. حسام موسى بعلوشة



I

Geography – Geology – Water Resources

الجغرافيا – الجيولوجيا – الموارد المائية





(1)
Geography
الجغرافيا



1.1 State of Qatar

The State of Qatar is located in the eastern part of the Arabian Peninsula. It extends as a peninsula in the Arabian Gulf. It has a total area of 11521 km² (Qatar Government Communication Office, 2020), extending in the north-south direction (Figure 1.1), with a maximum length of about 180 km, and a maximum width of 85 km (FAO, 2008). It is surrounded by the Arabian Gulf from all directions but the south, where it borders Saudi Arabia (Figure 1.2). The country is divided into 8 municipal areas, which are: Doha, Al Rayyan, Umm Salal, AL Khor and Dekhera, Al Wakra, Al Dayeen, Al Shamaal, and Al Sheehaniya. Qatar is a member of the Gulf Cooperation Council (GCC), which includes, also United Arab Emirates, Bahrain, Saudi Arabia, Oman, and Kuwait.

Doha is the capital of Qatar and the most populous city in the country. Doha City has emerged as a combination of three towns: Al Bidaa (which was established before Doha, see section 7.3), Doha, and As-Salata (Carter & Eddisford, 2013). The other main cities in Qatar are: Al Rayyan to the west of Doha, Al Wakrah and Umm Said in the south, Umm Salal, Al Khor and Madinat ash Shamal in the north, and Dukhan in the west.

Qatar is characterized by desert climate, with hot summer between April and August and mild winter between September and March. Rainfall occurs in winter, with a long-term average of 80 mm (see section 4.3). The prevailing wind is the northerly, which is known as Al-Shamal. The temperatures in Qatar are similar to those in Eastern Arabian Peninsula (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981), with the minimum in January and the maximum in July/August. The average maximum temperature is 41.9 degrees celsius in July, and the average minimum is 13.5 degrees celsius in January (Qatar Meteorological Department, 2020).

Qatar's population was 27,000 in 1908, and increased to 111,000 in 1970 (Al-Kubaisi, 1984). Qatar has witnessed a rapid increase in population, especially over the last two decades due to the influx of expatriates. Qatar's population has increased from 613,696 (Planning and Statistics Authority, 2019) to 2.79 million inhabitants (Planning and Statistics Authority, 2020) between 2000 and 2020, respectively.

1.1 دولة قطر

تقع دولة قطر في الجزء الشرقي من شبه الجزيرة العربية، وتمتد داخل الخليج العربي، وتبلغ مساحتها الإجمالية 11521 كم² (Qatar Government Communication Office, 2020). وتمتد في الاتجاه بين الشمال والجنوب (الشكل 1.1)، ويبلغ الحد الأقصى الطولي حوالي 180 كم، والحد الأقصى العرضي 85 كم (FAO, 2008). تحيط مياه الخليج العربي بقطر من جميع الجهات باستثناء الجنوب، الذي تحدها منه المملكة العربية السعودية (الشكل 1.2). تنقسم قطر إلى ثماني مناطق بلدية وهي: الدوحة، والريان، وأم صلال، والخور، والوكرة، والظلعين، والشمال، والشحانية. قطر عضو في مجلس التعاون الخليجي الذي يضم، بالإضافة إلى قطر، الإمارات العربية المتحدة، ومملكة البحرين، وسلطنة عمان، والكويت، والمملكة العربية السعودية.

الدوحة هي عاصمة قطر والمدينة الأكثر اكتظاظا بالسكان في البلاد. ظهرت مدينة الدوحة كمزيج من ثلاث بلديات: البدع (التي تأسست قبل الدوحة، انظر القسم 7.3)، والدوحة، والسلطة (Carter & Eddisford, 2013). والمدن الرئيسية الأخرى في قطر هي الريان إلى الغرب من الدوحة، والوكرة وأم سعيد في الجنوب، وأم صلال والخور ومدينة الشمال في الشمال، ودخان في الغرب.

تتميز قطر بالمناخ الصحراوي، مع صيف حار بين أبريل وأغسطس وشتاء معتدل بين سبتمبر ومارس. تهطل الأمطار في فصل الشتاء، بمتوسط طويل يبلغ 80 ملم (انظر القسم 3.4). الرياح السائدة الشمالية هي التي تعرف باسم رياح الشمال. درجات الحرارة في قطر مماثلة لتلك في شرق شبه الجزيرة العربية (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981)، مع الحد الأدنى في يناير والحد الأقصى في يوليو/أغسطس. يبلغ متوسط درجة الحرارة العظمى 41.9م في شهر يوليو، ومتوسط درجة الحرارة الدنيا 13.5م في شهر يناير (Qatar Meteorological Department, 2020).

كان عدد سكان قطر 27000 نسمة عام 1908، وارتفع إلى 111000 عام 1970 (Al-Kubaisi, 1984). شهدت قطر زيادة سريعة في عدد السكان، وخاصة خلال العقود الماضية بسبب تدفق الوافدين. ارتفع عدد سكان قطر بين عامي 2000 و2020 من 613696 (Planning and Statistics Authority, 2019) إلى 2.79 مليون نسمة (Planning and Statistics Authority, 2020).

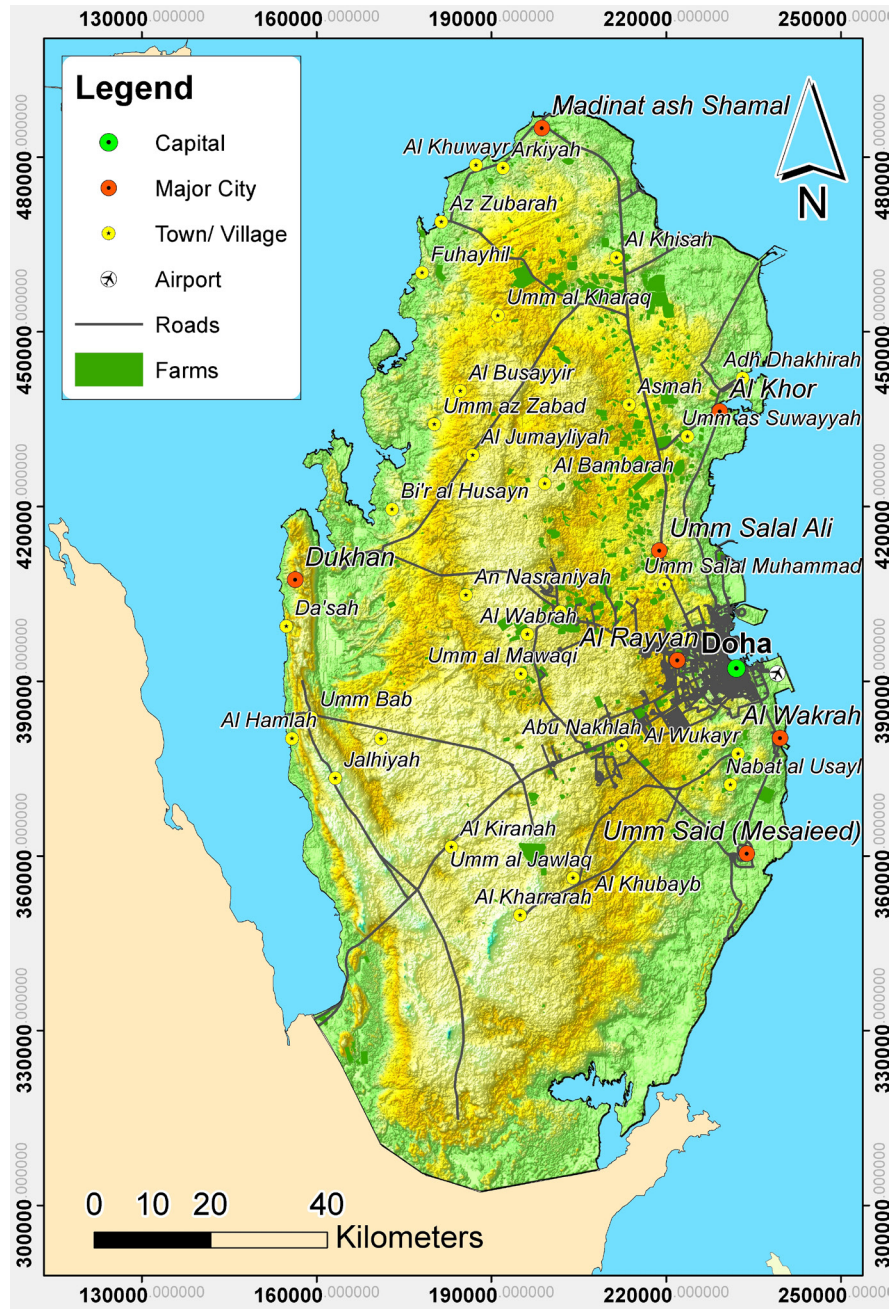


Figure 1.1: Qatar base map with main features and built up areas
 شكل 1.1: الخريطة الأساسية لدولة قطر تظهر الخصائص الأساسية والمناطق العمرانية.

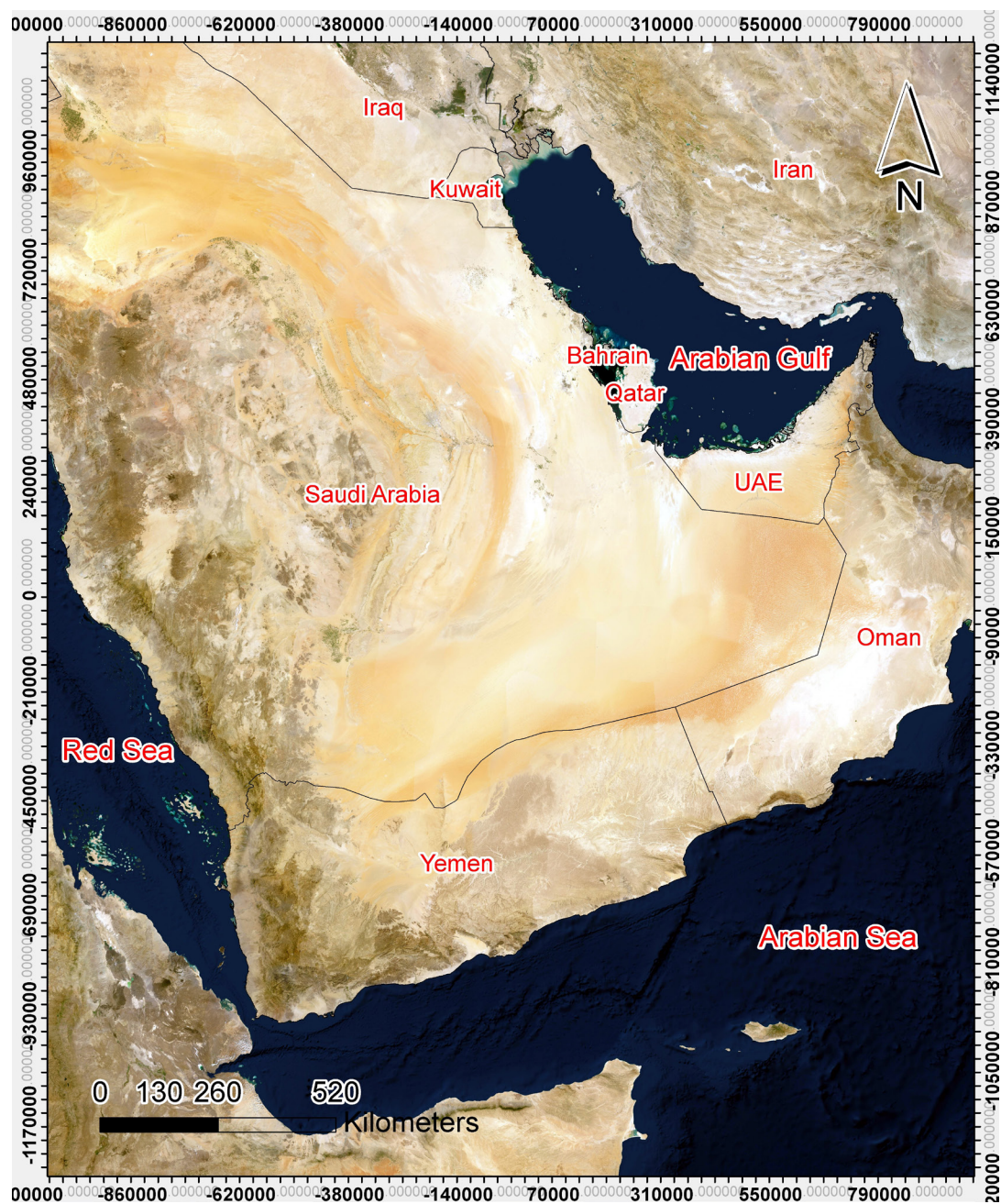


Figure 1.2: Regional map of Qatar and neighboring countries. Background Image: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, and Aerogrid
شكل 2.1: الخريطة الإقليمية لقطر والدول المحيطة.



(2)

Geomorphology
الجيومورفولوجيا

2.1 Introduction

Geomorphology is important for water resources, and environmental ecosystem. Topography, soil and land features affects the rainfall runoff, infiltration and aquifer recharge. Qatar has a variety of land features such as land depressions, sand dunes, sink holes, and karst formation. The following sections present topography, land depressions, surface catchments and soil type, in addition to the bathymetry of the Arabian Gulf.

2.2 Topography

Topography in Qatar is generally flat, as the elevation varies from 0 near the shore lines to around 107 meters above mean sea level in some areas in the south (see Figure 2.1). Some areas have land depressions occurring at many places in the country where the elevation is below 0. The terrain is flat in the northern part of the country, with a maximum elevation of around 40 meters, whereas it is rough and higher in the south due to tectonic uplift. The south-west part has the highest elevation along Dukhan anticline. This anticline extends in the south-north direction in parallel to the Gulf of Salwa. Some Sabkhas (salt flats), like Dukhan Sabkha just to the north of the anticline, are below sea level.

1.2 مقدمة

الجيومورفولوجيا مهمة لموارد المياه، وللنظام البيئي. تؤثر التضاريس وخصائص التربة والأراضي على جريان الأمطار وترشيح المياه في التربة وإعادة تغذية الخزان الجوفي. تزخر قطر بمجموعة متنوعة من خصائص الأرض مثل المنخفضات الأرضية والكثبان الرملية والكهوف والتجاويف الأرضية (الدحول) وتكوينات الكارست. الأقسام التالية تتحدث عن التضاريس، المنخفضات الأرضية، المستجمعات السطحية ونوع التربة، بالإضافة إلى قياس الأعماق في الخليج العربي.

2.2 الطبوغرافيا

تتميز الطبوغرافيا في دولة قطر بأنها مستوية بشكل عام؛ حيث يتراوح ارتفاع الأرض ما بين صفر بالقرب من ساحل البحر وحتى 107 م فوق سطح البحر في بعض المناطق في الجنوب (انظر شكل 1.2). تتواجد بعض المنخفضات في بعض المناطق؛ حيث يقل مستوى تلك المنخفضات إلى مستوى أقل من سطح البحر. يبلغ أقصى ارتفاع في المناطق الشمالية التي تنسم بتضاريس مستوية حوالي 40 م عن سطح البحر، في حين أن التضاريس أكثر وعورة في الجنوب بسبب الرفع التكتوني للطبقات في الجنوب. تتواجد المناطق المرتفعة على امتداد طية دخان المحدبة، والتي تمتد باتجاه شمال-جنوب بشكل مواز لخليج سلوى. تتواجد السبخات الملحية، مثل سبخة دخان، إلى الشمال من طية دخان المحدبة في مناطق أخفض من مستوى سطح البحر.

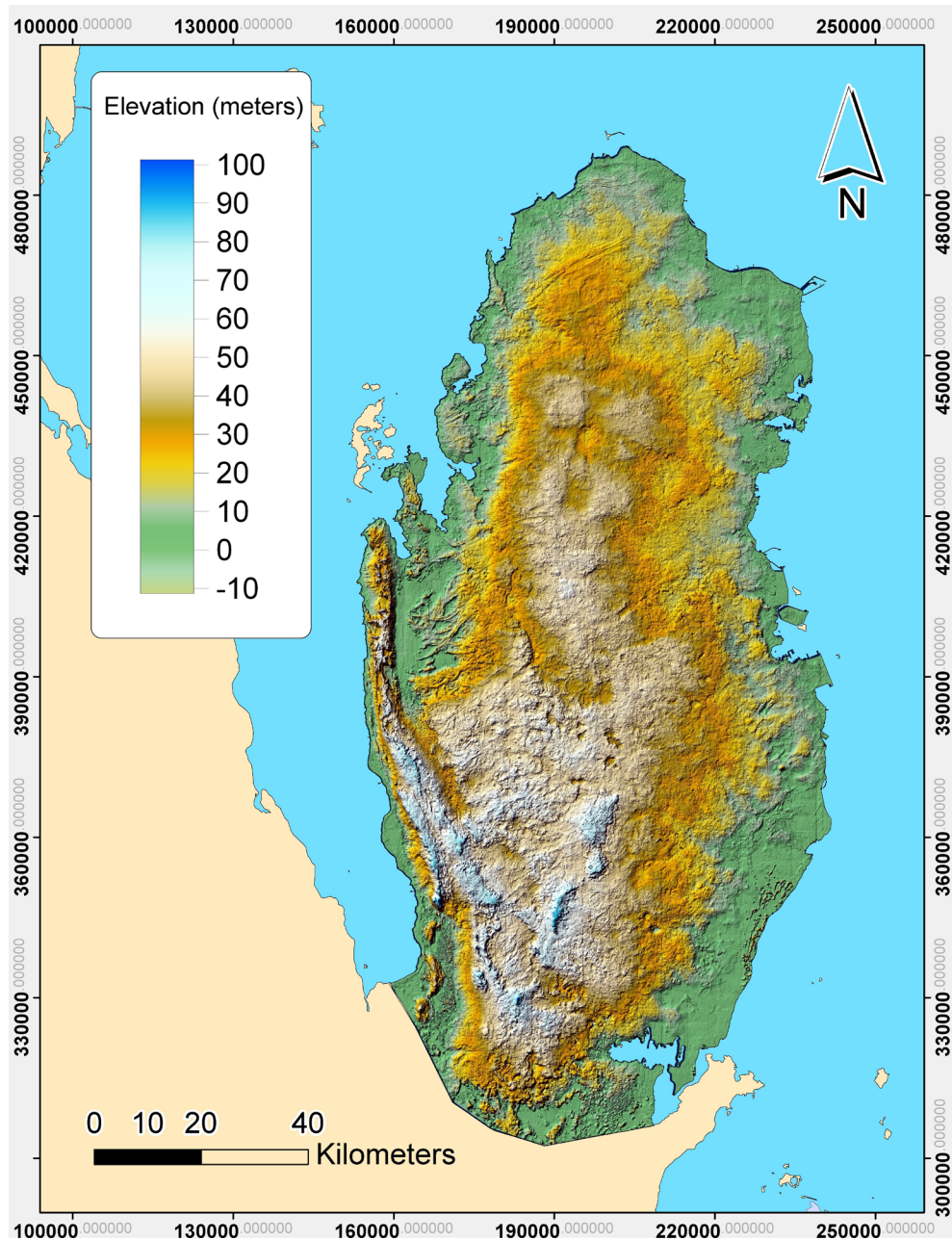


Figure 2.1: Topography map of Qatar (meters above mean sea level). Map was created based on LiDar data
شكل 1.2: خريطة الطبوغرافيا لدولة قطر (الارتفاع بالمتر عن مستوى سطح البحر).

2.3 Land Depressions

Qatar's topography is characterized by the occurrence of surface depressions (locally known as *Rowda*), some of which were the source of perennial potable water in the past. They vary in size from a few meters wide up to more than one kilometer (Eccleston & Harhash, 1981). Rainfall runoff flush silt and mud to accumulate in these depressions, so they are suitable for agriculture. As a result, pasture and little shrubs grow in these depressions after rain. Early settlement in Qatar evolved around these depressions as they are good sources of water, because the groundwater is shallow in the depressions. In addition to land depressions, many sinkholes (locally known as *Dahl*) occur in the country. Examples are Musfer sinkhole in central Qatar and Dahl Al Hamam in Doha.

Karst features occur in Qatar by two different mechanisms in the north and the south of the country (Duggan et al., 2013). In the north, gypsum layer is absent, and weathering occurs on the land surface. Rainfall and atmospheric carbon dioxide form a weak carbonic acid that slowly dissolve the limestone. Over time, cracks opening in the limestone become wider and preferential flows develop in the cracks, and eventually the land depressions are formed. These depressions are mostly shallow and interconnected with wadis (Cavelier, 1970). In the south, fractures develop in the sub-surface layer of gypsum within the Rus Formation, which leads to the collapse of the upper limestone layers forming the land depressions.

Figure 2.2 shows the main land depressions in Qatar. This map was done using topography map and Spatial Analyst Tool in ArcGIS. Depth varies between 7 to 0 meters, with respect to the mean sea level. It should be noted that the original depth of these depressions might be higher than the current but they have been filled with mud and silt by rainfall runoff.

3.2 المنخفضات السطحية (الروض)

تتميز الطبوغرافيا في قطر بوجود الكثير من المنخفضات السطحية التي تعرف محليًا باسم «الرُوض»، وتتفاوت أقطارها من بضعة أمتار وحتى أكثر من كيلومتر (Eccleston & Harhash, 1981). لقد جرفت مياه الأمطار الرواسب الطينية والغرين لتملأ تلك المنخفضات لتصبح صالحة للزراعة؛ حيث تنمو الأعشاب والشجيرات الصغيرة في تلك المنخفضات بعد سقوط الأمطار. لقد نشأت المستوطنات الأولى في قطر في تلك المنخفضات؛ حيث المياه متوفرة ومستوى المياه الجوفية قريب من سطح الأرض. بالإضافة إلى تلك المنخفضات تتواجد الكثير من الكهوف الأرضية المعروفة محليًا باسم دحول ومن أشهرها دحل مسفر في وسط قطر ودحل الحمام في الدوحة.

لقد تشكلت المعالم الكارستية في قطر عن طريق آليتين مختلفتين في الشمال والجنوب (Duggan et al., 2013). في الشمال، ونظرًا لعدم وجود طبقة الجبس فقد تمت عمليات التعرية على سطح الأرض، عند سقوط الأمطار التي تتفاعل مع ثاني أكسيد الكربون في الجو، الأمر الذي يؤدي لتكوين حمض الكربونيك الضعيف. هذا الحمض أدى إلى ذوبان الحجر الجيري بشكل بطيء، الأمر الذي أدى إلى تشكل شقوق في صخور الحجر الجيري، وتوسع تلك الشقوق نتيجة جريان الماء داخلها. ومع مرور الوقت أدى توسع الشقوق لتكوين الانهيارات السطحية والتي أدت لتشكيل المنخفضات. تلك المنخفضات ضحلة وترتبط مع بعضها عن طريق الوديان (Cavelier, 1970). تشكلت المنخفضات في الجنوب في الطبقات تحت أرضية نتيجة ذوبان طبقة الجبس في تكوين الرس، الأمر الذي أدى إلى حدوث تصدعات وانهيارات في الطبقات العليا وتشكل المنخفضات الأرضية.

يبين شكل 2.2 خريطة المنخفضات السطحية الرئيسية في قطر. تم عمل هذه الخريطة بناء على خريطة الطبوغرافيا باستخدام أداة Spatial Analyst في برنامج ArcGIS. تتراوح أعماق تلك المنخفضات من مستوى سطح البحر وحتى 7 أمتار تحت مستوى سطح البحر. يتوجب التنويه إلى أن تلك المستويات ربما لا تعكس العمق الحقيقي للمنخفضات حيث أنها مليئة بالطين والغرين.



Musfer sinkhole
دحل مسفر

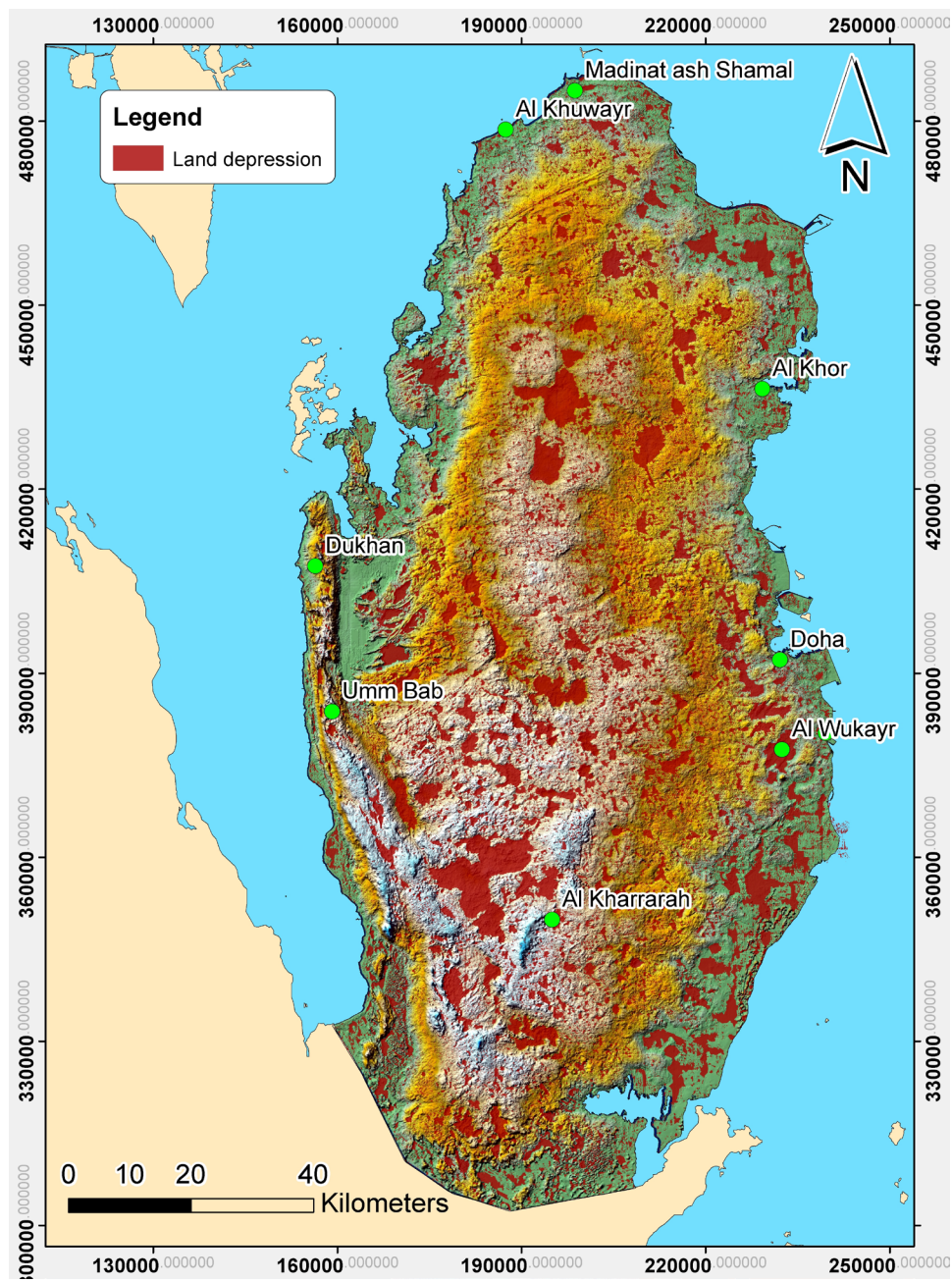


Figure 2.2: Land depressions in Qatar
شكل 2.2: خريطة المنخفضات السطحية في قطر.

2.4 Arabian Gulf Bathymetry

The Arabian Gulf is a shallow water body, surrounded by Iraq, Kuwait, Saudi Arabia, Qatar, UAE, Oman, and Iran. The total area of the Gulf from the north to the mound of Gulf of Oman is about 241,000 km². The length of the gulf is around 990 km, and its maximum width is about 340 km. The Gulf is connected to the Arabian Sea through the Strait of Hormuz in the south, which has a width of 55 km. The Gulf is relatively young, in geological terms, as it was filled with water gradually during the Holocene Period (see section 5.1). The bathymetry raster map and bathymetry contour map of the Arabian Gulf are shown in Figure 2.3 and 2.4, respectively. This data was based on the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2020). The Gulf is shallow, with a maximum depth of around 100 meters. The deeper part is on the eastern side, whereas the western side is shallow, with an overall average depth of 35 meters (Al Kaabi, Zhao, & Ghedira, 2016). The dominant meteorological phenomenon in the Gulf is the strong northerly winds, known as Al-Shamal (Liao & Kaihatu, 2016).

As appears in Figure 2.3, the basin of the Gulf comprises two sub-basins: one in the north and the other in the south, with the latter being more deep. This division was caused by Qatar Arch uplift, which passes between the two basins (see section 3.2).

4.2 مناسب عمق الخليج العربي

الخليج العربي عبارة عن مسطح مائي ضحل محاط بالعراق والكويت والمملكة العربية السعودية وقطر والإمارات العربية المتحدة وسلطنة عمان وإيران، وتبلغ المساحة الإجمالية للخليج من الشمال إلى خليج عمان حوالي 241,000 كم². يبلغ طول الخليج حوالي 990 كم، ويبلغ عرضه الأقصى حوالي 340 كم. يرتبط الخليج العربي بخليج عمان من خلال مضيق هرمز في الجنوب، الذي يبلغ عرضه 55 كم، والخليج حديث نسبيًا من الناحية الجيولوجية؛ حيث انغمر الحوض العربي تدريجيًا خلال فترة الهولوسين (انظر القسم 1.5). تظهر الخريطة النقطية لقياسات الأعماق وخريطة تساوي المناسيب للخليج العربي في الشكلين (2.3 و 2.4). استندت هذه البيانات إلى مخطط الأعماق العام للمحيطات (GEBCO, 2020). إن الخليج العربي ضحل بشكل عام، ويبلغ عمقه الأقصى حوالي 100 متر؛ حيث يقع الجزء الأعمق على الجانب الشرقي، بينما الجانب الغربي ضحل، ومتوسط العمق الكلي 35 م (Al Kaabi, Zhao, & Ghedira, 2016). والظاهرة المناخية السائدة في الخليج هي الرياح الشمالية القوية، والمعروفة باسم رياح الشمال (Liao & Kaihatu, 2016).

كما يظهر في الشكل 2.3، فإن حوض الخليج يتألف من حوضين فرعيين: أحدهما في الشمال والآخر في الجنوب، والأخير أكثر عمقًا. سبب هذا التقسيم هو الرفع التكتوني قوس قطر، الذي يمر بين الحوضين (انظر القسم 2.3).

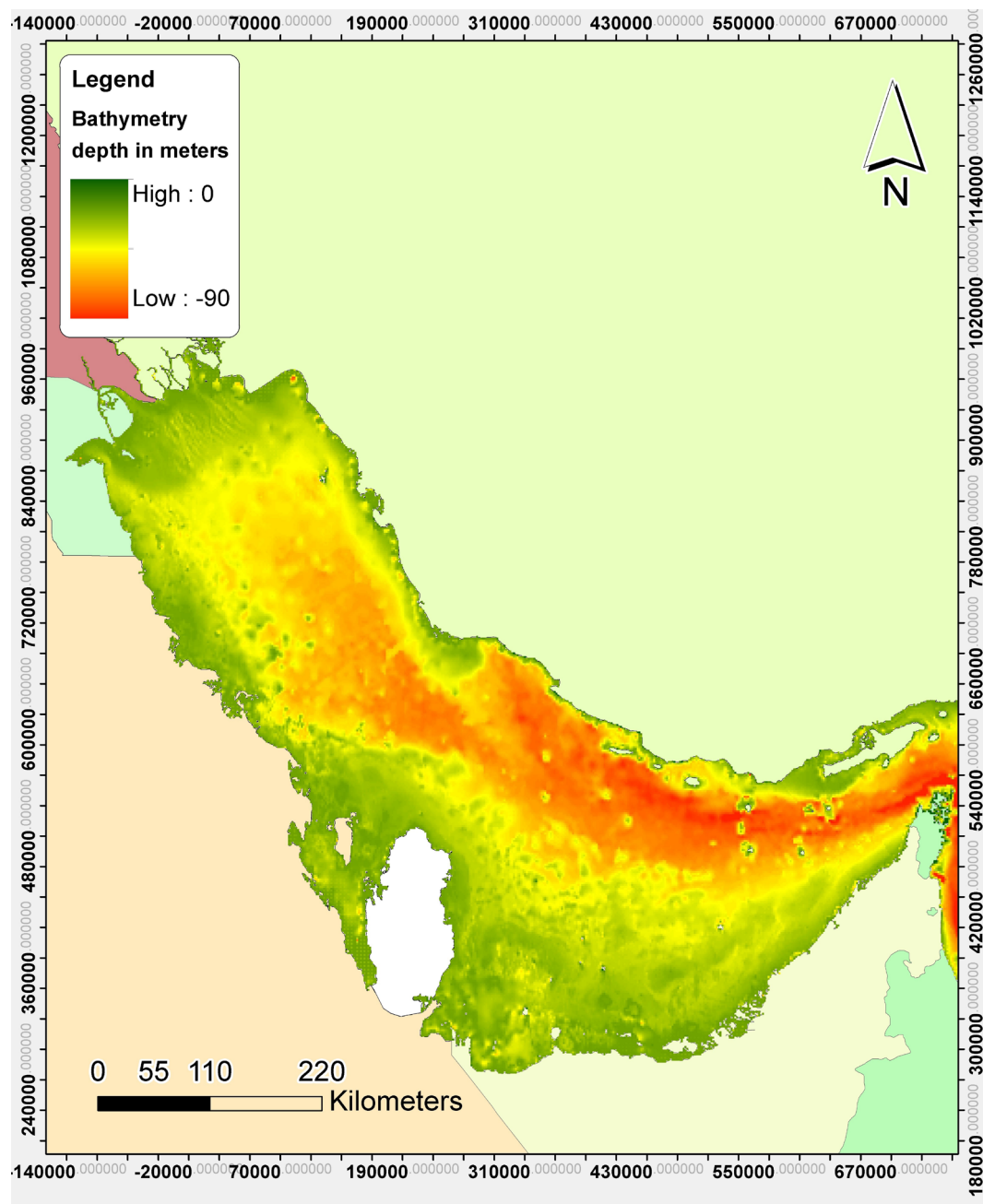


Figure 2.3: Bathymetry of the Arabian Gulf (meters). Data source: General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)
شكل 3.2: عمق المياه في الخليج العربي (بالمتر). مصدر البيانات: مصدر البيانات: General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)

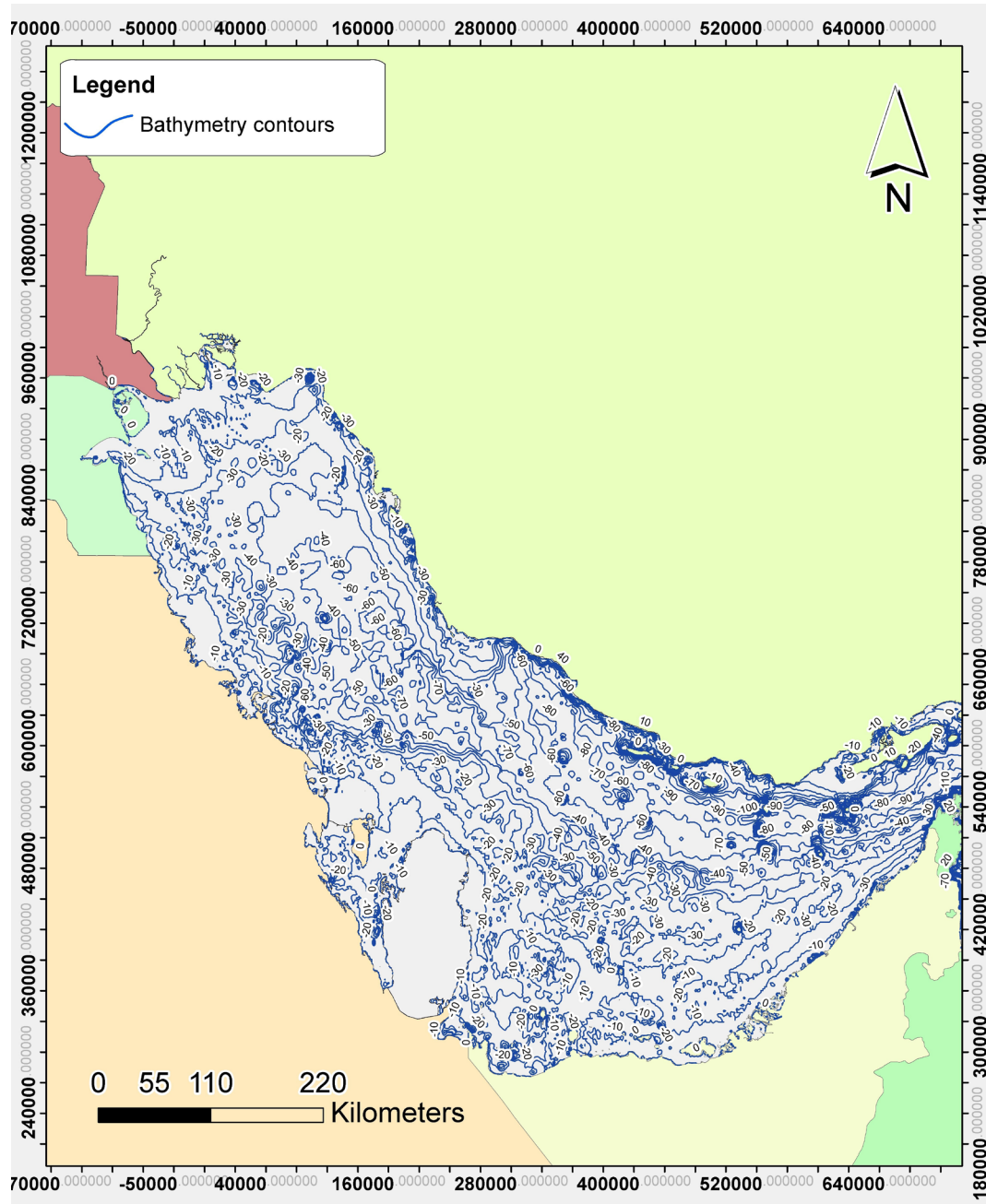


Figure 2.4: Contours of the sea floor of the Arabian Gulf (meters). Data source: General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)
شكل 4.2: خطوط مناسيب قاع البحر في الخليج العربي (بالمتر). مصدر البيانات: General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)

2.5 Surface Catchments

The surface catchment *also called watershed* is the area that drains into one stream/streams system or water body. In arid regions, it is the area where rainfall water would flow into one seasonal stream (i.e. flowing wadi). The area is divided into cells with 50 by 50 meters in both directions. The delineation of the surface catchments was based on the topography map (shown in Figure 2.1), and a threshold cut-off value, representing the maximum number of cells. The threshold value is the number of upstream cells that must flow into a particular cell before a stream line is created. When the threshold value is higher, fewer number of larger sub-catchments will be created

Two different threshold values were used to create two sub-catchments maps. The maps were created using a pour point algorithm to calculate the flow direction at each node and filling the depressions (Garbrecht, & Lawrence, 1997; Soille, Vogt, & Colombo, 2003; Wang, & Liu, 2006). Figure 2.5 shows the surface catchment map based on 50,000 cells threshold values. The streams of surface runoff are also shown on the map. Figure 2.6 shows the surface catchments based on cut off values of 200,000 cells. It is obvious the sub-catchments are bigger in this case, though the general pattern of catchment layout is similar

5.2 مستجمعات المياه السطحية

المستجمعات السطحية هي المناطق التي تتجمع فيها المياه السطحية وتصب في نهر أو جدول أو مجمع مائي واحد. في المناطق الجافة؛ حيث لا يوجد أنهار، تحدث السيول عادة بعد العواصف المطرية لتسير في الوديان التي تجري فيها المياه خلال موسم الأمطار فقط. لقد تم تقسيم الخريطة لخلايا متساوية بمساحة تساوي 50م في كل اتجاه. يتم تحديد المستجمعات السطحية بناء على خريطة الطبوغرافيا (شكل 2.1)، مع تحديد قيمة معينة كحد أعلى لعدد الخلايا المستخدمة. الحد الأعلى هو عدد الخلايا التي تتجمع منها المياه لتصب في خلية معينة قبل أن يتشكل النهر أو الوادي. كلما زاد الحد الأعلى أصبح مساحات المستجمعات السطحية التي يمكن تشكيلها أكبر وعددها أقل. تم استخدام قيمتين مختلفتين كحد أعلى لعمل خريبتين لمستجمعات المياه، وذلك بواسطة خوارزمية معينة لحساب اتجاه الجريان، وملء المنخفضات لتشكيل الخريطة النهائية. 50000 خلية كحد أعلى لمساحة المستجمعات السطحية (Garbrecht, & Lawrence, 1997; Soille, Vogt, & Co-), يبين الشكل 2.5 المستجمعات السطحية بناءً على حد أعلى يساوي 50,000 خلية، كما تظهر الوديان السطحية المتشكلة على نفس الخريطة. وباستخدام خلايا مساحتها 50م طولاً و50م عرضاً. يبين الشكل 2.6 المستجمعات السطحية بناءً على حد أعلى يساوي 200,000 خلية. مساحات المستجمعات السطحية في هذه الحالة أكبر من الحالة السابقة، رغم تشابه النمط العام لشكلها.

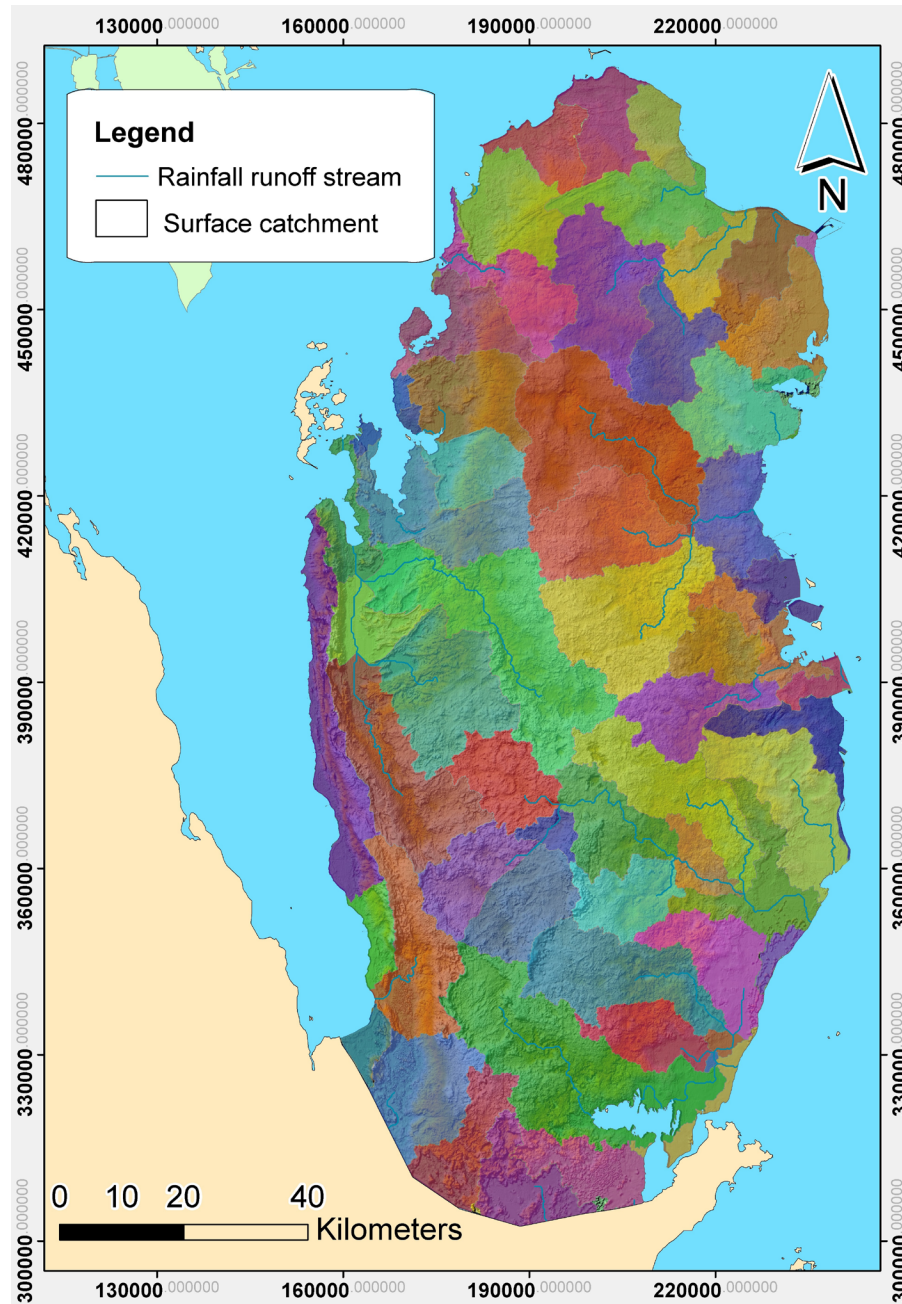


Figure 2.5: Surface catchments of Qatar- Threshold value is 50.000 cells
شكل 5.2: مستجمعات المياه السطحية في قطر باستخدام 50.000 خلية كحد أقصى.

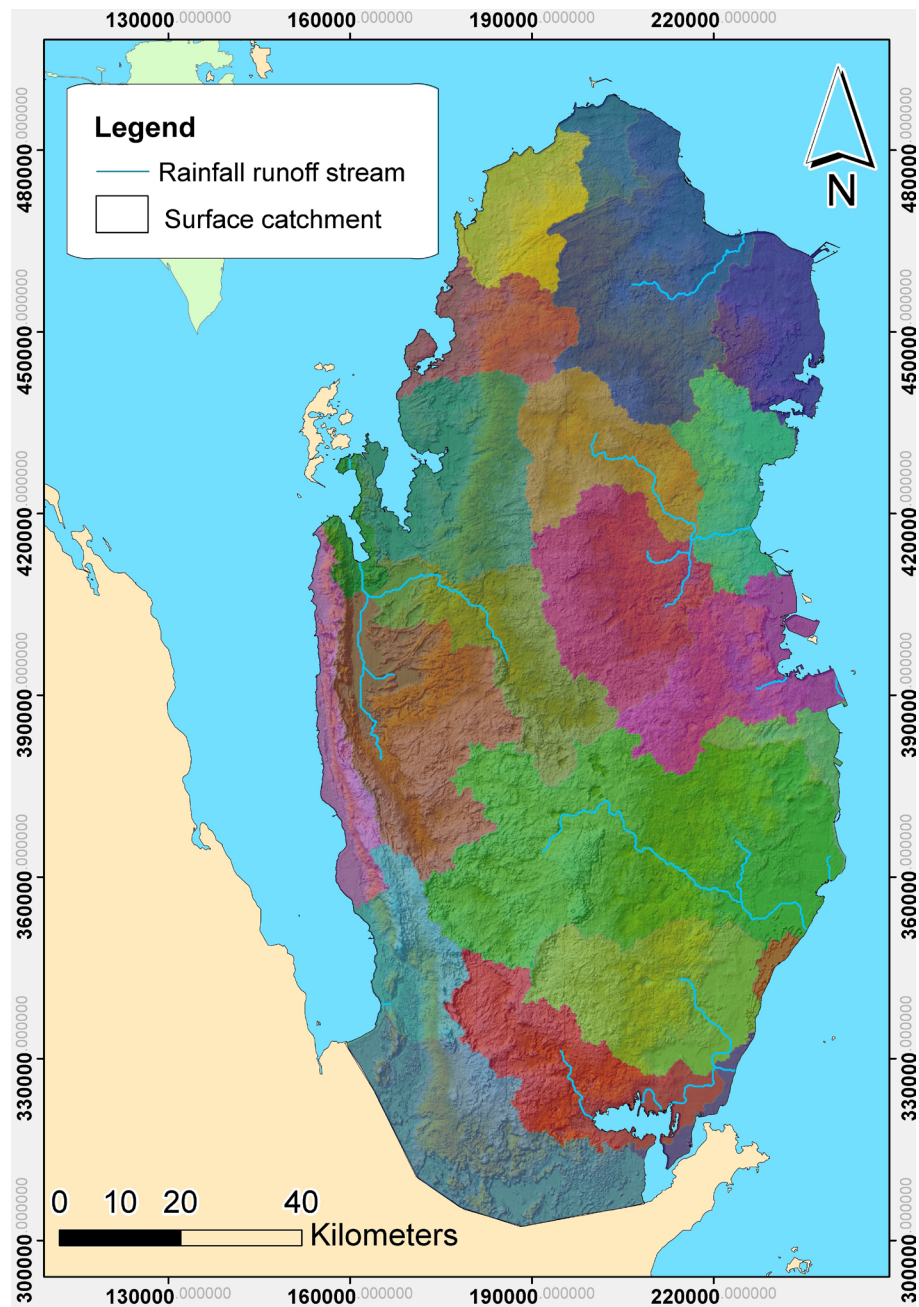


Figure 2.6: Surface catchments of Qatar- Threshold value is 200.000 cells
شكل 6.2: مستجمعات المياه السطحية في قطر باستخدام 200.000 خلية كحد أقصى.

2.6 Soil Type

Soil in Qatar is composed of calcareous sandy loam above rock fragments, with a depth of 10-30 cm. However, in land depressions the thickness of the soil might reach up to 150 cm due to accumulation of loam and clay during rainfall-runoff. The soil in these depressions (Rowdas) is suitable for agriculture (Eccleston & Harhash, 1981). Soil type was divided based on soil taxonomy of the United States Department of Agriculture (USDA, 1999). Based on the latter classification, soil in Qatar was divided into two main categories: Ardisols and Entisols. The Ardisols includes calcids, gypsids, and salids (Sabkha), whereas the Entisols includes Psamments, Aquentes and Orthents (Department of Agricultural and Water Research, 2005). The calcids is the most dominant soil covering on the vast majority of Qatar surface, as shown in Figure 2.7. It is composed of calcium carbonate in the top and calcic underneath (USDA, 1999). The second main soil type within aridisols is the gypsids. It is composed of gypsic or petrogypsic horizon (USDA, 1999), and covers wide areas in the north and along the southern coast. Salids (Sabkha) soil is a type of aridisols and it occurs along the south-eastern coasts of Qatar, some in the north-eastern coast and near Dukhan (i.e. Dukhan Sabkha).

The second soil category; entisols, has only one horizon.

In this category, aquents occur in a small area to the south of Dukhan Sabkha. It is a wet and muddy soil because of its proximity to Dukhan sabkha. Orthents occurs in small scattered areas in the southern part of the country. It is a shallow soil over recent erosional surfaces, and it lacks horizons (USDA, 1999). The psamments soil is composed of unconsolidated sand deposits and covers small areas along Dukhan anticline and along the south-eastern coast.

In the south and south east, aeolian sand dunes accumulate in a form of barchans, whereas they are absent

6.2 أنواع التربة

تتكون التربة في قطر من الطمي الرملي الجيري فوق فتات الصخور بعمق 10-30 سم، ويزداد العمق في المنخفضات الأرضية (الروض) ليصل سمك التربة إلى 150 سم بسبب تراكم الطمي والطين خلال جريان الأمطار، والتربة في هذه المنخفضات مناسبة للزراعة (Eccleston & Harhash, 1981). قسمت أنواع التربة على أساس تصنيف التربة في وزارة الزراعة الأمريكية (USDA, 1999). بناءً على التصنيف الأخير، تم تقسيم التربة في قطر إلى فئتين رئيسيتين: تربة صحراوية (Ardisols) وتربة حديثة التكوين (Entisol). تشمل التربة الصحراوية على التربة الكلسية (Calcids) التي تحتوي على كربونات الكالسيوم كمكون أساسي، والتربة الجبسية (Gypsids) والتربة المالحة (Salids) (السبخة)، بينما تشمل التربة حديثة التكوين (الغير مكتملة) على التربة الرملية المفككة (Psamments) والتربة المبللة Aquents والتربة الضحلة Orthents (Department of Agricultural and Water Research, 2005).

التربة الجيرية هي التربة الأكثر شيوعاً وتغطي الغالبية العظمى من سطح قطر، كما هو موضح في الشكل 2.7، وتتكون من كربونات الكالسيوم في الأعلى وغنية بالكالسيوم والجير في الأسفل (USDA, 1999). التربة الجبسية هي النوع الرئيسي الثاني ضمن مجموعة التربة الصحراوية aridisols، وتحتوي على طبقة من بلورات الجبس التي قد تشكل طبقة غير منفذة (USDA, 1999)، وتغطي مناطق واسعة في الشمال وعلى طول الساحل الجنوبي، أما تربة السبخات (السبخة) هي نوع من التربة الصحراوية وتتواجد على طول السواحل الجنوبية الشرقية لقطر، وبعضها في الساحل الشمالي الشرقي وبالقرب من دخان (سبخة دخان).

تحتوي المجموعة الثانية التربة حديثة التكوين (Entisols) على أفق واحد فقط. التربة المبللة من ضمن هذه الفئة وتتواجد في منطقة صغيرة جنوب سبخة دخان، وهي تربة رطبة وموحلة بسبب قربها من السبخة. النوع الثاني ضمن هذه المجموعة هو التربة الضحلة (Orthents) والتي تتواجد في أماكن متفرقة في جنوب قطر، وهي تربة ضحلة فوق أسطح تعرضت للتعرية الحديثة، وتفتقر تلك التربة إلى وجود الأفق (USDA, 1999).

تتكون التربة الرملية المفككة (Psamments) من رواسب رملية غير متماسكة، وتغطي مناطق صغيرة على امتداد طية دخان المحدبة على طول الساحل الجنوبي الشرقي.

in the north. This is because they have moved from north to south with the prevailing northerly wind, making a crescent shape. The source of the sand is the Arabian Basin (see section 5.1), which disappeared with sea level rise, so no sand dunes occur in the northern part of the country

تتواجد الكثبان الرملية في المناطق الجنوبية من قطر فقط؛ حيث إن تلك الكثبان قد تحركت من الشمال إلى الجنوب بفعل الرياح الشمالية السائدة في دولة قطر، ويعود منشأ تلك الكثبان للحوض العربي خلال فترة العصر الجليدي الأخير قبل أن تغمره مياه البحر وينقطع مصدر الرمال (راجع 1.5)



Rowda soil profile
مقطع التربة في إحدى الروض

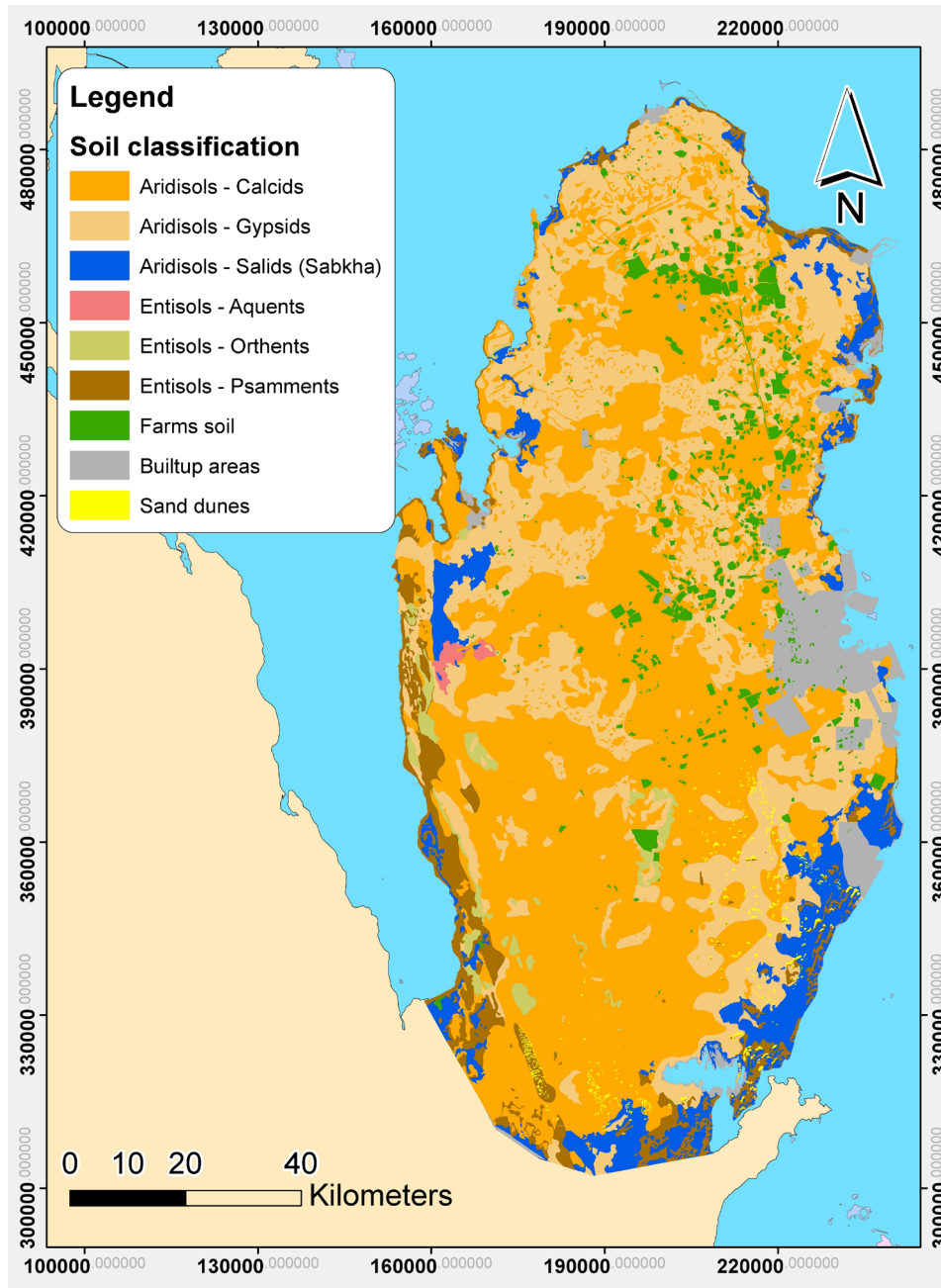
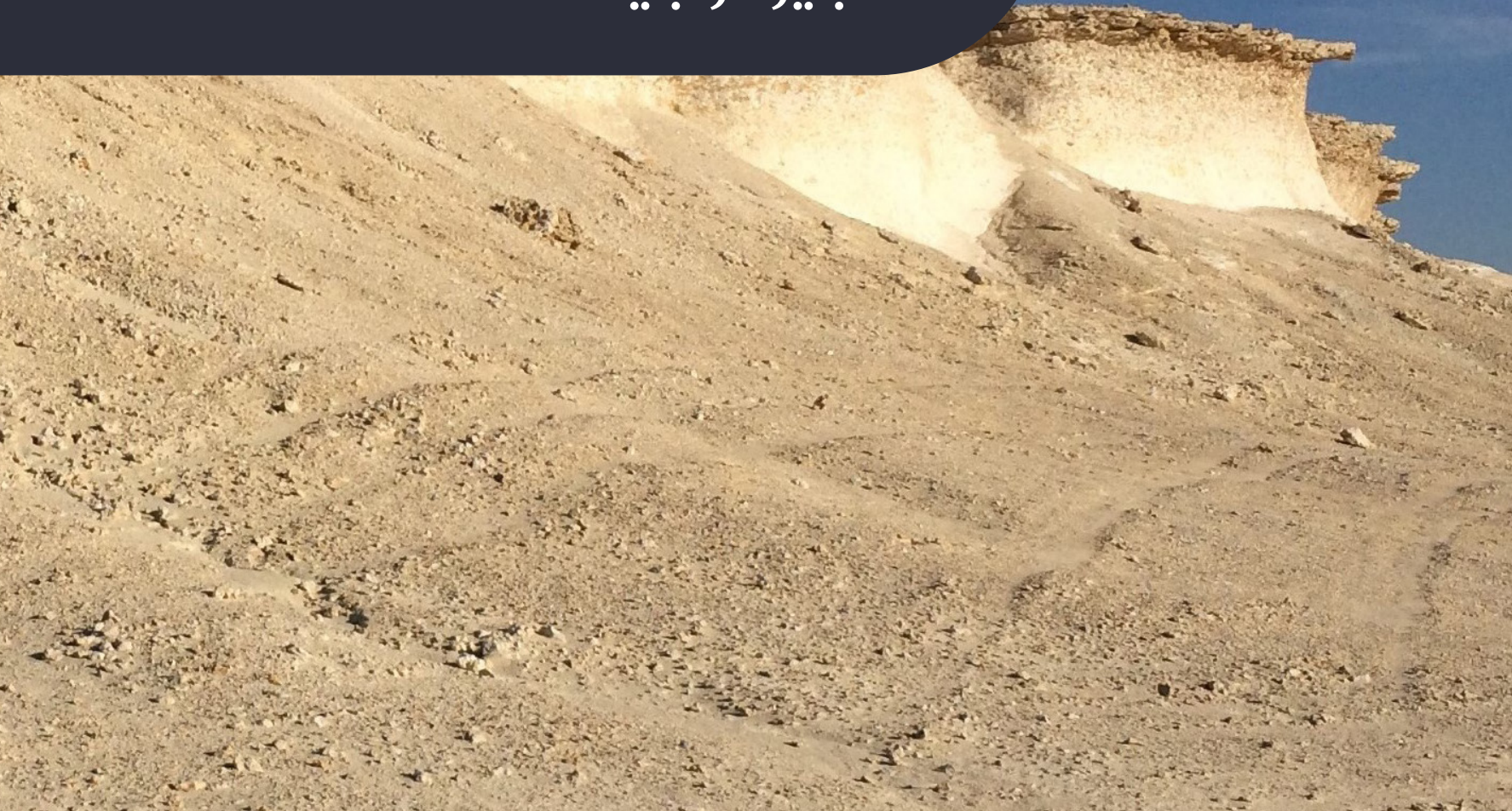


Figure 2.7: Soil map of Qatar
شكل 7.2: خريطة التربة في قطر

(3)
Geology
الجيولوجيا



3.1 Surface Geology

Qatar geology is part of the Arabian Shelf, that occurs between the Arabian Shield in western part of the Arabian Peninsula, and the Zagros mountains in the west of Iran. Tectonic forces such as subduction, tilting and continuous subsidence resulted in the eastern part to be under the water for millions of years, when Tethys Sea existed. As a result, sedimentation of carbonate rocks occurred in the shallow marine environment (Alsharhan & Nairn, 1997) in the central and eastern parts of the Arabian Peninsula, in addition to erosion of the rocks in the Arabian Shield. In such an environment, various sedimentation patterns occurred. Erosion of the Arabian Shield and sedimentation resulted in the formation of sandstone, silt and shale, whereas deposition in the shallow marine environment resulted in the accumulation of limestone. The formation of evaporites layers such as gypsum and anhydrite indicates the existence of isolated saline lagoons separated from the sea. These evaporites layers occurred in conditions analogous to present day Sabkhas (salt flats) (Whitaker et al., 2014), which was formed after the Holocene Highstand (Engel et al., 2020) (see section 5.2).

The vast majority of Qatar's surface and near surface geology comprises carbonate rocks from the Eocene Epoch. Smaller areas are covered with deposits from Holocene such as beach deposits, salt flats (sabkhas) and sand dunes, which occur in the south. The sand dunes were accumulated in the north when sea level was lower than the present level and the Arabian Gulf was an open basin (see Chapter 5). These dunes have moved from north to south by the prevailing northerly winds, but the sand supply does not exist anymore due to rise in sea level in the Holocene (Glennie & Singhvi, 2002). The Middle Eocene Dammam Formation covers most of the surface area of Qatar, whereas the underlying Rus Formation from the Early Eocene outcrops in a small area in the north-eastern part of the country, as shown in Figure 3.1. The Umm er Radhuma Formation, from the Early Eocene, does not outcrop in Qatar, but in central Arabia. The Miocene Dam Formation appears only in some areas in the south and in the outcrop of Dukhan anticline in the west.

1.3 الجيولوجيا السطحية

تعتبر جيولوجيا قطر جزء من الجرف العربي الواقع بين الدرع العربي في غرب الجزيرة العربية وسلسلة جبال زاغروس في غرب إيران. أدت القوى التكتونية مثل الانغراس للأسفل والإمالة والهبوط المستمر إلى أن يكون الجزء الشرقي من الجزيرة العربية مغمورًا بمياه البحر ملايين السنين، عندما كان بحر تيثس موجودًا، مما أدى إلى ترسيب صخور الكربونات في البيئة البحرية الضحلة (Alsharhan & Nairn, 1997) في الأجزاء الوسطى والشرقية من شبه الجزيرة العربية، بالإضافة إلى تآكل الصخور في الدرع العربي. في مثل هذه البيئة حدثت أنماط ترسيب مختلفة. وأدى تآكل الدرع العربي والترسيب إلى تكوين الحجر الرملي والطبي والطفل. في حين أدى الترسب في البيئة البحرية الضحلة إلى تراكم الحجر الجيري. يشير تكوين الطبقات التبخرية مثل الجبس والأنهيدرايت إلى وجود بحيرات ملحية معزولة منفصلة عن البحر. لقد تشكلت تلك الطبقات التبخرية في ظروف مشابهة لظروف تشكل السبخات في وقتنا الحالي (Whitaker et al., 2014)، والتي تشكلت بعد بلوغ الحد الأعلى لسطح البحر في فترة الهولوسين (Engel et al., 2020) (انظر القسم 2.5).

تتكون الغالبية العظمى من الجيولوجيا السطحية والقريبة من السطح في قطر من صخور كربونية من الفترة الإيوسينية، وهناك مساحات قليلة مغطاة برواسب من عصر الهولوسين مثل رواسب الشاطئ، المسطحات الملحية (السبخات) والكثبان الرملية، التي تتواجد في جنوب قطر. لقد تراكمت تلك الكثبان الرملية في الشمال عندما كان مستوى سطح البحر أقل من المستوى الحالي وكان الخليج العربي حوضًا مفتوحًا (انظر الفصل 5)، ثم انتقلت هذه الكثبان من الشمال إلى الجنوب بسبب الرياح الشمالية السائدة، ولكن لم يعد مصدر تلك الرمال موجودًا بسبب ارتفاع مستوى سطح البحر في فترة الهولوسين (Engel et al., 2020).

يغطي تكوين الدمام الإيوسيني الأوسط معظم مساحة قطر، في حين يظهر انكشاف تكوين الرس (من فترة الإيوسين السفلى) والواقع إلى الأسفل من الدمام في منطقة صغيرة في الجزء الشمالي الشرقي من قطر كما هو مبين في الشكل 3.1. ولا يظهر أي انكشاف لتكوين أم الرضمة (من منطقة الإيوسين السفلى) في قطر، ولكن في وسط شبه الجزيرة العربية، أما تكوين الدمام (من فترة الميوسين) فإنه يظهر فقط في بعض المناطق في الجنوب وفي طيبة دخان المحدبة في غرب قطر.

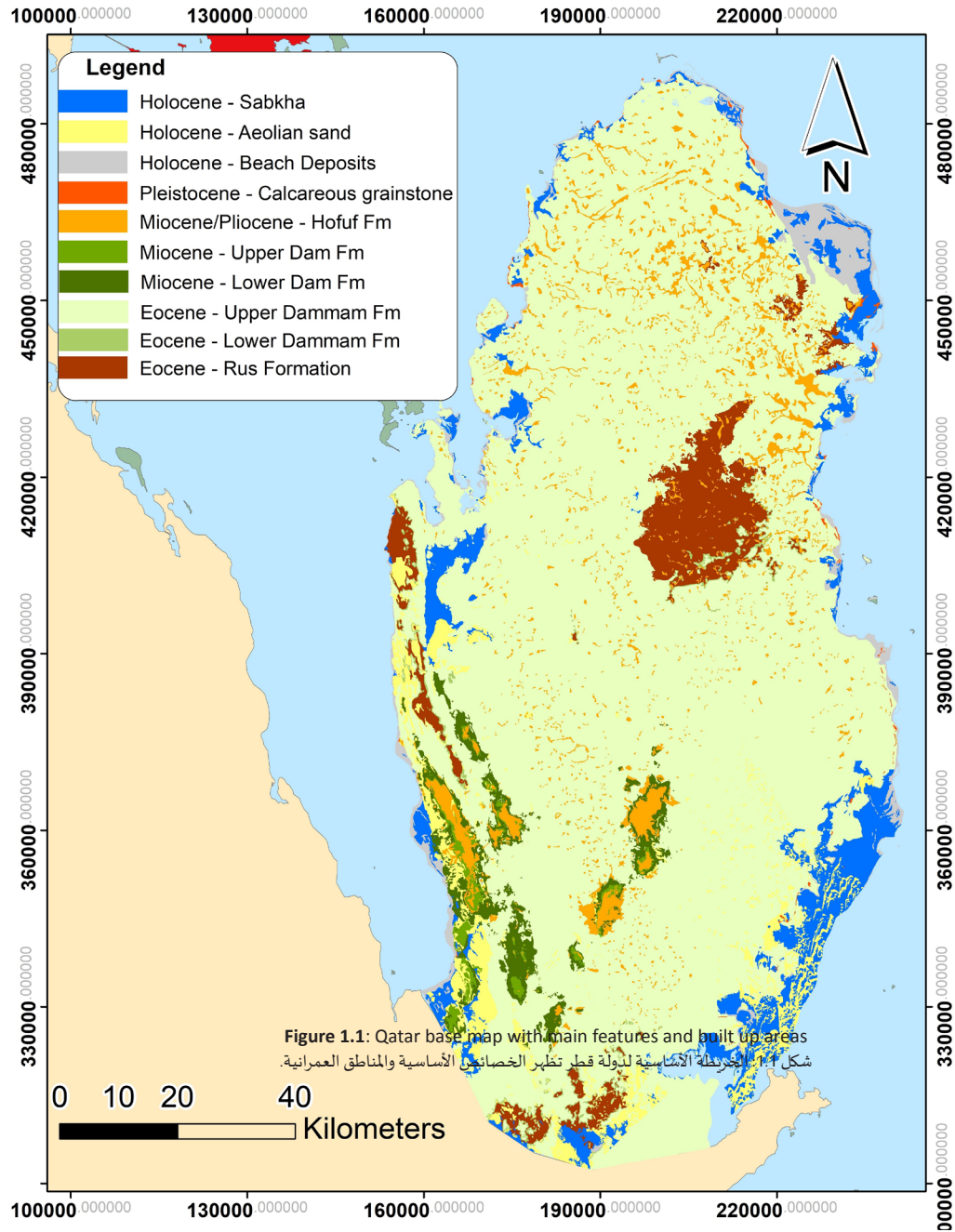


Figure 3.1: Surface geology of Qatar
 شكل 1.3: الجيولوجيا السطحية لدولة قطر

3.2 Structural Geology

Faults, folds, fractures, and caves are very common in the geology of Qatar. The main geological feature in the country is the main anticline called Qatar Arch, which extends in the north-north east to the south-south west direction, as shown in Figure 3.2. It is slightly folded and is more than 300 kms long as it extends north to the Zagros mountains (C.R. Perotti et al., 2011). The stresses on the arch are outwards of the arch axis. The arch was formed in the late Paleozoic, and it divides the Arabian Gulf Basin into two sub-basins (Alsharhan & Nairn, 1997). This arch hosts the largest offshore gas reserve shared between Qatar and Iran (Rivers & Larson, 2018). The other main geological feature is the Dukhan anticline, in the western side of Qatar. It contains one of the earliest on-shore oil fields (Nasir & Al-Saad, 2003). The stresses on Dukhan Anticline are outwards of its axis. Contrary to old findings, recent studies showed that Qatar Arch and Dukhan Anticline are not connected (Rivers & Larson, 2018). The Salwa Syncline occurs to the west of Dukhan anticline, and runs almost parallel to it, with stresses towards its axis. This syncline was flooded with water during the late Holocene (see chapter 5), forming Salwa Gulf. Other features include the uprising of Simsim Dome in the north east, which creates fractures and small cliffs and slopes in the area (Leblanc, 2017b).

2.3 الجيولوجيا التركيبية

تتميز الجيولوجيا التركيبية في قطر بالصدوع والطيات والكسور والكهوف (الدحول). يعتبر قوس قطر من أهم معالم الجيولوجيا التركيبية في قطر؛ حيث يمتد هذا القوس المحذب في الاتجاه الشمالي-الشمالي الشرقي وحتى الجنوبي-الجنوب الغربي، كما هو موضح في الشكل 3.2 ويمتد هذا القوس المحذب لمسافة أكثر من 300 كيلومتر في اتجاه جبال زاغروس (C.R. Perotti et al., 2011). إن قوى الإجهاد على قوس قطر هي باتجاه الخارج بالنسبة لمحور القوس، وقد تشكل في حقبة الحياة القديمة، مما أدى إلى تقسيم حوض الخليج العربي إلى حوضين (Alsharhan & Nairn, 1997). يوجد أكبر مخزون للغاز الطبيعي تحت قوس قطر داخل البحر؛ حيث تتشارك قطر وإيران في هذا المخزون (Rivers & Larson, 2018). إضافة لما سبق فإن طية دخان المحدبة من المعالم الجيولوجية الرئيسية، وتقع في الجزء الغربي من قطر، وتحتوي تلك الطية على أول مخزون نفطي على اليابسة (Nasir & Al-Saad, 2003). وكما في حالة قوس قطر فإن الإجهادات على طية دخان المحدبة باتجاه خارج المحور الرئيسية للطية. على النقيض من الدراسات السابقة فإن قوس قطر وطية دخان المحدبة غير مرتبطتين (Rivers & Larson, 2018). تقع طية سلوى المقعرة إلى الغرب من طية دخان وباتجاه مواز لها تقريباً، واتجاه الإجهادات عليها للخارج. إضافة لما سبق هنالك قبة سمسمة الناتجة عن ارتفاع أرضي في الشمال الشرقي لقطر، الأمر الذي أدى إلى تكون الجروف والمنحدرات الصغيرة في تلك المنطقة (Leblanc, 2017b).

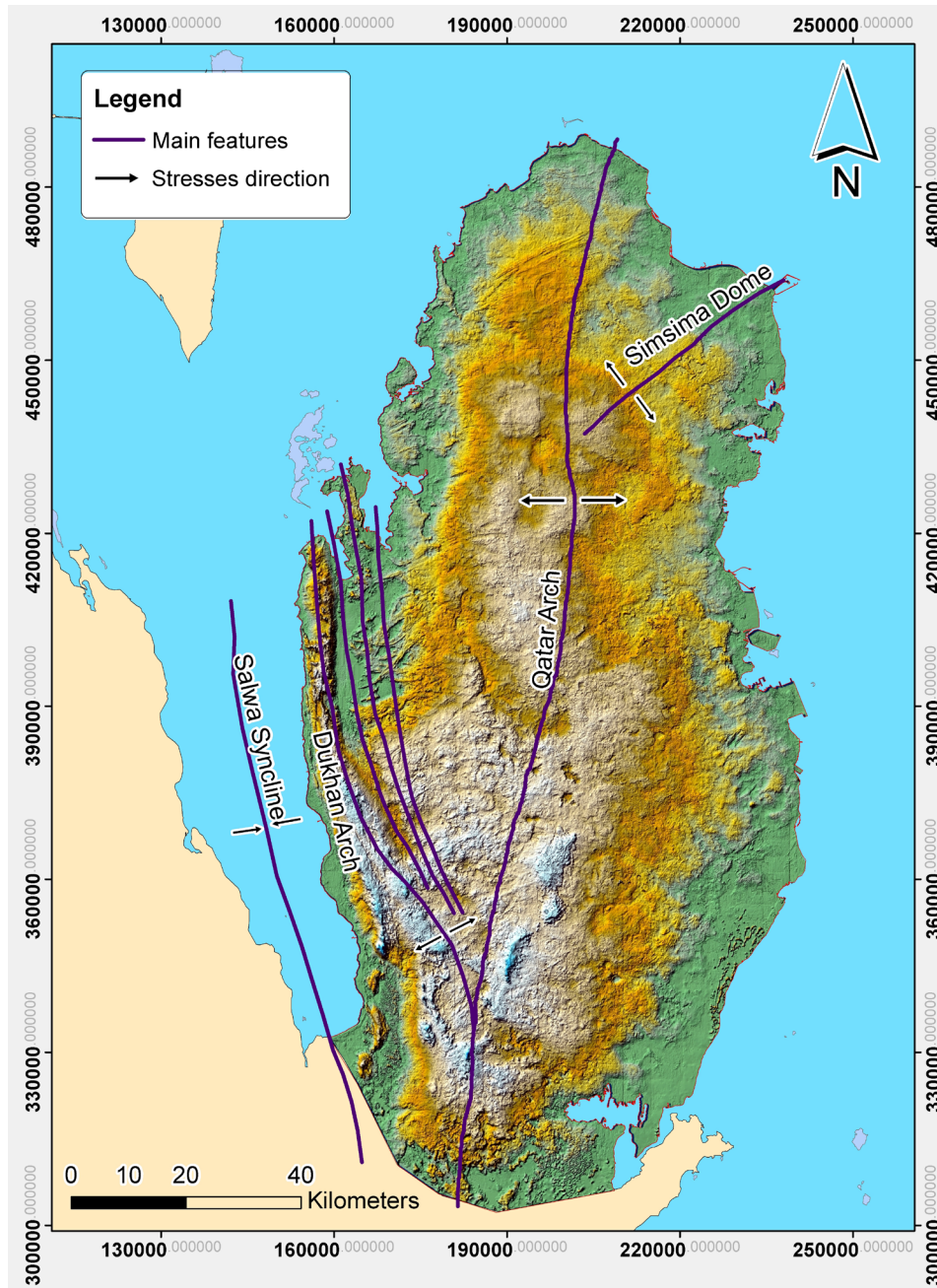


Figure 3.2: The main structural features of Qatar geology
شكل 2.3: الملامح الرئيسية للجيولوجيا التركيبية في قطر

3.3 Hofuf Formation

The Miocene/Pliocene Hofuf formation comprises alluvial sand, sandstone and pebbles. The formation is named after the city of Hofuf in Eastern Saudi Arabia. The deposits of Hofuf were transported through rivers that used to flow from the Arabian Peninsula towards the east and draining into the Gulf (see Chapter 1). It occurs in small areas in southwestern Qatar parallel to Dukhan anticline and in the high terrain of the southern part of the country (see Figure 3.1). The sand and sandstone of Hofuf formation has been heavily used in construction in the last few years.

3.3 تكوين الهفوف الميوسن - البليوسن

يتركب تكوين الهفوف الميوسيني/البليوسيني من الرمل الغريني والحجر الرملي والحصي. تم تسمية التكوين على اسم مدينة الهفوف شرق المملكة العربية السعودية، وقد انتقلت تلك الرواسب عبر الأنهار التي كانت تتدفق من شبه الجزيرة العربية باتجاه الشرق وتصب في الخليج (انظر الفصل 5). يتواجد تكوين الهفوف في مناطق صغيرة في جنوب غرب قطر بموازية طيبة دخان المحدبة وفي المناطق المرتفعة في جنوب قطر (انظر شكل 3.1). في السنوات الأخيرة تم تجريف أجزاء واسعة من رواسب الهفوف لاستخدامها في المشاريع الإنشائية.



Hofuf Formation
تكوين الهفوف

3.4 Dammam Formation–Middle Eocene

The Middle Eocene Dammam Formation covers around 80% of the land surface in Qatar, as appears in Figure 3.3, and sitting conformably on the top of Rus Formation. The formation is named after the Dammam Dome in eastern Saudi Arabia (Alsharhan & Nairn, 1997). It consists of tan to light brown limestone, with marl interbeds in the upper part, whereas the lower part consists of shale (Leblanc, 2017a). The thickness of this Formation varies between 0 in the northeast (where the Rus Formation outcrops) and 40-50 meters near Dukhan anticline in the west of Qatar (Le Blanc., 2017; Rivers et al., 2019). It was deposited in a shallow marine environment (Alsharhan & Nairn, 1997). Several studies have divided the Dammam Formation into various units, but all of them have been identified into two main groups within the formation: (1) The Lower Dammam, and (2) The Upper Dammam (Alsharhan & Nairn, 1997; Cavalier, 1970; Al-Saad, 1990).

The Lower Dammam consists of Midra (and Saila) Shales Member, and Dukhan Alveolina Limestone Member. The Midra Shale Member consists of gypsiferous shale with shark teeth, and it was accumulated in a shallow marine during the peak of less acidic climate conditions (Alsharhan & Nairn, 1997). The Dukhan Alveolina Member consists of large-foraminifera bearing limestone. The Upper Dammam group consists of two units: The Umm Bab Member (formerly known as the Simsima Chalk Member) and Abaruq Member Marl Member (Alsharhan & Nairn, 1997; Cavalier, 1970; Al-Hajari, 1990). The Umm Bab Member consists of chalky limestones, which is locally dolomitized or silicified, and The Abaruq Member consists of silicified dolomite and dolomitic marly limestones.

4.3 تكوين الدمام – الإيوسين الأوسط

يغطي تكوين الدمام من الإيوسين الأوسط أكثر من 80% من مساحة قطر، كما يظهر في شكل 3.3، والذي يقع بشكل متطابق فوق تكوين الرس. يرجع أصل تسمية هذا التكوين نسبة إلى قبة الدمام في شرق السعودية (Alsharhan & Nairn, 1997) ويتشكل جزئه العلوي من الحجر الجيري الأسمر إلى البني الفاتح، مع تداخلات مارل، بينما يتكون الجزء السفلي من الطفّل (Leblanc, 2017a). تتراوح سماكة هذا التكوين بين 0 في مناطق انكشاف تكوين الرس إلى 40-50م بالقرب من طية دخان المحدبة في غرب قطر (Le Blanc., 2017; Rivers et al., 2019)، وقد تم ترسيب هذا التكوين في بيئة بحرية ضحلة (Alsharhan & Nairn, 1997). قامت العديد من الدراسات بتقسيم تكوين الدمام لأعداد مختلفة من الوحدات، ولكن جميع الدراسات اتفقت على تقسيم هذا التكوين إلى مجموعتين: (1) مجموعة الدمام الأسفل و(2) مجموعة الدمام الأعلى (Alsharhan & Nairn, 1997; Cavalier, 1970; Al-Saad, 1990).

تحتوي مجموعة الدمام الأسفل على عضوين هما: عضو طفّلة الميدرا (والسائلة) وعضو حجر دخان الجيري الألفيوليوني. تتكون طفّلة الميدرا (والسائلة) من الصخر الجبسي مع حفريات أسنان سمك القرش، وقد تراكمت رواسب هذا العضو في مياه ضحلة خلال ذروة الظروف المناخية الأقل حمضية (Alsharhan & Nairn, 1997). يتكون عضو حجر دخان الجيري الألفيوليوني من الحجر الجيري المنقوب. تتكون مجموعة الدمام العلوي من عضوين هما عضو أم باب (كان يعرف سابقاً بعضو سمسة الطباشيري) وعضو أبروق (Alsharhan & Nairn, 1997; Cavalier, 1970; Al-Hajari, 1990). يحتوي عضو أم باب على حجر جيري طباشيري متحول إلى دولوميت وسيلكا في بعض الأماكن، أما عضو أبروق فيحتوي على دولوميت وحجر جيري طفّلي.



Abarug Member of Dammam
عضو أبروق - تكوين الدمام

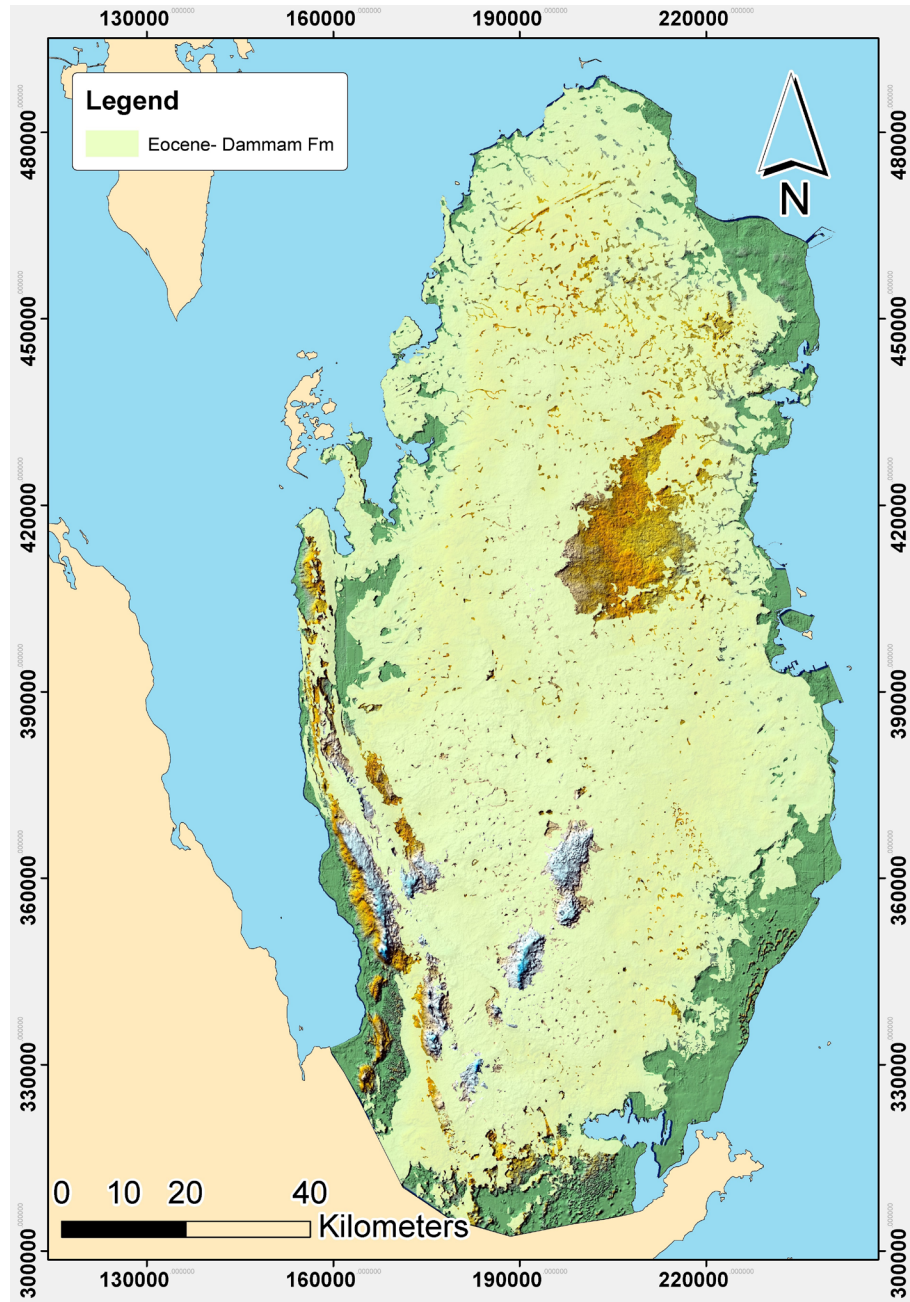


Figure 3.3: Outcrop of Dammam Formation in Qatar draped over topography features
شكل 3.3: انكشاف تكوين الدمام في قطر وتظهر الطبوغرافيا في الخلفية

3.5 Rus Formation–Early Eocene

Rus Formation is one of the main geological layers in Qatar and forms a good aquifer, especially in the northern part of the country. It is situated above the Umm er Radhuma Formation and underneath the Dammam Formation. The formation was named after a small hill called Umm er Ru'us at the eastern side of Dammam Dome in Saudi Arabia, where it outcrops (Alsharhan & Nairn, 1997). In Qatar, it outcrops in the north-eastern part of the country, part of Dukhan anticline, and at the southern border between Qatar and Saudi Arabia (refer to map 3.1). It is believed that Rus Formation was deposited in a shallower marine environment that the underlying Umm er Radhuma Formation (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; John M. Rivers et al., 2019). It is reported the contact between Rus and Umm er Radhuma Formation is abrupt as marine fauna is missing.

Several publications divided Rus Formation into 2 to 3 members, but the most recent study refers to Al Khor Member in the top and Traina Member in the bottom (Al-Saad, 2003). Al Khor Member is composed of dolomitic chalky limestone, whereas the Traina Member is composed of gypsiferous, dolomitic limestone (Leblanc, 2017a). A gypsum evaporite layer occurs within the Rus Formation (see section 4.5), but limited to the southern part of the country, with a high thickness near the shore and decreasing inland. Little information is available about the thickness of the Rus Formation, but the minimum thickness occurs along the anticlines and the maximum occurs on the east and west sides of southern Qatar, where gypsum layer occurs. The thickness of the Rus formation varies from 20 meters in the center of Qatar to 110 meters in the southeast and southwest (Al-Hajari, 1990). The maximum elevation of the Rus Formation outcrop is approximately 25 meters above mean sea level to the north of Dukhan, and the lowest outcrop elevation is 0 near the southern border of Qatar (Leblanc, 2017a).

5.3 تكوين الرس – الإيوسين المبكر

طبقة الرس هي واحدة من الطبقات الرئيسية في جيولوجيا قطر وتشكل خزان جوفي جيد وخصوصًا في شمال قطر. تقع تلك الطبقة تحت طبقة الدمام وفوق طبقة أم الرضمة، وترجع تسميتها نسبة لمنطقة أم الرؤوس الموجودة على الجانب الشرقي لقبة الدمام في السعودية؛ حيث يظهر انكشاف لتلك الطبقة (Alsharhan & Nairn, 1997). يظهر انكشاف طبقة الرس في قطر في شمال شرق قطر، وفي جزء من طية دخان المحذبة وفي الجنوب بالقرب من الحدود مع السعودية (راجع خريطة 3.1). من المرجح أن عملية ترسيب طبقة الرس قد تمت في بيئة بحرية ضحلة، مقارنةً مع طبقة أم الرضمة الواقعة تحتها (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; John M. Rivers et al., 2019). يذكر أن التغير بين طبقة الرس وطبقة أم الرضمة هو تغير مفاجيء لانعدام وجود حفريات حيوانات بحرية.

قسمت العديد من الدراسات طبقة الرس إلى ثلاث وحدات، لكن أحدث دراسة قسمت طبقة الرس إلى وحدتين جيولوجيتين؛ العليا وهي وحدة الخور، والسفلى وهي وحدة ترينا (Al-Saad, 2003). تتكون وحدة الخور من الحجر الجيري الدولوميتي الطباشيري، أما وحدة ترينا فتتكون من الحجر الجيري الجبسي الدولوميتي (Leblanc, 2017a). يوجد طبقة تبخيرية من الجبس في داخل طبقة الرس، ولكن وجود الجبس محصور في الجزء الجنوبي من قطر) راجع (5.4)، كما أن سمك طبقة الجبس كبير بالقرب من الشواطئ الشرقية والغربية بينما يتناقص السمك كلما ابتعدنا عن الشاطئ. تتوافر القليل من المعلومات عن سمك طبقة الرس ولكن سمك تلك الطبقة يكون في أقل مستوى له على امتداد الطيات المحذبة ويزداد كلما اتجهنا شرقًا أو غربًا في الجزء الجنوبي من قطر. تتراوح سماكة طبقة الرس بين 20م في وسط قطر إلى حوالي 110م في المناطق الشرقية-الجنوبية والغربية-الجنوبية (Al-Hajari, 1990). يبلغ أقصى ارتفاع لانكشاف طبقة الرس 25م فوق سطح البحر إلى الشمال من دخان بينما يبلغ أقل ارتفاع للانكشاف 0م فوق سطح البحر بالقرب من حدود قطر الجنوبية (Leblanc, 2017a).

Figure 3.4 shows the terrain of the Rus Formation top. It shows the top elevation of the Formation varies between -35 meters to 55 meters above mean sea level. The terrain resembles the geological structure of the peninsula, where the highest areas are along the Qatar Arch and Dukhan anticline.

يبين الشكل 3.4 خريطة تضاريس تكوين الرس، والتي تظهر أن ارتفاع هذا التكوين يتراوح بين 35 م تحت مستوى سطح البحر إلى 55 م فوق سطح البحر. يُماثل شكل تضاريس طبقة الرس شكل الجيولوجيا الهيكلية لشبه جزيرة قطر؛ حيث إن المناطق المرتفعة على امتداد قوس قطر وطية دخان المحدبة.



Rus Formation (below red line)
تكوين الرس (تحت الخط الأحمر)

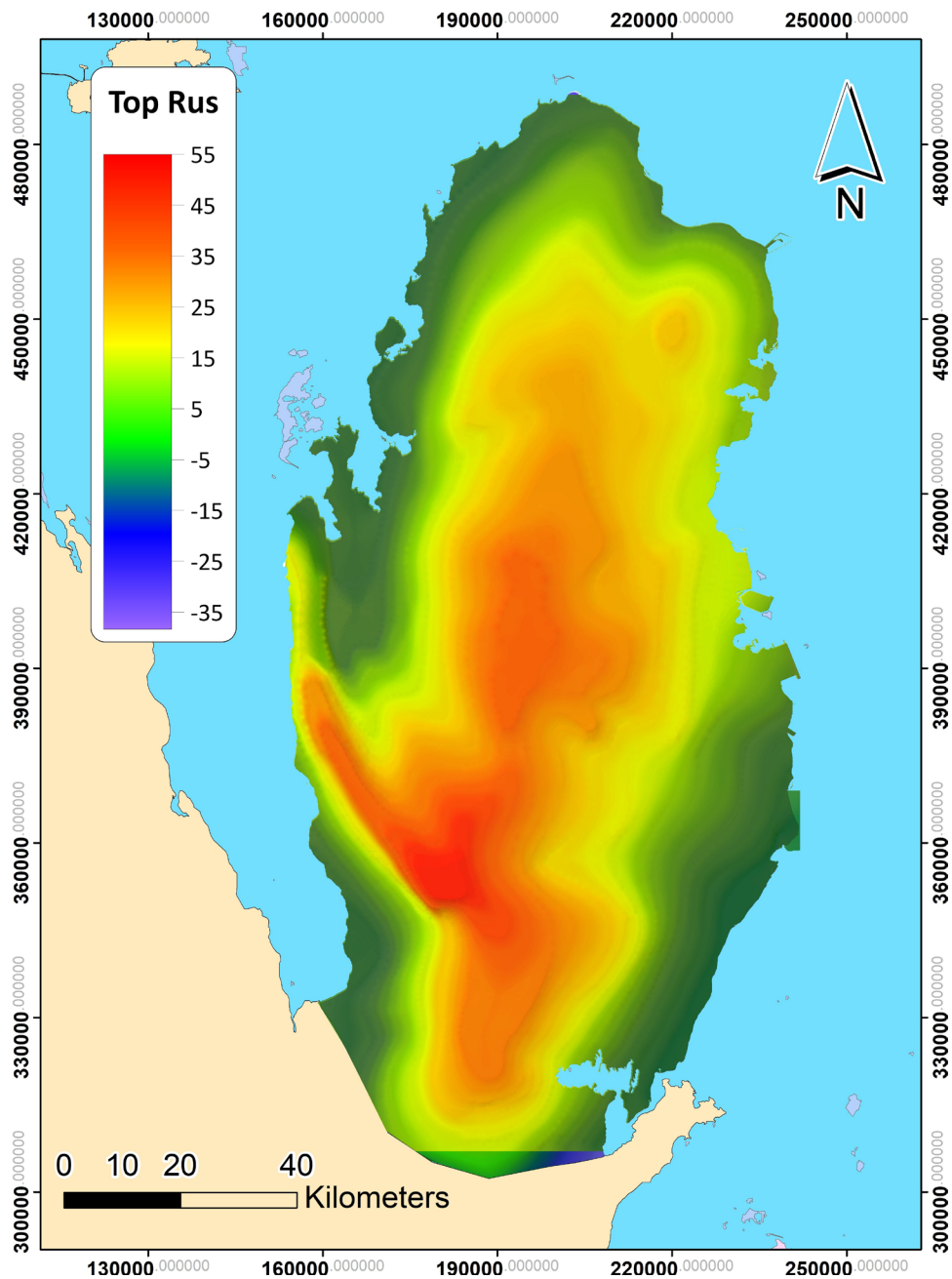


Figure 3.4: Structural terrain map of the near top Rus Formation in Qatar (meters above mean sea level)

شكل 4.3: خريطة تضاريس سطح طبقة الرس (بالمتر بالنسبة لمستوى سطح البحر). تم عمل هذه الخريطة بناءً على المصادر

3.6 Umm Er Radhuma Formation– Paleocene/Early Eocene

The Umm Er Radhuma Formation is the third main layer from the land surface in Qatar, and it constitutes an important aquifer in Qatar and other countries. It extends over a vast area from from southern Iraq to the Rub al Khali Basin (Ghazal, 1987). The name is after an area called Umm Radma near Hafer Al Batin in northern Saudi Arabia (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Al-Hajari, 1990), where an outcrop type section occurs. It occurs between Rus and Aruma Formations, and has a fairly uniform thickness of 100 to 370 meters in Qatar. The thinnest part occurs near Dukhan anticline (Boukhary M et al., 2011). Several studies reported that this formation was deposited in a shallow, warm marine environment (Alsharhan & Nairn, 1997; Eccleston, Pike & Harhash, 1981). No outcrop of this Formation occurs in Qatar, but it appears in a narrow belt around Arabian Shield in the Arabian Peninsula (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Al-Hajari, 1990). The lithology of this layer consists of off-white dolomitic limestone in its upper part and harder vesicular dolomite in the lower part, with minor gypsum and anhydrite (Alsharhan & Nairn, 1997; Rivers et al., 2019). Although the majority of the Formation is composed of limestone and dolomite, an area of chert and chert and silicified limestone was found in the northeastern part of Qatar, some 15 meters under the top of the Formation (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). Figure 3.5 shows the terrain of the top of Umm Er Radhuma Formation in Qatar, with respect to the mean sea level. The elevation of the top varies between -40 and -220 meters above mean sea level (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981; Ghazal, 1987; Al-Hajari, 1990).

6.3 طبقة أم الرضمة - باليوسين/ الإيوسين المبكر

يعتبر تكوين أم الرضمة ثالث طبقة رئيسية من سطح الأرض وتعتبر خزانًا جوفيًا مهمًا في قطر وفي العديد من الدول المجاورة؛ حيث تمتد هذه الطبقة على مساحات شاسعة من جنوب العراق وحتى الربع الخالي (Ghazal, 1987). يعود أصل تسمية تلك الطبقة إلى منطقة أم الرضمة بالقرب من حفر الباطن شمال السعودية؛ حيث يظهر انكشاف لتلك الطبقة (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Al-Hajari, 1990). يقع تكوين أم الرضمة بين تكوين الرس وتكوين العرمة، وسماكة تلك الطبقة منتظمة تقريبًا، وتتراوح بين 100 إلى 370م؛ حيث إن أقل المناطق سماكة موجودة بالقرب من طية دخان المحدبة (Boukhary M et al., 2011). لقد ذكرت العديد من الدراسات أن ترسيب تكوين أم الرضمة تم في بيئة بحرية دافئة وضحلة (Alsharhan & Nairn, 1997; Rivers et al., 2019). لا يوجد انكشاف لهذا التكوين في قطر، ولكن يظهر الانكشاف على هيئة حزام ضيق يمتد حول الدرع العربي في الجزيرة العربية (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981). يتكون الجزء العلوي من تكوين أم الرضمة من حجر جيرى دولوميتي أبيض مائل للصفرة، بينما يحتوي الجزء السفلي على دولوميت حبيبي صلب مع وجود القليل من الجبس والأمهيدرايت (Alsharhan & Nairn, 1997; Rivers et al., 2019). على الرغم من أن هذا التكوين يحتوي بمعظمه على الحجر الجيري والدولومايت إلا أن هناك طبقة من الصوان والسيلكا موجودة في شمال شرق قطر على عمق حوالي 15م من أعلى التكوين (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981). يبين الشكل 3.5 خريطة تضاريس تكوين الرضمة، والتي تظهر أن ارتفاع هذا التكوين يتراوح بين -40 إلى -220م فوق سطح البحر (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981; Ghazal, 1987; Al-Hajari, 1990).

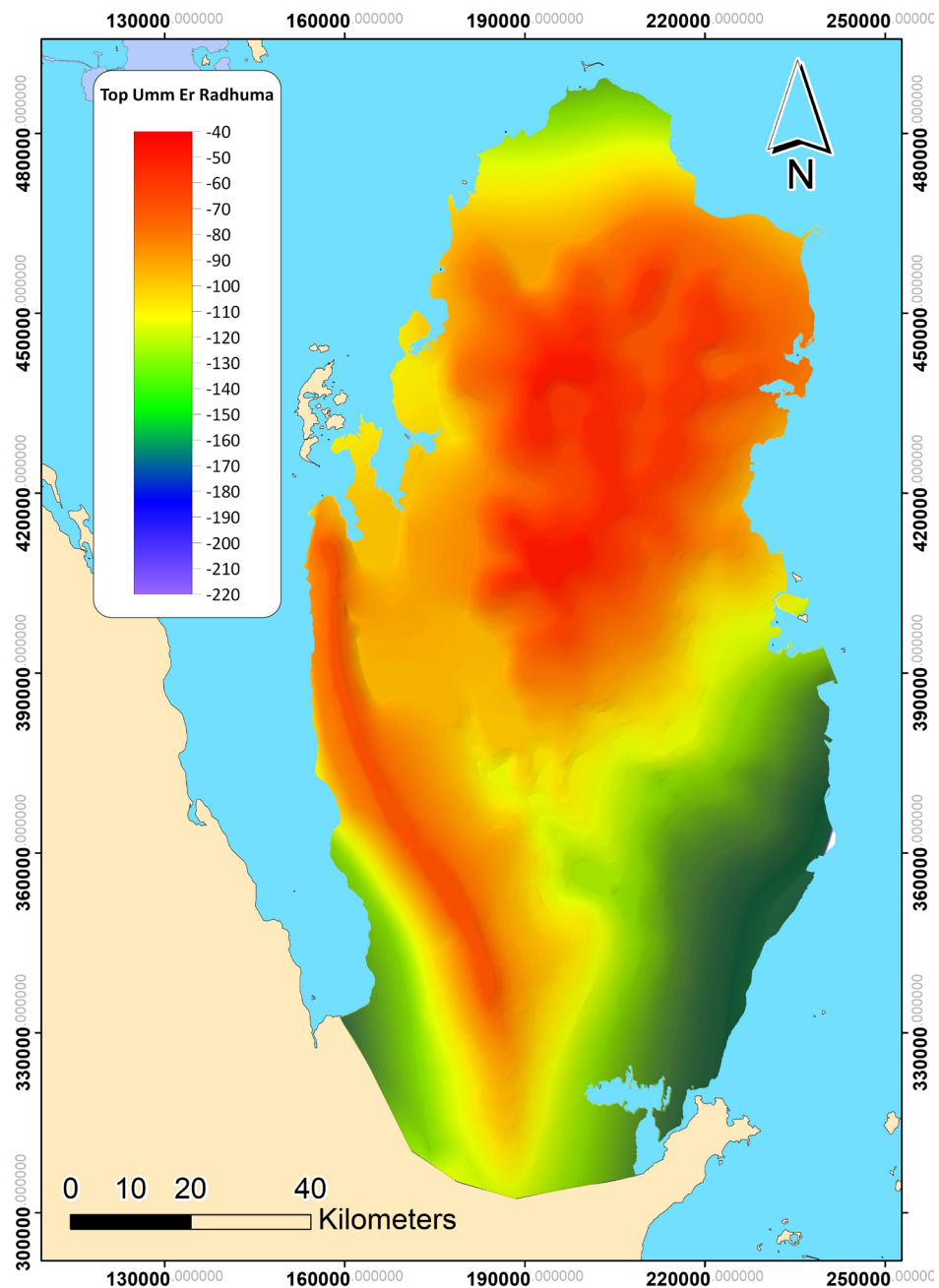


Figure 3.5: Structural terrain map of the near top Umm Er Radhuma Formation in Qatar (meters above mean sea level)
شكل 5.3: خريطة تضاريس سطح طبقة أم الرضمة (بالمتر بالنسبة لمستوى سطح البحر). تم عمل هذه الخريطة بناءً على المصادر

3.7 Aruma Formation-Late Cretaceous

The Aruma Formation belongs to the Upper Cretaceous Epoch, which extends from 100.5 million years before the present (BP), and occurs underneath the Umm Er Radhuma Formation. Some publications, especially in the oil and gas, refer to this layer as Simsim (Al-Hajari, 1990; Le blanc., 2017). The formation was named after Al-Aramah Plateau in Saudi Arabia, and deposited in shallow marine environment (El-Nakhal & El-Naggar, 1994). It extends over a vast area covering the entire eastern Arabian Peninsula, Kuwait and Qatar. It outcrops in central Arabia and occurs in the sub-surface in Qatar. Limestone and dolomite, with interbedded shale are the main component of this Formation (Alsharhan & Nairn, 1997). The upper part of the Formation comprises limestone of 120 meters thick, underlain by a shale layer of more than 100 m (MMAA, 2004). The top elevation of the Aruma Formation varies between -300 to -460 meters, with respect to the mean sea level, as shown in Figure 3.6. The figure shows that the Formation is shallower in the north of Qatar and deeper in the south. The thickness of Aruma Formation varies between 240 meters in the north to 265 meters in the south (MMAA, 2004).

7.3 تكوين العرمة - العصر الطباشيري المتأخر

يرجع العمر الجيولوجي لتكوين العرمة إلى فترة العصر الطباشيري المتأخر، الذي يمتد من 100.5 مليون سنة إلى 66 مليون سنة قبل الآن. يقع هذا التكوين تحت تكوين أم الرضمة مباشرة، وتم ترسيب التكوين في بيئة بحرية ضحلة (El-Nakhal & El-Naggar, 1994). بعض المؤلفات وخصوصاً في مجال النفط والغاز تسمي هذه التكوين «سمسم» (Al-Hajari, 1990; Le blanc., 2017)، أما اسم العرمة فهو نسبة إلى هضبة العرمة في العربية السعودية. يمتد تكوين العرمة على مساحات شاسعة تشمل وسط وشرق الجزيرة العربية والكويت وقطر، وانكشاف هذا التكوين يقع في وسط الجزيرة العربية بينما يقع في طبقات الجيولوجيا السفلية ولا يظهر على سطح الأرض في قطر. الحجر الجيري والدولومايت والطفل هم المكون الأساسي لتكوين العرمة (Alsharhan & Nairn, 1997). يمكن تمييز طبقتين في تكوين العرمة: الطبقة العلوية وتتكون من الحجر الجيري والدولومايت وتبلغ سماكتها 120 م والطبقة السفلية وتتكون من الطفل الطيني وتبلغ سماكتها 100 م (MMAA, 2004). يتراوح ارتفاع تكوين العرمة ما بين -300 إلى -460 م بالنسبة لمنسوب سطح البحر، كما يظهر في شكل 3.6، ويمكن ملاحظة أن عمق تكوين العرمة يزداد كلما اتجهنا جنوباً. تتراوح سماكة هذا التكوين ما بين 240 م في الشمال إلى 265 م في الجنوب (MMAA, 2004).

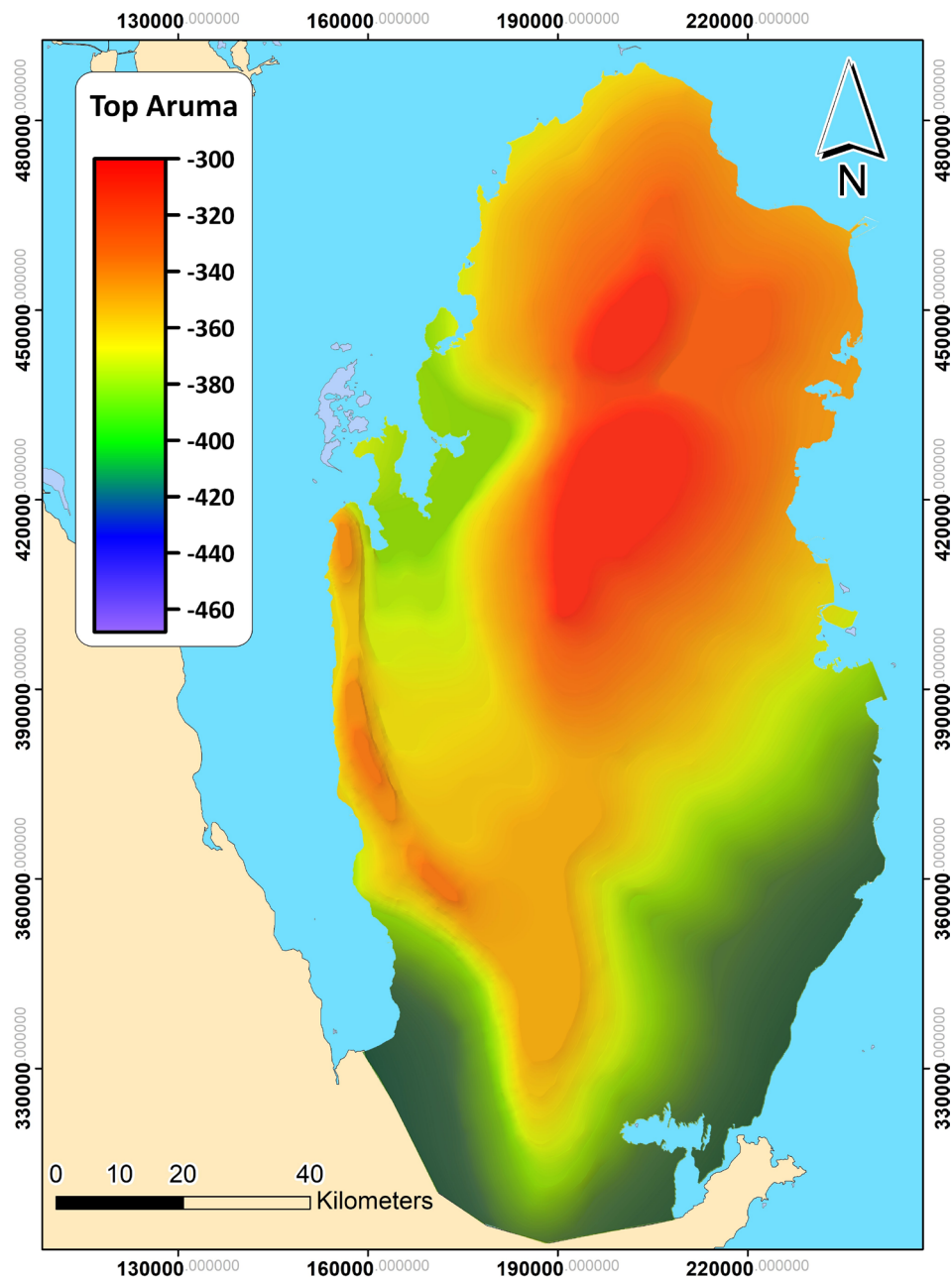


Figure 3.6: Structural terrain map of the near top Aruma Formation in Qatar (meters above mean sea level)
شكل 6.3: خريطة تضاريس سطح طبقة العرمة (بالمتر بالنسبة لمستوى سطح البحر). تم عمل هذه الخريطة بناءً على المصادر (Al-Hajari, 1990).

(4)

Water Resources

الموارد المائية



4.1 Aquifers

The hydrogeology of Qatar is complex, as it comprises of various aquifers with variable confinements. As such, the country is divided into two main basins: the Northern Basin and the Southern Basin, in addition to the South-Western Aquifer, as shown in Figure 4.1. This division was based on the geological settings, water quality, and sub-surface aquifer media. As discussed in the geology (see chapter 3) and in sedimentary faces (see section 4.5), the gypsum formation occurs only in the south and not in the north, which caused the deterioration of groundwater quality in the south. Also the northern part of the country is a deflated area (West & Al-Mulla, 2012), which affected the hydrogeology, in addition to the variation in the sub-surface geology. Figure 4.1 shows the clear distinction between the north and south in terms of topography, which resulted in this division of the aquifers basins. Various differences can be found between the two basins. For example, the Rus Formation in the north is hydraulically connected with the underlying Umm Er Radhuma Formation, whereas the Umm Er Radhuma is confined in the south due to the existence of the gypsum layer and shale (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). The water table in the Northern Basin occurs in the Rus Formation, except near the coast where the groundwater level is shallow as part of the Dammam Formation that is saturated in those areas.

In both basins, the Early Eocene Formations of Rus and Umm Er Radhuma comprise aquifers, whereas the shallower geological formations are dry. The upper part of the Aruma Formation (Late Cretaceous) is considered as aquifer along with the Umm Er Radhuma Formation, whereas the lower part acts as aquitard (MMAA, 2004; Wagner, 2011).

The South-western Aquifer occurs to the southwest of Dukhan Anticline, and it is isolated from the other basins. The Abarug Dolomitic limestone of the Upper Dammam Formation (equivalent to Alat Formation in Bahrain) forms

1.4 الخزانات الجوفية

هيدروجيولوجيا قطر معقدة؛ حيث تحتوي على أنواع متداخلة من الخزانات الجوفية المحصورة وغير المحصورة، كما أن التركيب الجيولوجي يتغير كثيرًا من منطقة إلى أخرى؛ مما يؤثر على جودة المياه الجوفية. على هذا النحو، تنقسم البلاد إلى حوضين رئيسيين: الحوض الشمالي والحوض الجنوبي، بالإضافة إلى الخزان الجوفي الجنوبي الغربي، كما هو موضح في الشكل 4.1. استند هذا التقسيم إلى التكوين الجيولوجي لقطر، وجودة المياه الجوفية، ونوعية الطبقات الحاملة للمياه الجيولوجية وجودة المياه ووسائط طبقات المياه الجوفية. كما نوقش في الجيولوجيا (انظر الفصل 3) وفي السحنات الرسوبية (انظر القسم 5.4)، فإن تكوين الجبس موجود فقط في الجنوب وليس في الشمال، مما تسبب في تدهور نوعية المياه الجوفية في الجنوب، كما أن المنطقة الشمالية عرضة لعوامل التعرية (West & Al-Mulla, 2012)، مما أثر على هيدروجيولوجيا قطر، إضافة إلى الاختلاف في الجيولوجيا تحت السطحية. يوضح الشكل 4.1 الفرق الواضح بين الجزء الشمالي من قطر والجزء الجنوبي من حيث التضاريس، مما أدى إلى هذا التقسيم في أحواض الخزانات الجوفية. هناك الكثير من الاختلافات بين الحوض الشمالي والحوض الجنوبي. على سبيل المثال، يرتبط تكوين الرس في الشمال هيدروليكيًا بتكوين أم الرضمة الواقع أسفل منه، في حين يشكل تكوين أم الرضمة خزانًا جوفيًا محصورًا في الجنوب بسبب وجود طبقة الجبس والطفل الطيني (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981)، أما منسوب المياه الجوفية فهو يقع في تكوين الرس في معظم المناطق باستثناء المناطق القريبة من الساحل؛ حيث يكون منسوب المياه الجوفية ضحلًا ويقع في تكوين الدمام الذي يصبح طبقة حاملة للماء بالقرب من السواحل.

في كلا الحوضين، تشكل تكوينات الرس وأم الرضمة (من فترة الإيوسن المبكر) خزانات جوفية، في حين أن التكوينات العلوية جافة ولا تحتوي على المياه. يعتبر الجزء العلوي من تكوين العرمة (من العصر الطباشيري المتأخر) خزانًا جوفيًا متداخلاً مع تكوين أم الرضمة، في حين أن الطبقة السفلية من تكوين العرمة هي طبقة غير منفذة للمياه (MMAA, 2004; Wagner, 2011).

يقع الخزان الجوفي الجنوبي الغربي إلى الجنوب الغربي من طية دخان المحدبة، وهذا الخزان معزول عن الأحواض الأخرى. يشكل الحجر الجيري الدولوميتي (عضو أبروق) من تكوين الدمام العلوي (المكافئ لتكوين العلات

an artisan aquifer in this area, as shown in Figure 4.1. The aquifer media is dolomitic limestone interbedded with marl (Al-Hajari, 1990). The thickness of the aquifer is around 30 meters, underlain by a shale and clay formation of the Lower Dammam (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Al-Hajari, 1990). The aquifer is confined as it is overlain by clay, shale and limestone of the Dam Formation. It has high porosity and its yield is around 2 million m³ per year (Eccleston, Pike & Harhash, 1981).

The Southern Basin contains a layer of gypsum, which is highly soluble in water. This deteriorates the quality of groundwater in the south, whereas this layer is absent in the north. As a result, the water quality of the northern basin is good.

في البحرين) خزناً إرتوازيًا في تلك المنطقة، كما هو موضح في الشكل 4.1. يتكون الخزان الجوفي من الحجر الجيري الدولوميتي مع وجود طبقات متداخلة من الطين الكلسي (Al-Hajari, 1990)، ويبلغ سمك هذا الخزان الجوفي حوالي 30م، وتقع إلى الأسفل من هذا الخزان الجوفي طبقة من الطفل الطيني لتكوين الدمام السفلي (Eccleston, Pike & Harhash, 1990). يعتبر هذا الخزان محصورًا؛ حيث تعلوه طبقة من الطين، والطفل، والحجر الجيري من تكوين الدمام. نفاذية هذا الخزان عالية؛ حيث يمكنه أن ينتج 2 مليون متر مكعب من المياه سنويًا (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981).

يحتوي الحوض الجوفي الجنوبي على طبقة من الجبس القابلة للذوبان، ونتج عن هذا الأمر تدهور في جودة المياه في الجنوب، بينما لا يحتوي الحوض الشمالي على هذه الطبقة، ولذا فإن جودة المياه عالية في الشمال.



Rainfall-recharge well
أحد آبار تغذية مياه الأمطار

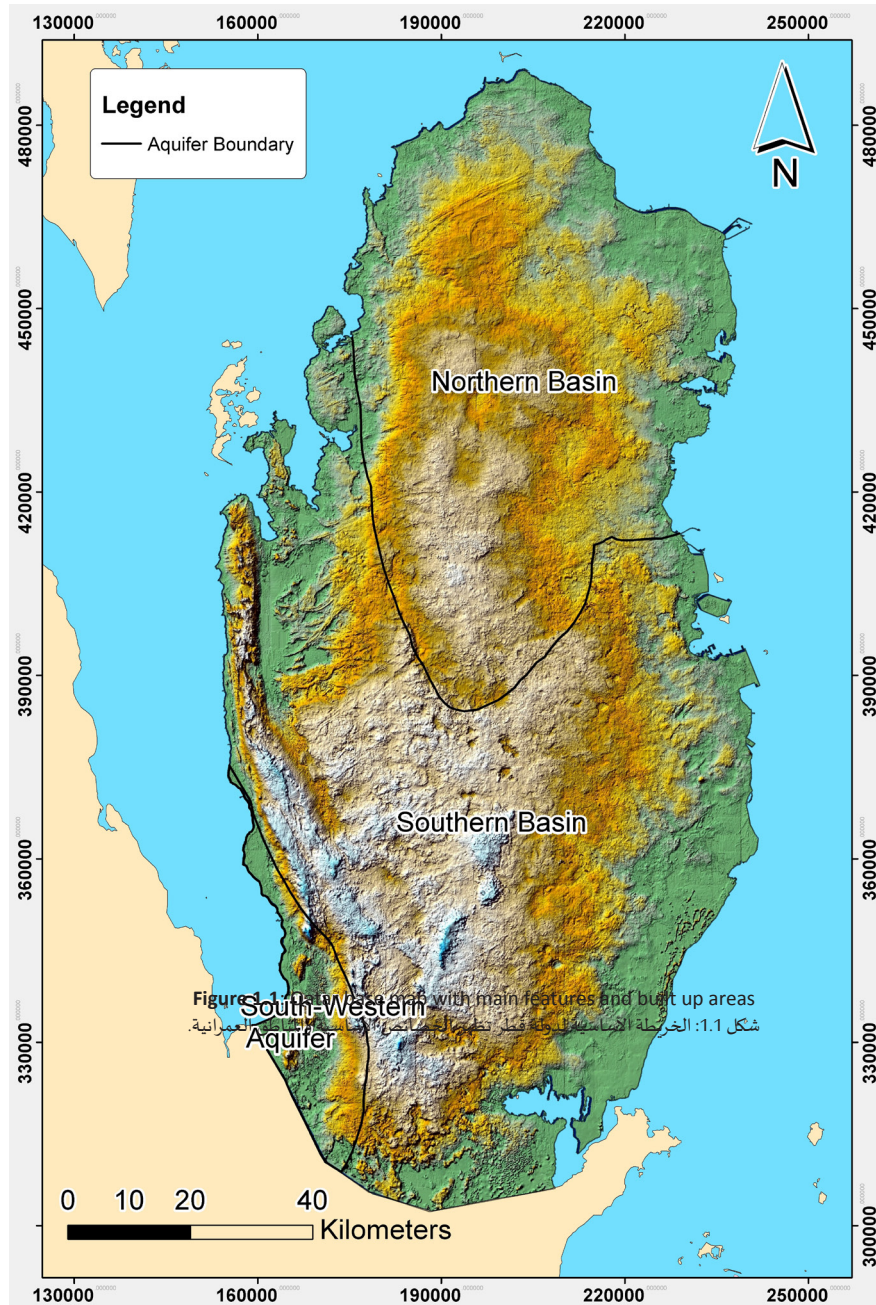


Figure 4.1: Aquifers in Qatar
شكل 1.1: الخزانات الجوفية في قطر

4.2 Groundwater Wells

There are more than 8500 wells penetrating various aquifers in Qatar (Schlumberger Water Services, 2009). Many of these wells are either abundant or not used anymore for various reasons. As shown in Figure 4.2, most of these wells are concentrated in the northern part of the country, and more on the eastern part. This is because the hydraulic properties are favorable in that part as the transmissivity is high, and the area is considered as groundwater discharge area (Baalousha, 2016a). Wells can be classified into two main categories: pumping wells used for abstraction, which are the majority, and recharge wells for injection and recharge. Pumping wells can be classified based on their use, as shown in Figure 4.3. Four different use categories are identified: domestic, farm, industrial and municipal wells. The majority of wells are used by farms (6229), followed by municipalities (1265). Domestic wells are 665, whereas industrial wells are only 280.

2.4 آبار المياه الجوفية

يوجد في قطر ما يزيد على 8500 بئر مياه جوفية، قسم كبير منها إما مهجور أو لا يُستخدم لأسباب مختلفة (Schlumberger Water Services, 2009). كما يظهر في شكل 4.2 فإن معظم الآبار تتركز في الجزء الشمالي، وتحديداً في الشمال الشرقي؛ حيث إن الخصائص الهيدروليكية للخرزان الجوفي مناسبة أكثر من غيرها لأن نفاذيتها عالية (Baalousha, 2016a). يمكن تصنيف الآبار إلى قسمين رئيسيين: آبار سحب المياه وآبار حقن وتغذية. آبار السحب يمكن تصنيفها حسب الاستخدام كما يظهر في شكل 4.3 إلى أربعة أنواع: الاستخدام المنزلي، والمزارع، والصناعة والبلديات. تشكل آبار المزارع العدد الأكبر من الآبار؛ حيث إن عددها 6229، يليها آبار البلدية وعددها 1265، ثم آبار الاستخدام البيتي وعددها 665، أما آبار الاستخدام الصناعي فيبلغ عددها 280 بئراً.



Old hand dug well
بئر مياه قديمة محفورة يدوياً

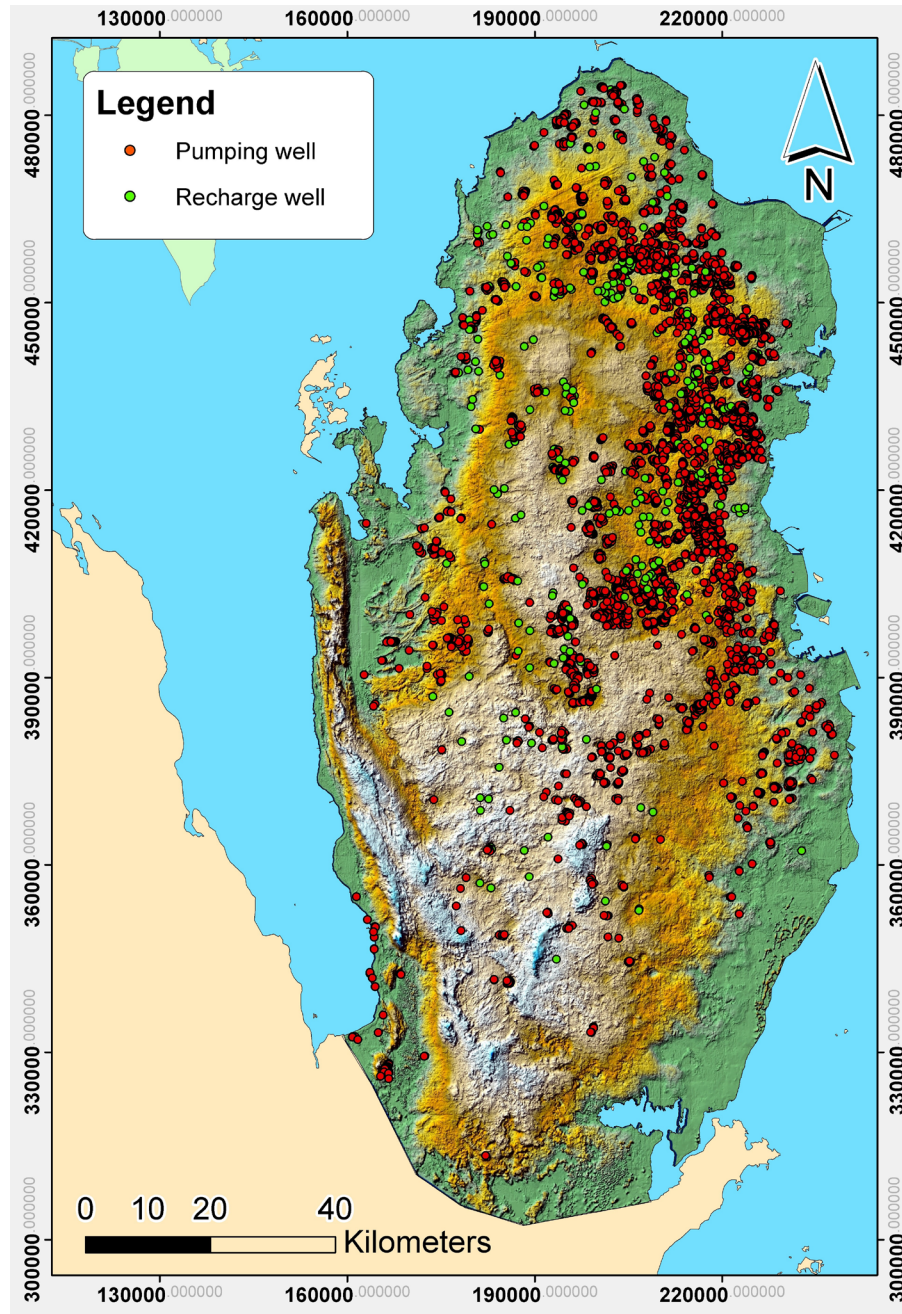


Figure 4.2: Groundwater wells in Qatar

شكل 2.4: آبار المياه الجوفية في قطر

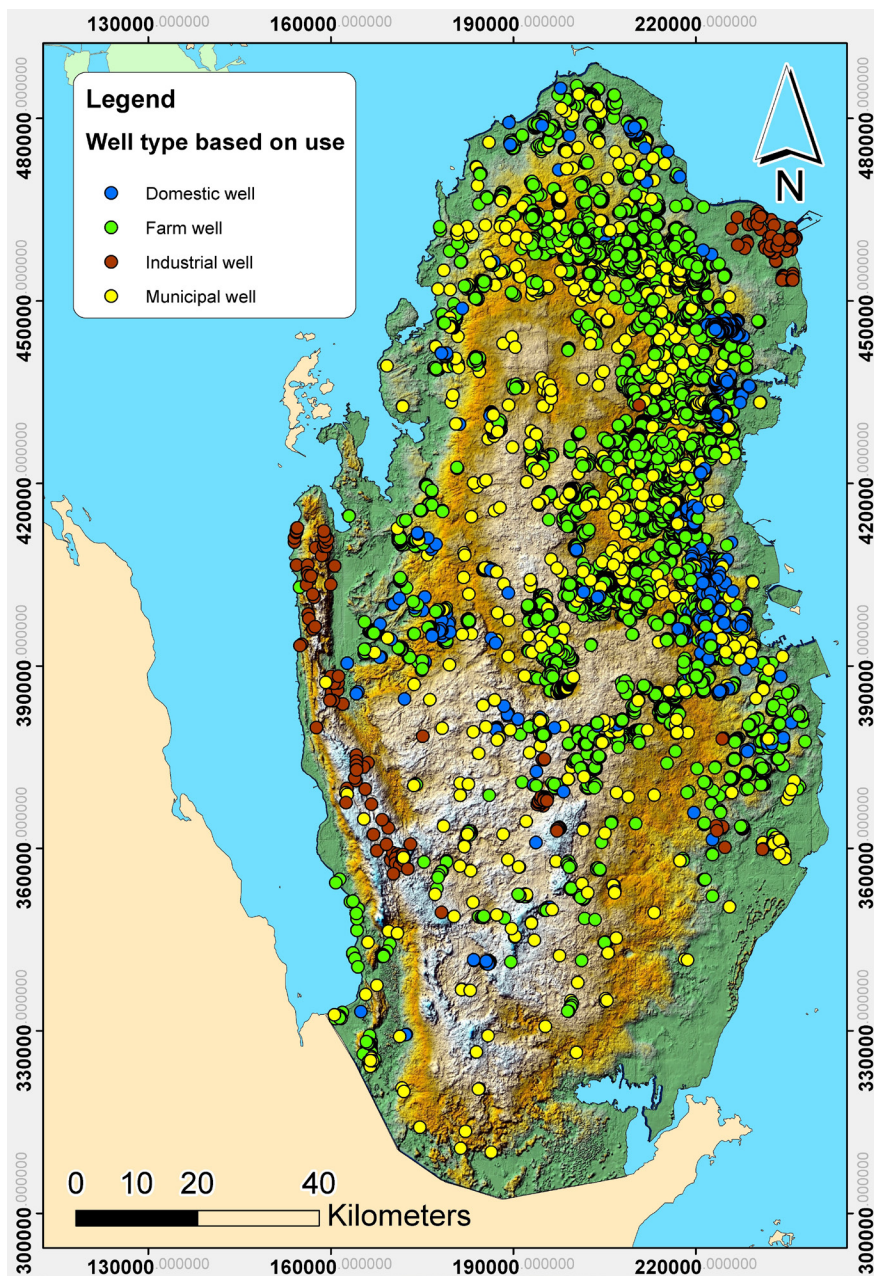


Figure 4.3: Classification of groundwater wells based on their use

شكل 3.4: تصنيف آبار المياه الجوفية حسب الاستخدام.

4.3 Rainfall

Rainfall in Qatar is very erratic, as it may vary between 10 mm to 200 mm in any given year. The highest recorded rainfall event was in 1964, when it rained 180 mm over 4 days (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). It occurs mainly during winter period between November and March (Eccleston, Pike & Harhash, 1981), but some thunderstorms may occur in other months of the year. Figure 4.4 shows the 20 years average annual rainfall (in mm). It varies between 55 mm in the south, to 109 mm in the north, with a country average of around 80 mm per year (Alsharhan et al., 2001). In general, rainfall is divided into two categories: winter storms over the entire country between December and February, and localized thunderstorms with high intensity in late winter (Eccleston, Pike & Harhash, 1981).

Although little, rainfall is the only source of natural groundwater recharge in Qatar. As a result of high variability of rainfall, the estimated recharge vary between 5 and 166 million m³ per year (see Yousif & Harhash, 1985; Pike, Harhash & Gemme, 1975; Schlumberger Water Services, 2009; Yurtsevor & Payne, 1978). However, the annual average is estimated at 60 million m³ (Baalousha, 2016c). Rainfall recharge occurs when surface runoff accumulates water in land depressions (see section 2.3), and eventually recharging the aquifer. It was reported that a rainfall event of 10 mm or more may recharge the aquifer (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Kimrey, 1985; Vecchioli, 1976).

3.4 الأمطار

هطول الأمطار في قطر غير منتظم للغاية؛ حيث قد يتراوح كمية الأمطار المتساقطة بين 10 إلى 200 ملم في أي عام. كانت أعلى نسبة سقوط للأمطار هي تلك المسجلة في عام 1964، عندما تساقط 180 ملم على مدار 4 إلى 5 أيام (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981). تتساقط الأمطار بشكل رئيسي خلال فترة الشتاء بين شهري نوفمبر ومارس (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981)، ولكن قد تحدث بعض العواصف الرعدية في أشهر أخرى من العام وخصوصاً في نهاية الشتاء. يوضح الشكل 4.4 متوسط هطول الأمطار السنوي (بالمليمتر) على مدى عشرين عاماً؛ حيث تتفاوت كمية الأمطار ما بين 55 ملم في الجنوب، و109 ملم في الشمال، ولكن المتوسط السنوي على كامل قطر يبلغ حوالي 80 ملم في العام. ينقسم هطول الأمطار إلى فئتين: العواصف الشتوية على كامل الدولة بين ديسمبر وفبراير، والعواصف الرعدية المحلية بكثافة عالية في أواخر الشتاء (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981).

على الرغم من قلة هطول الأمطار، فإنها المصدر الوحيد لتغذية المياه الجوفية الطبيعية في قطر. نتيجة للتغيرات العالية في هطول الأمطار، تتفاوت كمية تغذية المياه الجوفية المقدرة بين 5 و166 مليون متر مكعب سنوياً (انظر (Yousif & Harhash, 1985; Pike, Harhash & Gemme, 1975; Schlumberger Water Services, 2009; Yurtsevor & Payne, 1978). ولكن يقدر المتوسط السنوي للتغذية بحوالي 60 مليون متر مكعب (Baalousha, 2016c). تحدث عملية تغذية المياه الجوفية عندما يتجمع الجريان السطحي للمياه في المنخفضات الأرضية (انظر القسم 3.2)، وفي النهاية تتم عملية تغذية الخزان الجوفي. ذكرت دراسات عديدة أن هطول أمطار بما يساوي 10 ملم أو أكثر قد يؤدي إلى تغذية الخزان الجوفي (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Kimrey, 1985; Vecchioli, 1976).

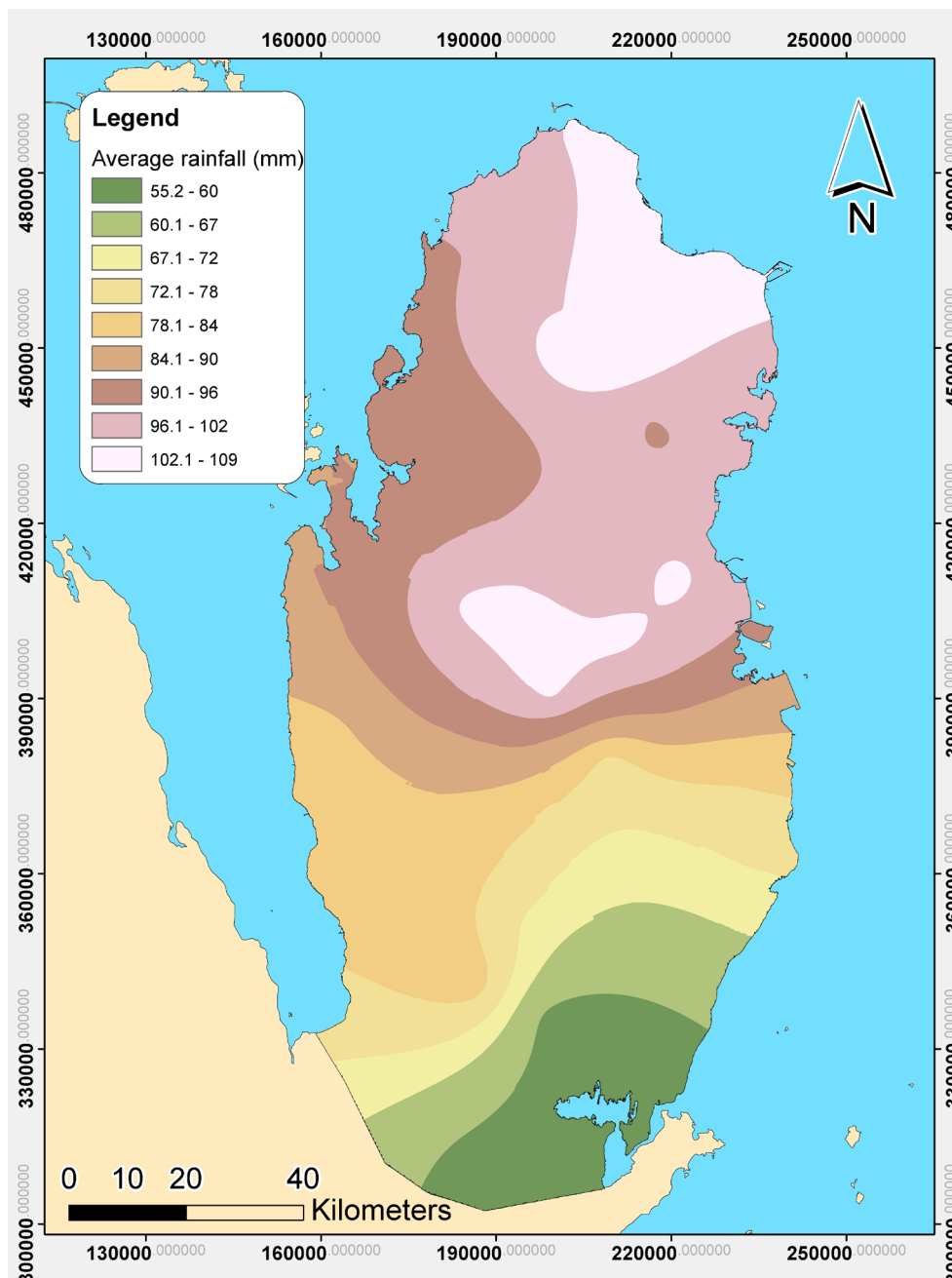


Figure 4.4: Long-term average annual rainfall (mm)
شكل 4.4: المعدل السنوي لكميات الأمطار في قطر على المدى الطويل (مم)

4.4 Submarine Springs

Submarine springs are natural phenomena that occur in various seas around the world. Those springs are essential parts of the wider hydrological cycle and they play an important role in coastal bio-geochemical processes. In addition, the submarine springs are important for offshore plankton blooms, and the release of nutrients, trace elements and gases.

A submarine spring occurs some 25 km off-shore of northern Qatar, in an area known locally as *Fasht el Debel* located in the archipelago between Qatar and Bahrain, as shown in Figure 4.5. Fasht is a Persian word that means shallow land in the sea. This part of the Arabian Gulf is shallow, and seeps of fresh groundwater emerge into the saline water. Pearl divers in the past used to get drinking water from this spring (and others) as they used to stay for months in the sea. More of these springs occur off-shore of the neighbouring Bahrain, and many travellers and geographers have mentioned these springs (Randolf Rausch et al., 2014).

The word “Bahrain” means in Arabic two seas as the mythology says people in the past thought two seas exist in the region: one is fresh (coming from these springs) and one is saline. These springs are important for Qatar’s heritage, marine habitat and hydrogeological understanding of groundwater flow. Carbon 14 analysis results suggest that the water age is more than 10,000 years, which is consistent with the hypothesis that this water is being recharged in the eastern part of the Arabian Peninsula. It is most likely these springs resulted from groundwater flow under pressure in the Dammam Formation (refer to geology chapter 3). The outcrop of the Formation is some 500 km away from the spring, and given the low groundwater velocity, it takes this long time to travel from the rock outcrop to the spring location. This water was recharged during the last glacial period, when wet climate prevailed. Nowadays, it does not flow as it used to be in the past because of the high stresses on the aquifer upstream, which reduces the groundwater pressure at the spring location.

4.4 الينابيع البحرية

الينابيع البحرية هي ظاهرة طبيعية يمكن ملاحظتها في أماكن كثيرة في العالم، وتعتبر تلك الينابيع جزء لا يتجزأ من الدورة الهيدرولوجية في الطبيعة، كما تلعب دورًا مهمًا في عمليات الكيمياء الأرضية الحيوية في المناطق الساحلية. بالإضافة إلى ذلك فإن الينابيع البحرية مهمة للعوالق البحرية، كما أنها مصدر للغذاء والعناصر الضئيلة والغازات للبيئة البحرية.

يوجد في قطر ينابيع بحرية تقع على مسافة حوالي 25 كيلومتر من شمالي قطر في منطقة تعرف محليًا باسم «فشت الدبل» في الأرخيبيل ما بين قطر والبحرين، كما يظهر في شكل 4.5. وكلمة فشت هي كلمة فارسية تعني الأرض الضحلة في البحر؛ حيث إن تلك المنطقة من الخليج العربي هي منطقة ضحلة المياه، وتتسرب المياه الجوفية العذبة من قاع البحر في تلك المنطقة، وقد اعتاد صيادو اللؤلؤ الحصول على مياه الشرب من تلك الينابيع، إضافة للكثير من الينابيع الأخرى في الخليج؛ حيث كانوا يمشون شهورًا في البحر لصيد اللؤلؤ. هنالك الكثير من تلك الينابيع بالقرب من البحرين؛ حيث أتى الكثير من الرحالة على ذكرها (Randolf Rausch et al., 2014). وأصل كلمة بحرين أن القدماء كانوا يعتقدون بوجود بحرين أحدهما مالح والأخر حلو وذلك لكثرة الينابيع الحلوة في قاع البحر المالح. تعتبر تلك الينابيع جزء من إرث قطر، كما أنها مهمة للكائنات البحرية ولفهم كيفية حركة المياه الجوفية.

لقد أظهر تحليل عنصر الكربون 14 لمياه الينابيع في فشت الدبل أن عمر الماء أكثر من 10000 عام وهذا يتفق مع نظرية أن تلك المياه مصدرها من شرق الجزيرة العربية؛ حيث انكشف طبقات الدمام على بعد حوالي 500 كيلومتر من تلك الينابيع وتتحرك المياه في باطن الأرض شرقًا باتجاه الخليج مما يجعلها عرضة للضغط في طبقات الخزان الجوفي المحصور، وبسبب السرعة البطيئة لحركة المياه الجوفية في الأرض فإن المياه تستغرق آلاف السنين لقطع تلك المسافة. من المرجح أن هذه المياه تمت تغذيتها في الأوقات المطيرة من العصر الجليدي الأخير، ولكن في الوقت الحاضر قل معدل جريان تلك المياه كثيرًا نتيجة الاستهلاك الكبير للمياه الجوفية في المناطق أعلى الجريان.



Submarine springs - Fasht el Debel
الينابيع البحرية - فشت الدبل

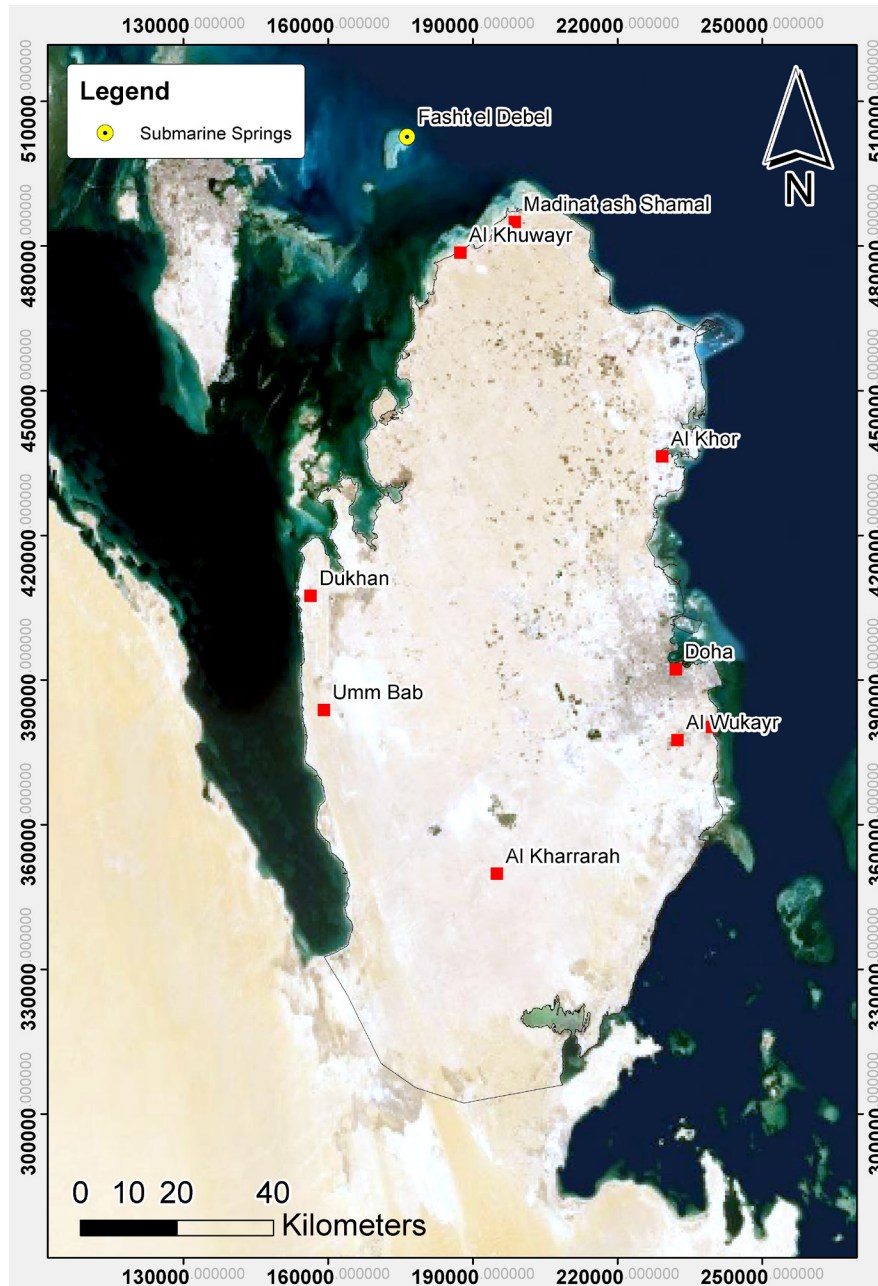


Figure 4.5: Submarine springs at Fasht el Debel. Background Satellite Image Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye
شكل 5.4: الينابيع البحرية في فشت الدبل. مصدر الصورة الجوية في الخلفية: Esri, DigitalGlobe, GeoEye

4.5 Rus Formation Sedimentary Facies

Sedimentary rocks are formed as a result of weathering and erosion processes that break down the parent rock into smaller parts. These parts accumulate to form various types of sedimentary rocks. Sedimentation of deposits may occur in different environments even at the same age. Sediments are normally affected by the environment through which it was formed. These environments include various chemical, physical and biological processes that may affect the sediments being deposited. The Rus Formation was deposited in shallow marine environment (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Rivers et al., 2019) compared to the underlying Umm Er Radhuma Formation, and has various sedimentary facies, which has significantly affected water resources in Qatar. The change from the Umm Er Radhuma to Rus Formation is abrupt, which is possibly a sedimentary hiatus due to uplift (Leblanc, 2017). Al-Saad (2003) identified two main facies in Rus Formation Qatar: the southern gypsiferous, argillaceous facies, which is called the Sulphate Facies and northern calcareous or Carbonates Facies. The northern province includes limestone, chalky limestone, and dolomitic limestone. The southern province contains gypsiferous dolomitic limestone with some beds of clay and marl (Al-Saad, 2003). Gypsum evaporates occur only in the southern part of the country, to the south of the red line shown in Figure 4.6. A layer of shale occurs on the top of the Rus Formation in the southern part of the country.

The depositional facies of the Rus Formation are shown in Figure 4.6, taking a V shape escarpment with apex at Rawdat Rashid (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). To the north of the red line shown in Figure 4.6, only residual deposits of gypsum occur. The absence of gypsum in the north is due to non-deposition in the north, in addition to the dissolution by recharge and groundwater movement (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). Dissolution is not possible in the south due to the shale layer, which prevents any downward movement of groundwater. Except for Dukhan anticline, the southern part of the country has depositional sulphate facies because of lack of dissolution of gypsum. This is due to the low permeability of the shale layer on the top of gypsum, which inhibits any water movement downwards. In addition to the previous reasons, Al-Saad (2003) relates the reduction of evaporitic facies in the north to Qatar and Simsima Folding Arches.

5.4 السحنات الرسوبية لطبقة الرس

تشكل الصخور الرسوبية نتيجة عمليات الحت والتعرية التي تعمل على تفتيت الصخور إلى أجزاء صغيرة، وتراكم تلك الأجزاء وترسبها لتشكل مختلف أنواع الصخور الرسوبية. تحدث عملية ترسيب الصخور أحياناً في بيئات مختلفة، حتى لو كانت الطبقة الصخرية لها نفس العمر الجيولوجي. تتأثر الرسوبيات بالبيئة التي تشكلت خلالها؛ حيث إن عملية الترسيب تتم في بيئات كيميائية وفيزيائية وبيولوجية مختلفة مما يؤثر على الرسوبيات المتكونة. يحتوي تكوين الرس في قطر على عدة سحنات رسوبية، مما أثر بشكل كبير على موارد المياه في قطر، ولقد تم تكوين وترسيب طبقة الرس في بيئة بحرية ضحلة (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Rivers et al., 2019). حسب الباحث سعد (Al-Saad, 2003) تم تعريف سحنتين رئيسيتين لطبقة الرس في قطر: السحنة الكربونية في الشمال والحجر الجيري الدولوميتي التبخيري في الجنوب. تحتوي المنطقة الشمالية على حجر جيري وطباشيري جبسي بينما تحتوي المنطقة الجنوبية على حجر جيري دولوميتي جبسي مع بعض طبقات الطين (Al-Saad, 2003). تتواجد طبقات الجبس التبخيري في الجزء الجنوبي من قطر إلى الجنوب من الخط الأحمر المبين في شكل 4.6، كما تتواجد طبقة من الطفل الطيني فوق طبقة الرس في الجزء الجنوبي.

وتختلف السحنات الرسوبية لطبقة الرس من الشمال للجنوب كما يظهر في شكل 4.6 لتأخذ تلك السحنات شكل حرف V؛ حيث قمة الحرف السفلى بالقرب من روضة راشد (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981). تتواجد فقط بقايا من الرواسب الجبسية إلى الشمال من الخط الأحمر وتتفاوت أسباب عدم وجود الجبس في المنطقة الشمالية. أحد هذه الأسباب هو عدم ترسيبها هناك بالإضافة إلى عملية الذوبان نتيجة حركة المياه المترشحة من الأمطار وبالتالي حركة المياه الجوفية (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981) في حين أن عملية ذوبان طبقة الجبس نتيجة حركة المياه غير ممكنة في الجنوب لوجود طبقة الطفل الطيني. وفيما عدا طبقة دخان المدببة فإن الجزء الجنوبي من قطر يحتوي على سحنات رسوبية كبريتية بسبب عدم ذوبان طبقة الجبس، وذلك لأن طبقة الطفل الطيني الواقعة فوق طبقة الجبس ذات نفاذية متدنية، الأمر الذي يعيق أي حركة للمياه للأسفل. بالإضافة إلى الأسباب السالفة الذكر؛ فإن الباحث سعد (Al-Saad, 2003) يعزو عدم وجود طبقة جبس في الشمال إلى طبقة قوس قطر وقوس سمسة.

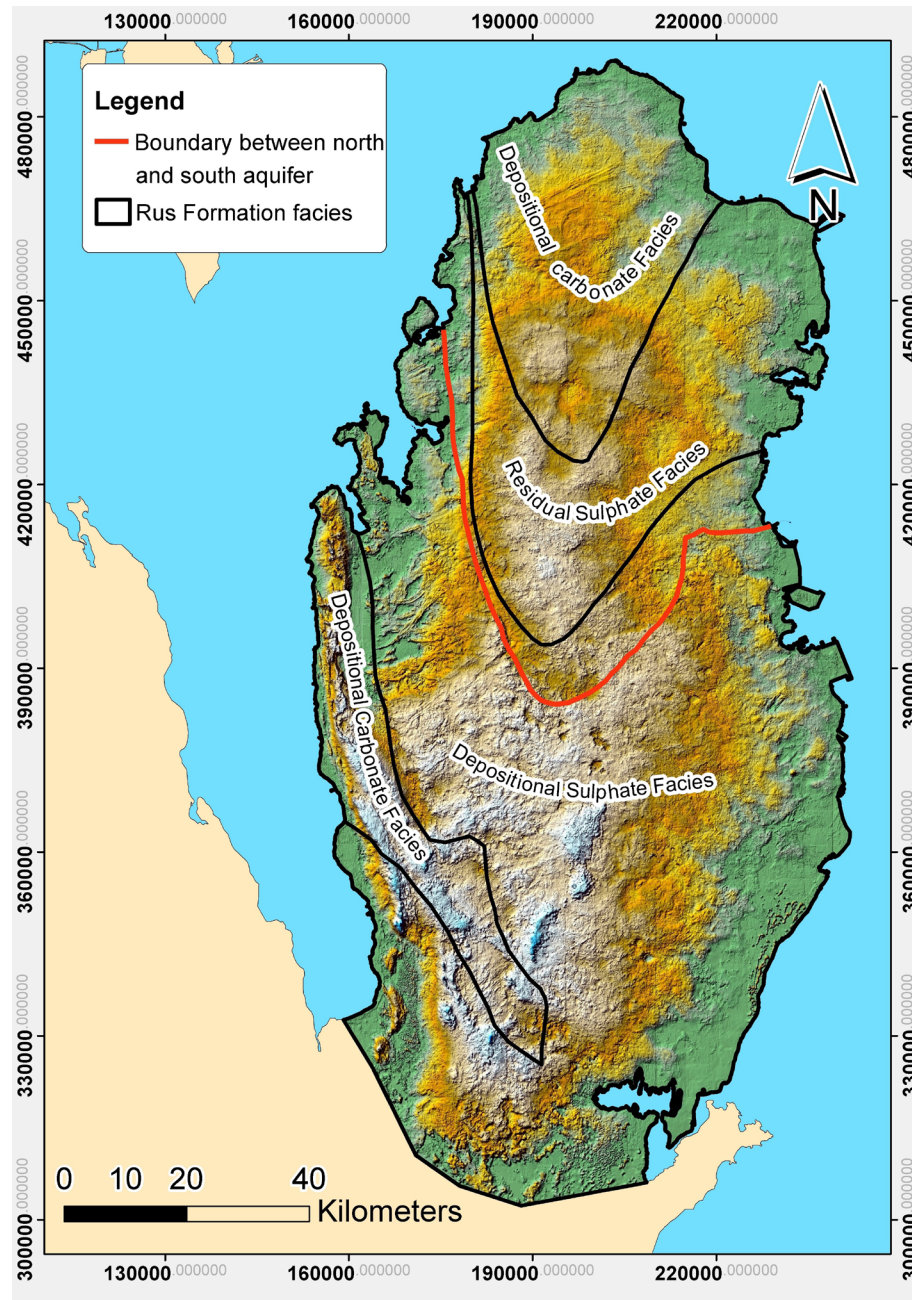


Figure 4.6: Rus Formation facies in Qatar

شكل 4.5: السحنات الكربونية لطبقة الرس في قطر

4.6 Isotopes Hydrology and Groundwater Age

Tritium *also known as Hydrogen-3* is a radioactive isotope of hydrogen. It is very rare in the environment and normally occurs in trace amounts as a result of cosmic rays interaction with atmosphere gases. It has a half-life of 12.32 years and is used as a tracer. After nuclear testing in the early 1950s, tritium concentrations increased considerably in the atmosphere. In 1963, it reached a peak level of 1420 Tritium Unit (TU) in the Gulf region, whereas the natural level is between 2 and 5 TU (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Yurtsevor & Payne, 1978). It has been decreasing since that time and at present it reached its natural level. Until recently, tritium has been widely used as a water aging tracer. Rainfall recharge from the time after nuclear testing contains higher concentrations of tritium. When analysing water samples for tritium, relative age of water can be computed using certain models. Water samples that show higher concentrations of tritium than the natural background level means they infiltrated earth as rainfall post-nuclear testing, which was in early 1950s.

Several wells in Qatar were sampled for tritium in the period between 1972 and 1979 (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Yurtsevor & Payne, 1978), as shown in Figure 4.7. Area of high tritium occurs in the central north of the country, which implies young groundwater and recent recharge from rainfall. These results confirm that natural rainfall recharge of the shallow aquifer occurs locally in some areas in Qatar.

6.4 هيدروجيولوجيا النظائر وعُمر المياه الجوفية

استُخدم التريتيوم حتى وقت قريب؛ لتتبع حركة المياه وتحديد عُمرها، والتريتيوم يعرف أيضاً باسم نظير الهيدروجين 3، وهو نظير مشع للهيدروجين، وهو نادر الوجود في الطبيعة، ولكنه يتشكل بكميات قليلة جداً نتيجة تفاعل الأشعة الكونية مع غازات الغلاف الجوي، وتبلغ فترة نصف العمر للتريتيوم 12.32 عامًا. لقد ازداد تركيز التريتيوم في الغلاف الجوي في فترة الخمسينيات من القرن الماضي نتيجة الاختبارات النووية لبلوغ الذروة في العام 1963 في منطقة الخليج بتركيز بلغ 1420 وحدة تريتيوم، في حين أن التركيز الطبيعي يتراوح بين 2 إلى 5 وحدة تريتيوم (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Yurtsevor & Payne, 1978) ليبدأ بالتناقص منذ ذلك الوقت ليلعب مستواه الطبيعي في الوقت الحاضر.. إن تغذية الخزان الجوي عن طريق الأمطار المتساقطة في فترة الاختبارات النووية تحتوي على تركيزات عالية من التريتيوم، وبالتالي يمكن تقدير عمر المياه الجوفية عند تحليل تركيز التريتيوم في عينات المياه بمساعدة بعض النماذج الرياضية، والعينات التي يظهر فيها تركيز التريتيوم أعلى من المعدل الطبيعي يعني أن تلك المياه دخلت للخزان الجوي على شكل أمطار في فترة لاحقة للتجارب النووية في الخمسينيات من القرن المنصرم.

لقد تم أخذ عينات من آبار مختلفة في قطر في الفترة ما بين 1972 و1979 وتحليل مستوى التريتيوم فيها (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Yurtsevor & Payne, 1978)، كما يظهر في شكل 4.7، وتبين أن العينات التي تُظهر تركيزات عالية من التريتيوم موجودة في شمال وسط قطر، الأمر الذي يعني أن المياه الجوفية في تلك المنطقة حديثة، وهذا يعني أن تغذية المياه الجوفية في تلك المنطقة تمت في فترة لاحقة للاختبارات النووية. إن تلك النتائج تؤكد على وجود تغذية طبيعية من الأمطار للخزان الجوي السطحي في قطر.

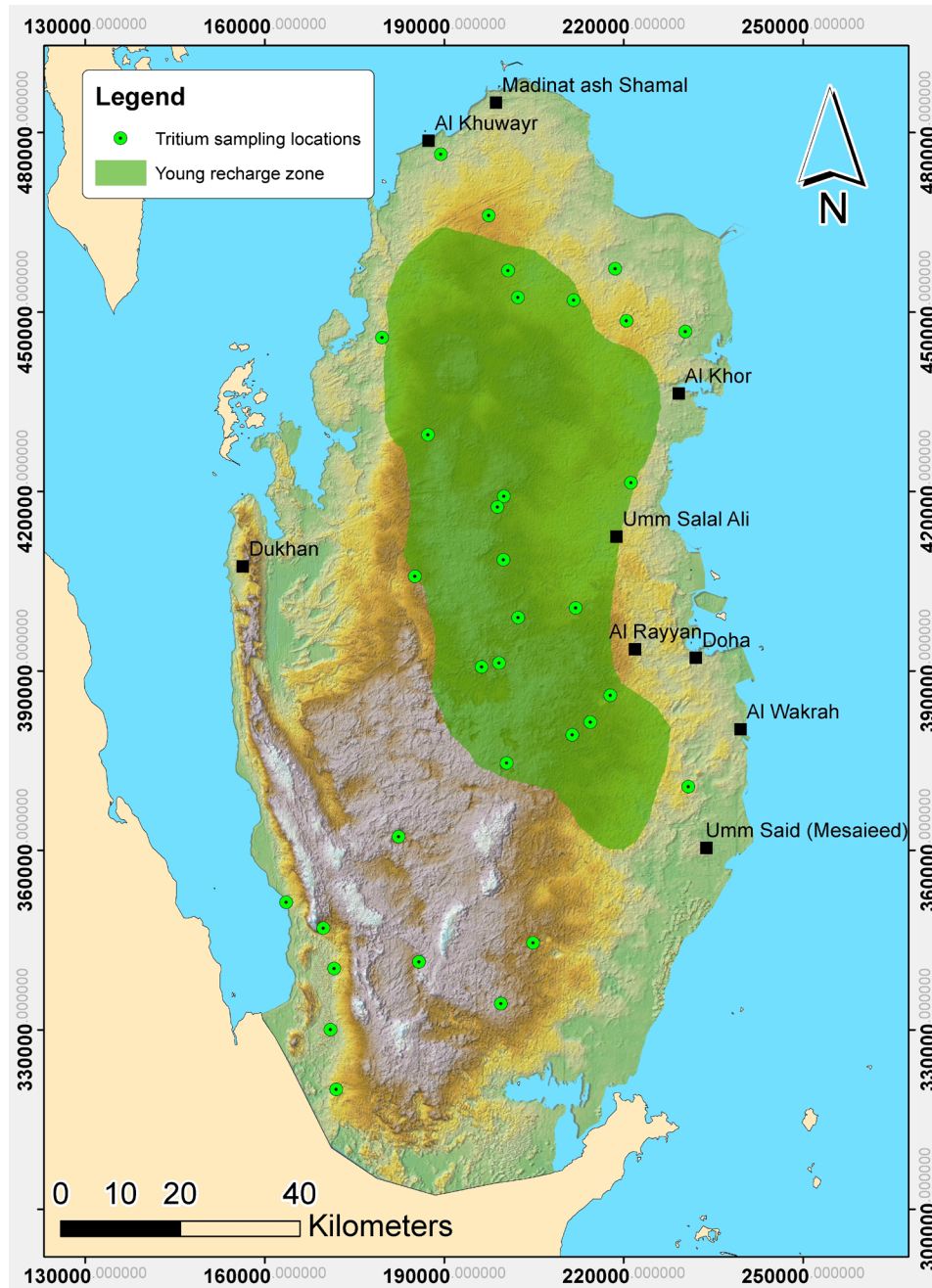


Figure 4.6: Tritium sampling wells' locations and young recharge area
شكل 4.6: مواقع أبار فحص التريوم ومنطقة تغذية المياه الجوفية الحديثة

4.7 Groundwater Vulnerability

Groundwater vulnerability maps are a powerful tool for water resources protection, management and land use. These maps identify the relative likelihood of groundwater contamination in case a source exist. Several methods have been developed to build vulnerability maps but all of them rely to some extent on hydrogeological setting of the area of study. The vulnerability map shown in Figure 4.8 was done based on DRASTIC approach (L. Aller et al., 1987; Baalousha, 2016b). DRASTIC approach assumes the hydrogeological properties of an aquifer, providing a sort of resistance or protection against contamination, depending on several properties. These properties are the depth to water table, recharge rate, aquifer media, soil media, topography, vadose zone and hydraulic conductivity. It is also assumed the contaminants originate on land and infiltrate down into the aquifer. This approach applies standard weights for each parameter mentioned before based on its importance, and uses a specific rating to calculate the final vulnerability index map. The resulting map identifies relative vulnerability to contamination of various areas of Qatar. Results show the coastal areas are the most vulnerable because the groundwater is shallow. The southern part of the country, except the coastal area, has the lowest vulnerability class. This is because the depth to water table is high and the existence of Midra Shale Formation provides some protection for the underneath aquifer (see chapter 3).

Another method was used to assess the vulnerability of groundwater. This method is called EPIK, and was specifically designed for karst aquifer. The method was used as the northern aquifer is partially karstified (Baalousha, 2016b; Baalousha, 2016c). The method relies on four parameters, namely the epikarst of the top layer, the protection cover (i.e. soil and cover formations), infiltration rate and karst network (Doerfliger & wahlen, 1998). Although there are

7.4 قابلية تلوث المياه الجوفية

تعتبر خرائط قابلية تلوث المياه الجوفية من الأدوات المهمة لحماية الخزانات الجوفية وإدارتها، بالإضافة إلى إدارة استخدامات الأراضي. تبين تلك الخرائط القابلية النسبية لمختلف مناطق الخزان الجوفي للتلوث، في حالة وجود مصدر لذلك التلوث. لقد طُورت العديد من الطرق المختلفة لعمل خرائط قابلية التلوث ولكنها تعتمد إلى حد ما على الخصائص الهيدروجيولوجية للمنطقة قيد الدراسة. خريطة قابلية التلوث في شكل 4.8 تم عملها باستخدام طريقة DRASTIC (L. Aller et al., 1987; Baalousha, 2016b) وهي طريقة تعتمد على فكرة أن الخصائص الهيدروجيولوجية للخزان الجوفي توفر نوعاً من الحماية من مخاطر التلوث. هذه الخصائص هي: العمق لسطح الماء في الخزان الجوفي، معدل تغذية الخزان الجوفي، خصائص صخور الخزان الجوفي، خصائص التربة، الطبوغرافيا، خصائص المنطقة غير المشبعة بالماء، والموصلية الهيدروليكية للخزان الجوفي. هذه الطريقة تفترض أن أي منشأ للتلوث يكون على سطح الأرض ويتسرب من خلال التربة للخزان الجوفي. تعطي هذه الطريقة وزن قياسي ومعامل قياسي لكل من الخصائص المذكورة سابقاً بناءً على أهمية كل خاصية، للحصول في النهاية على خريطة قابلية التلوث. تُظهر تلك الخريطة المؤشر النسبي لقابلية التلوث لمختلف المناطق في قطر، والتي تبين أن المناطق الساحلية قابليتها للتلوث أعلى من غيرها بسبب قرب منسوب المياه الجوفية من سطح الأرض، بينما نجد أن المناطق ذات القابلية الضعيفة للتلوث موجودة في جنوب قطر. يمكن أن نعزو هذا الأمر لأن منسوب المياه الجوفية في المناطق الجنوبية عميق، كما أن وجود طبقة من الطفل الطيني يوفر بعض الحماية للخزان الجوفي في الجنوب (راجع الفصل 3).

بالإضافة إلى ما سبق فقد تم استخدام طريقة أخرى لتقييم قابلية تلوث المياه الجوفية، وتلك الطريقة تسمى EPIK، وهي مخصصة للخزانات الجوفية الكارستية. لقد تم استخدام هذه الطريقة لأن الخزان الجوفي الشمالي يعتبر كارستي بشكل جزئي (Baalousha, 2016c). تعتمد هذه الطريقة على أربعة عوامل وهي: حالة الطبقة تحت السطحية للخزان الكارستي، حالة الغطاء السطحي الذي يوفر نوع من الحماية (سواء التربة أو الصخور العلوية)، معدل رشح

some common parameters between DRASTIC and EPIK approach, such as infiltration rate, EPIK put more weight on karst properties and features. Figure 4.9 shows the vulnerability map of Qatar based on EPIK approach. While there are some similarities between Figures 4.8 and 4.9, many differences occur. It is remarkable that the coastal areas in this approach are in the low to the very low class, whereas they are in the very high class in DRASTIC. As such, DRASTIC vulnerability approach is more relevant for the case of Qatar than EPIK. This is because EPIK is designed for karst aquifers, which is not the case everywhere in the country. Also, EPIK neglects important factors such as topography and depth to water table that suit Qatar.

الماء، والشبكة الكارستية (Doerfliger & wahlen, 1998). بالرغم من وجود بعض العوامل المشتركة بين DRASTIC و EPIK إلا أن الطريقة الأخيرة تضع وزناً للخصائص الكارستية أكثر من أي عامل آخر. يبين شكل 4.9 خريطة قابلية التلوث لقطر باستخدام طريقة EPIK، وعلى الرغم من وجود بعض التشابه بين هذه الخريطة وشكل 4.8 إلا أن الاختلافات بينهما أكبر. من الملاحظ أن المناطق الساحلية تقع في المنطقة القليلة أو القليلة جداً من ناحية خطر التلوث باستخدام طريقة EPIK بينما نجدها في المناطق عالية الخطورة بناءً على DRASTIC، وبالتالي من الملاحظ أن طريقة DRASTIC أكثر ملائمة لقطر؛ حيث إن الطريقة الأخرى مصممة بالكامل للخزانات الكارستية، والخصائص الكارستية موجودة فقط في الشمال، كما أن طريقة EPIK لا تأخذ بعين الاعتبار الطبوغرافيا أو العمق للمياه الجوفية.

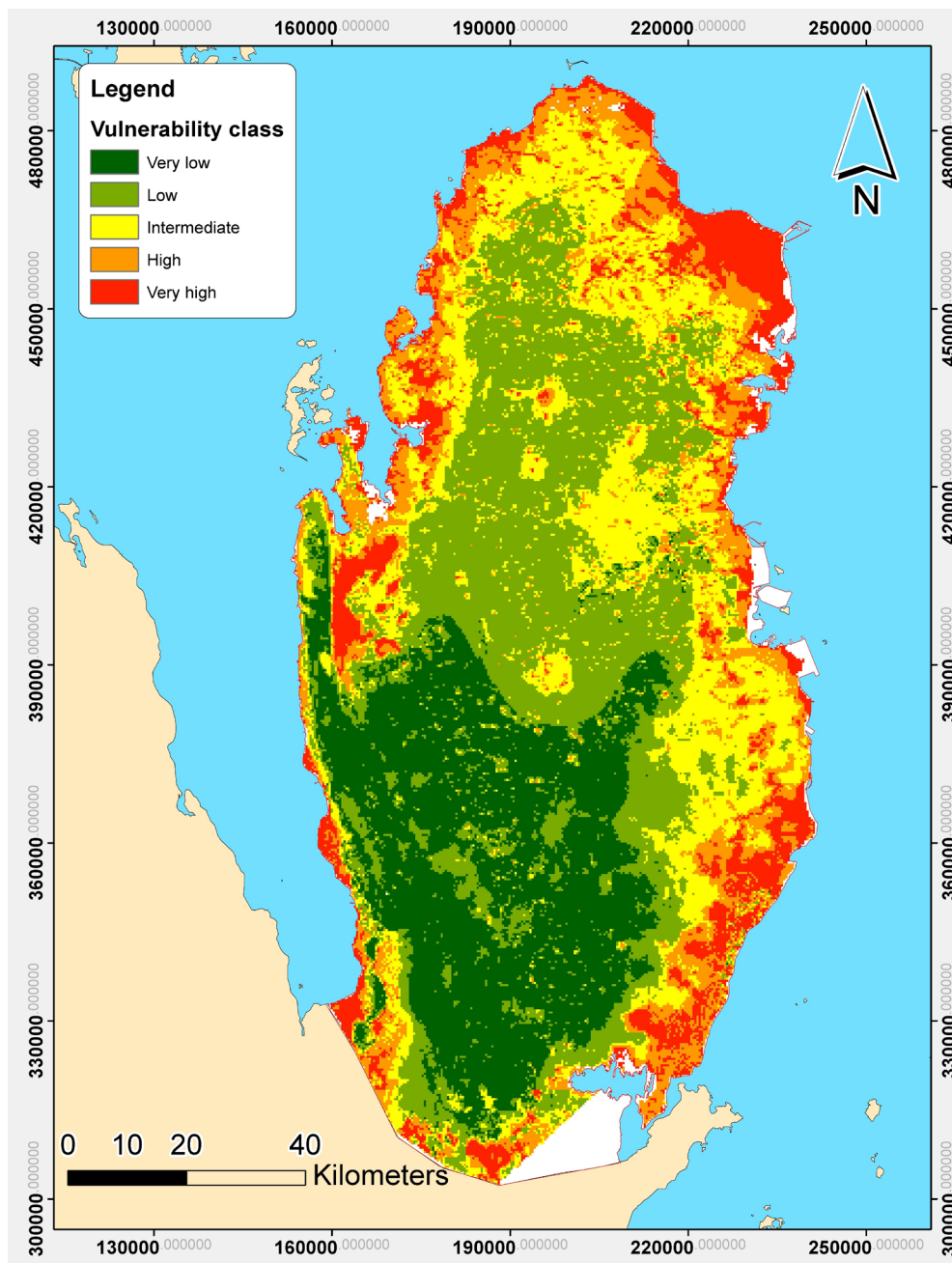


Figure 4.8: Groundwater vulnerability map for Qatar aquifers using DRASTIC
 شكل 8.4: خريطة قابلية الضعف (قابلية التعرض للتلوث) لخزانات المياه الجوفية في قطر باستخدام DRASTIC

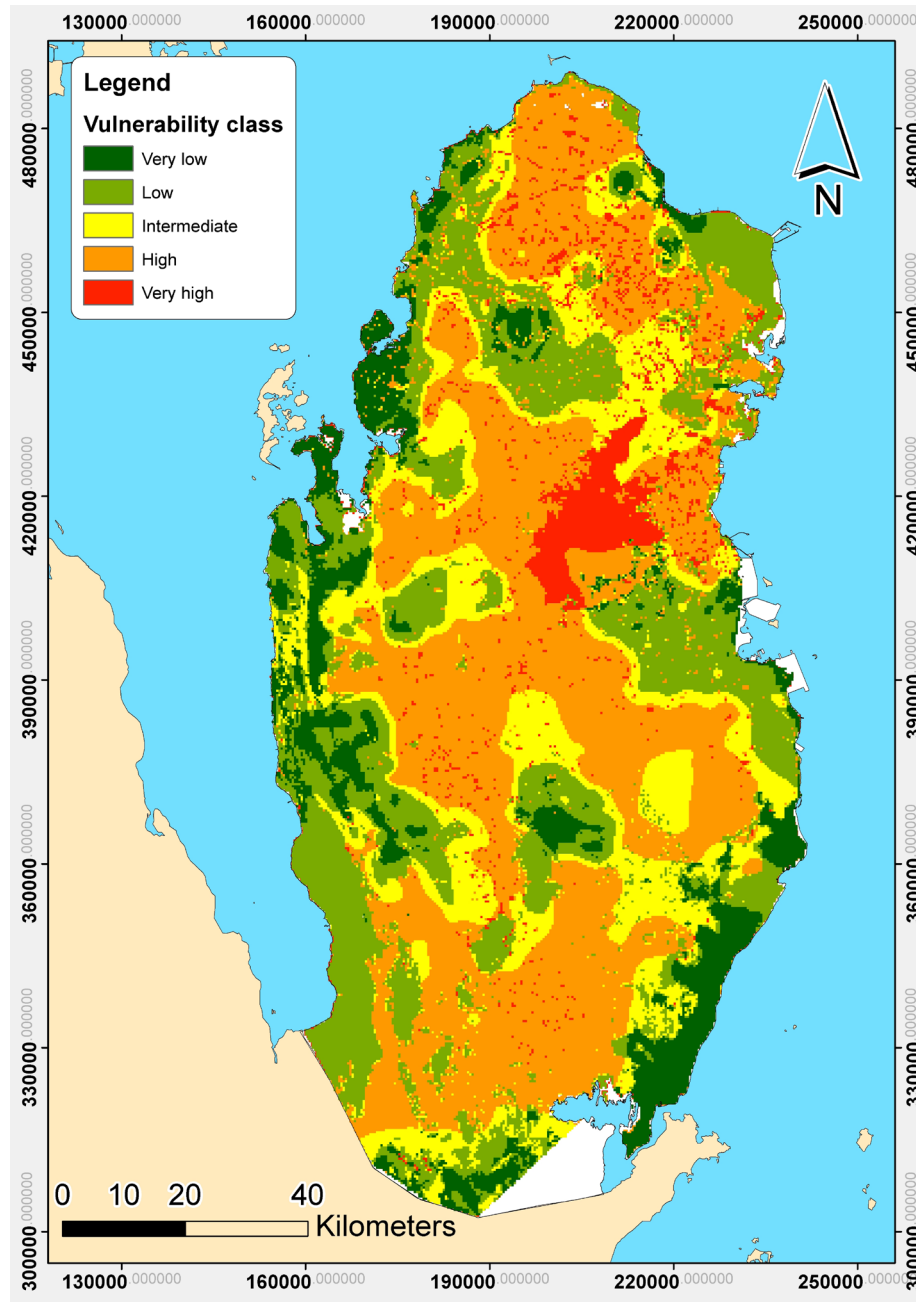


Figure 4.9: Groundwater vulnerability map for Qatar aquifers using EPIK
شكل 9.4: خريطة قابلية الضعف (قابلية التعرض للتلوث) لخزانات المياه الجوفية في قطر باستخدام EPIK

4.8 Groundwater levels in Qatar

The oldest available groundwater piezometric map is from year 1958, as shown in Figure 4.10, which covers only the northern part of the country. Groundwater abstraction at that time was little, so these levels almost represent the natural conditions of the aquifer. These levels vary between 0 near the coast to more than 14 meters above the mean sea level in the center of the northern aquifer. This map is very useful to understand and analyze the abstraction impact on re-shaping the groundwater contours, and it helps enable restoring the aquifer after it has been over-exploited.

Figures 4.11 and 4.12 show the groundwater piezometric levels for the years 1980 and 1988; respectively (Al-Hajari, 1990). These maps show a continuous decline in groundwater levels. The maximum level has declined from more than 14 meters above mean sea level in 1958, to 9 meters in 1980 and 6 meters in 1988.

The latest contour map for groundwater of the shallow aquifer is shown in Figure 4.13, and it was created based on field measurements collected in the year 2017. The map shows a high disturbance of the groundwater level, when compared to those of 1988 and 1980. Many factors disturbed the natural pattern of groundwater including heavy abstraction, especially in the northern aquifer, recharge wells, and irrigation return flow. Other factors of local impacts include de-watering processes for large construction projects such as the underground rail project, which altered the shallow groundwater levels. It is remarkable that the southern basin shows an increase in groundwater level, possibly due to irrigation return flow and leakage from treated wastewater ponds.

It should be noted that most of the fresh groundwater occurs in the north, whereas the southern aquifer contains water of poor quality due to dissolution of gypsum in the subsurface geology.

8.4 مناسيب المياه الجوفية في قطر

يرجع تاريخ أقدم خريطة قياس مناسيب المياه الجوفية إلى عام 1958، كما هو موضح في الشكل 4.10، والذي يغطي الجزء الشمالي فقط من البلاد. كان استهلاك المياه الجوفية في ذلك الوقت قليلاً، لذا فإن هذه المستويات تمثل تقريباً الظروف الطبيعية للخزان الجوفي. وتتراوح هذه المستويات بين 0 بالقرب من الساحل إلى أكثر من 14م فوق مستوى سطح البحر في وسط الخزان الجوفي الشمالي. هذه الخريطة مفيدة جداً لفهم وتحليل تأثير استخراج المياه الجوفية على شكل مناسيب المياه في الوقت الحالي، كما أنها تساعد في استعادة الخزان الجوفي بعد الإفراط في استغلاله.

يوضح الشكلان 4.11 و 4.12 مستويات مناسيب المياه الجوفية للسنوات 1980 و 1988 على التوالي (Al-Hajari, 1990). تظهر هذه الخرائط انخفاضاً مستمراً في مستويات المياه الجوفية فقد انخفض المستوى الأقصى من أكثر من 14م فوق متوسط مستوى سطح البحر في عام 1958 إلى 9 أمتار في عام 1980 و 6 أمتار في عام 1988.

يوضح الشكل 4.13 أحدث خريطة كنتورية لمناسيب المياه الجوفية للخزان الجوفي السطحي في قطر، وقد تم إنشاء تلك الخريطة باستخدام قياسات تم جمعها في العام 2017. تُظهر الخريطة تغييراً كبيراً في مستويات المياه الجوفية ستويات مناسيب المياه الجوفية مقارنة مع مستويات عامي 1980 و 1988. أدت العديد من العوامل إلى اضطراب وتغير في النمط الطبيعي للمياه الجوفية، بما في ذلك الضخ بمستويات عالية خاصة في الخزان الجوفي الشمالي، إضافة لتأثير آبار التغذية والحقن، ورشح المياه الزائد عن الري (الري المرتجع). تشمل العوامل الأخرى بعض العمليات ذات التأثير المحدود مثل عمليات خفض منسوب المياه الجوفية أثناء القيام ببعض المشاريع الهندسية الكبرى مثل مشروع القطار التحت أرضي (المترو) والتي غيرت مناسيب المياه الجوفية الضحلة. من اللافت للنظر أن الحوض الجوفي الجنوبي يظهر زيادة في مستويات المياه الجوفية ويرجع ذلك لتسرب المياه المعالجة وتدفق الري المرتجع في بعض الأماكن.

جدير بالذكر أن الخزان الجوفي الشمالي يحتوي على كميات من المياه العذبة بينما الخزان الجوفي الجنوبي ذو جودة منخفضة بسبب ذوبان طبقة الجبس الموجودة داخل طبقات الأرض.

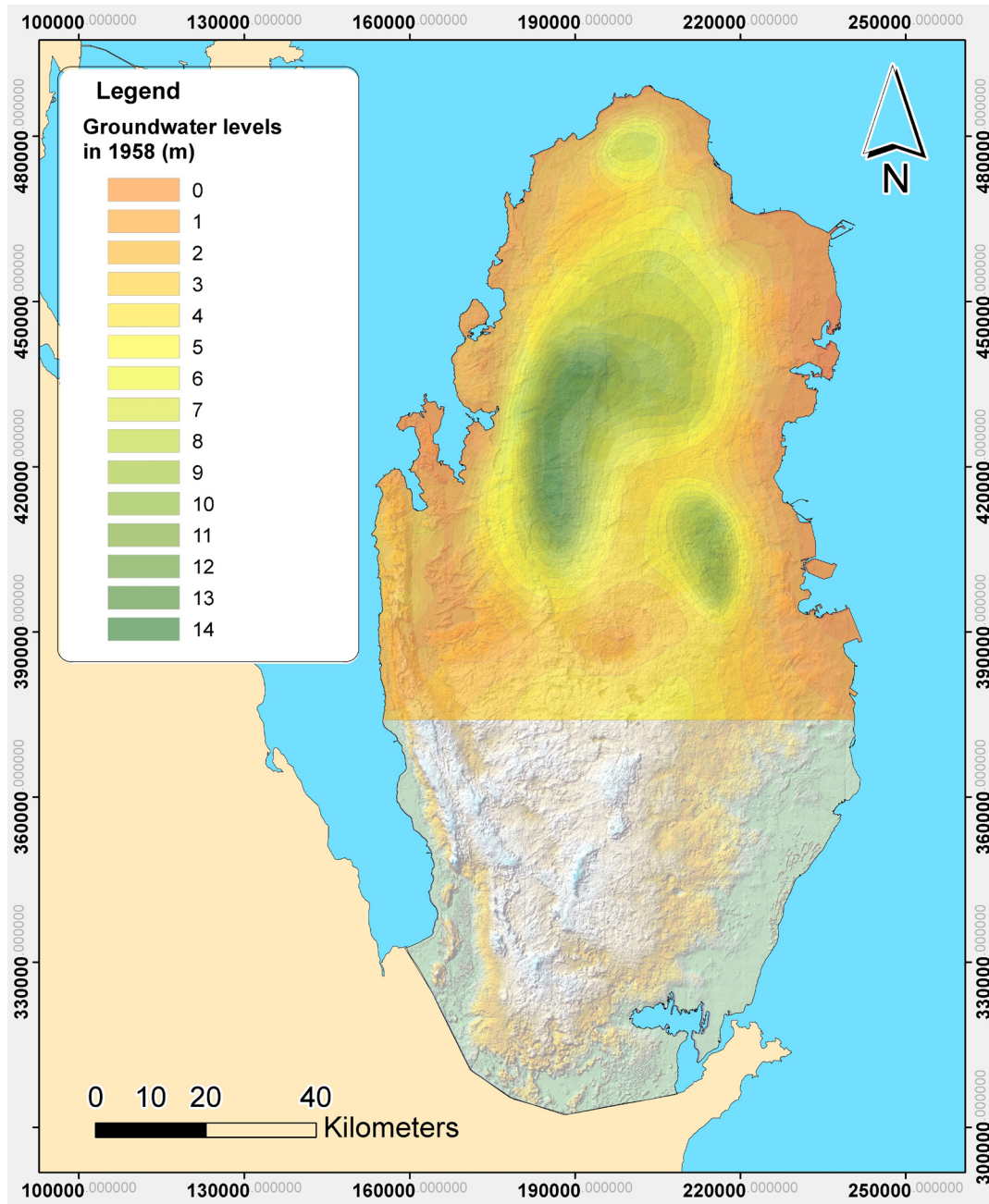


Figure 4.10: Groundwater level contour map for the shallow aquifer of Qatar in 1958
شكل 10.4: خريطة مناسيب المياه الجوفية للخرزان الجوفي السطحي في قطر في العام 1958

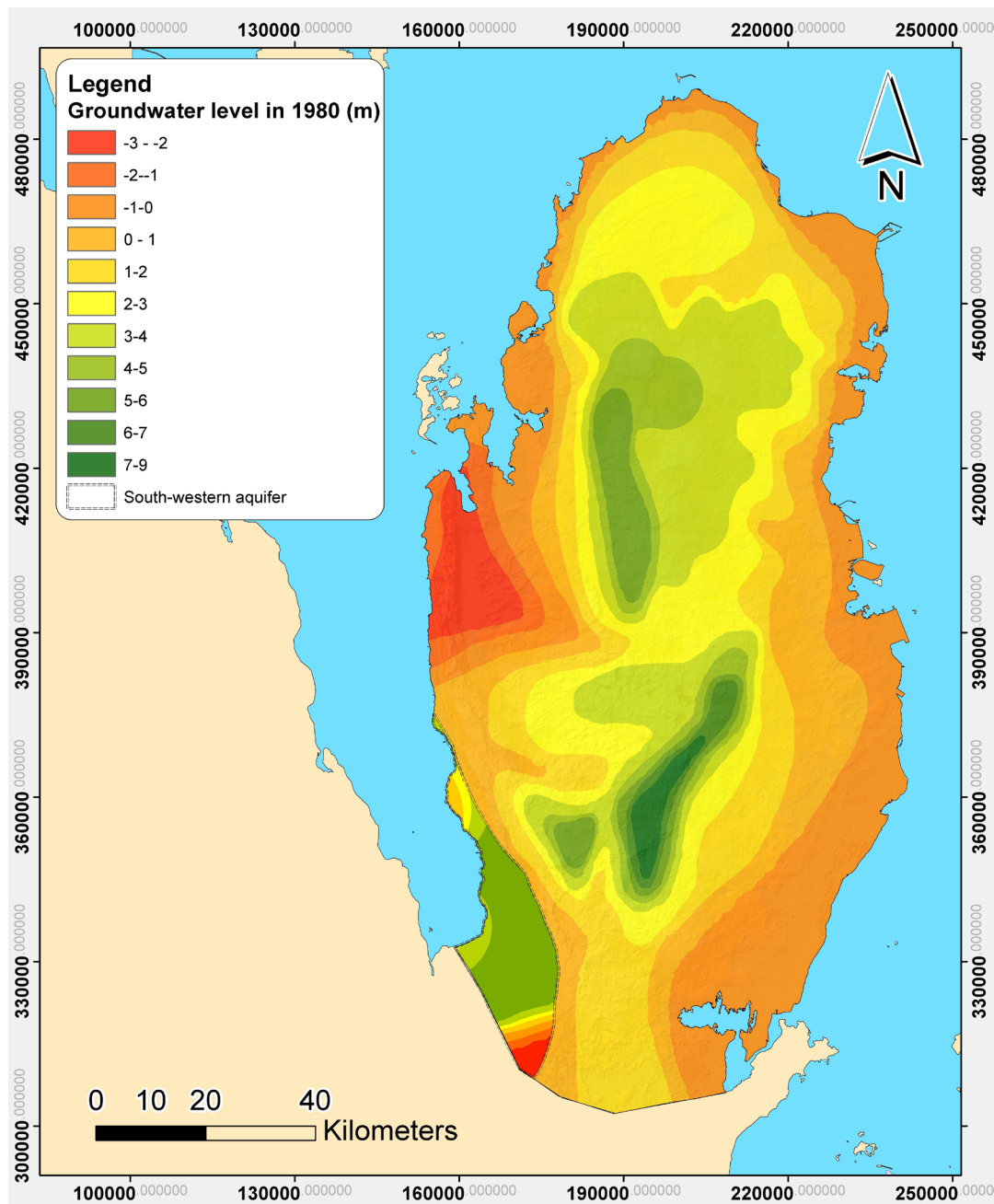


Figure 4.11: Groundwater level contour map for the shallow aquifer of Qatar in 1980

شكل 11.4: خريطة مناسيب المياه الجوفية للخزان الجوفي السطحي في قطر في العام 1980

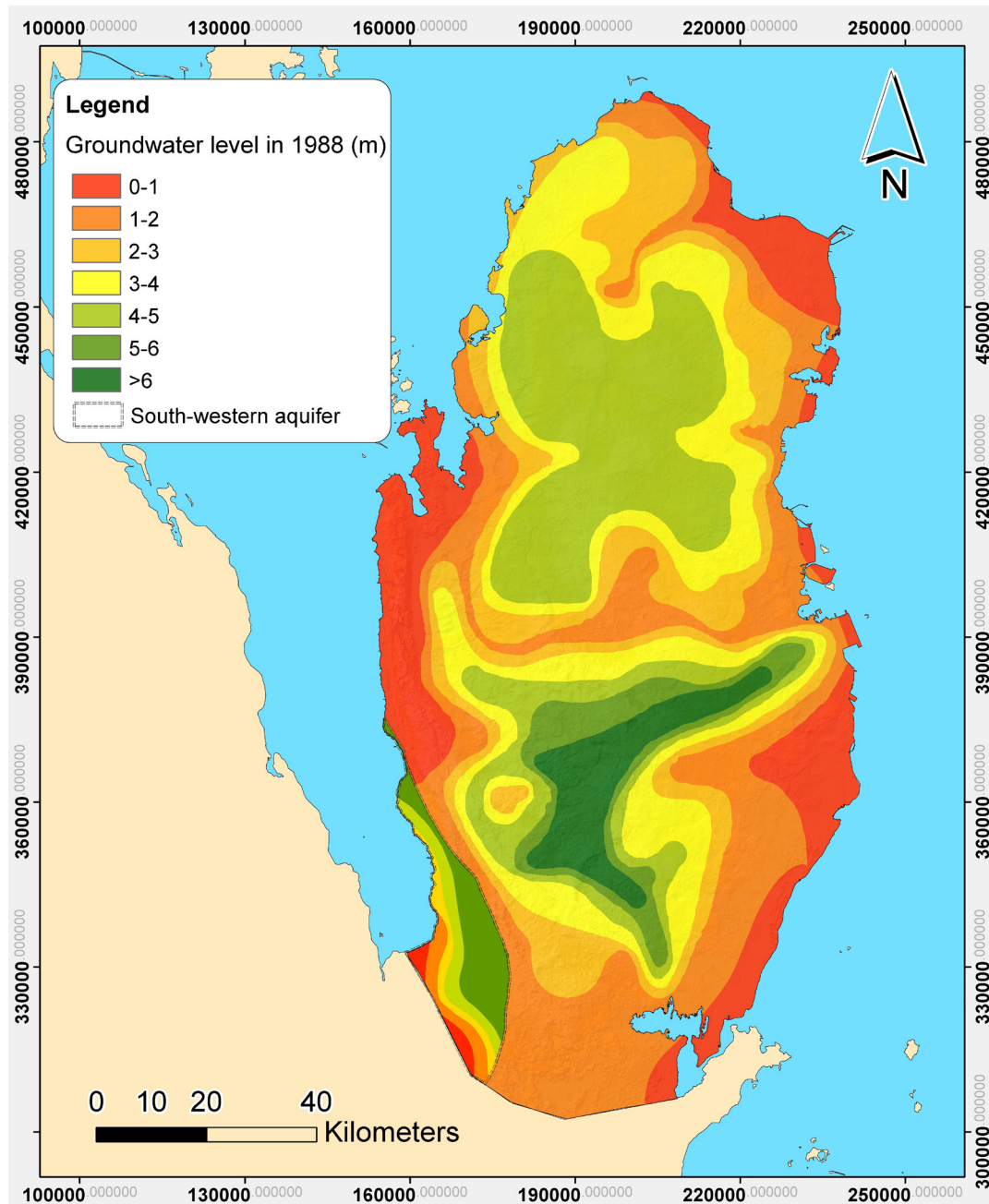


Figure 4.12: Groundwater level contour map for the shallow aquifer of Qatar in 1988

شكل 12.4: خريطة مناسيب المياه الجوفية للخرزان الجوفي السطحي في قطر في العام 1988

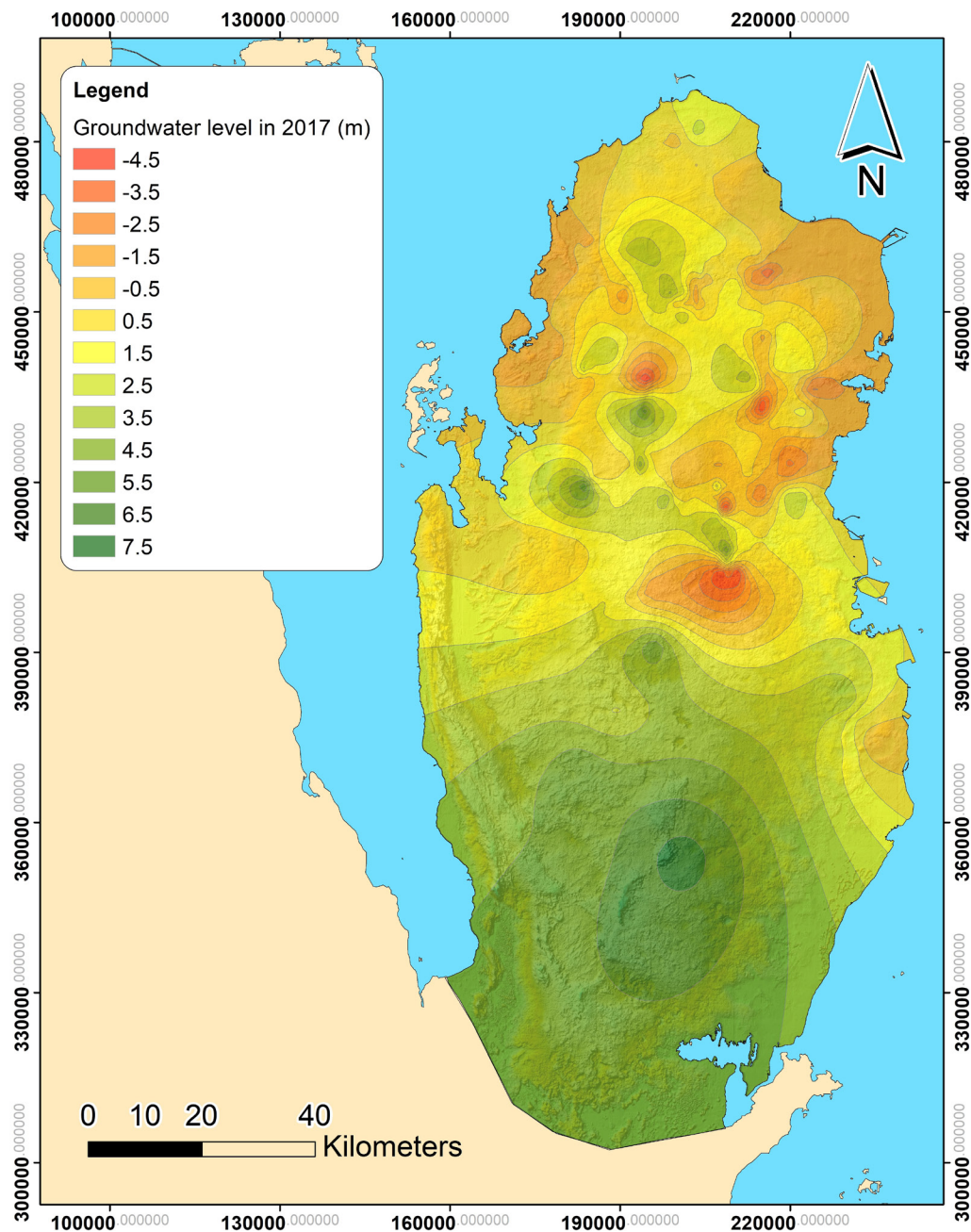


Figure 4.13: Groundwater level contour map for the shallow aquifer of Qatar in 2017

شكل 13.4: خريطة مناسيب المياه الجوفية للخزان الجوفي السطحي في قطر 2017

4.9 Natural Groundwater Flow

Groundwater flows from high potential (i.e level) to low potential. A path line, which a particle of water follows when moving from high level to low level, depends on the hydraulic conductivity of the porous media, and the groundwater level contour lines. Flow lines are normally perpendicular to groundwater contour lines. A numerical model was used to simulate the natural status of groundwater in Qatar (Baalousha, 2016a) (resembling steady state conditions, see section 4.8). Results of the model are shown in Figure 4.14, which depicts the groundwater contours and the flow lines. These flow lines were generated using MODPATH model (Pollock, 2017). They represent a few particle of water starting at the peak values of groundwater levels, and moving downstream.

The flow lines are useful for groundwater protection and land management. Knowledge of flow direction, and capture zones of wells help protecting the public water supply and mitigate any contamination risk. On land anthropogenic activities, that may affect the groundwater quality, must be located away from the capture zones of public water supply. This map, in combination with vulnerability maps (section 4.7) are useful for groundwater protection (Baalousha, 2011).

9.4 الجريان الطبيعي للمياه الجوفية

تتدفق المياه الجوفية من المواقع ذات الطاقة الأعلى (المستوى الأعلى) للأماكن ذات الطاقة الأدنى، ويعتمد خط السير الذي يتبعه جزء من الماء عند الانتقال من مستوى عالٍ إلى مستوى منخفضٍ على الموصليّة الهيدروليكية للخزان الجوفي، وخطوط مستويات المياه الجوفية، وعادة ما تكون خطوط التدفق متعامدة مع خطوط تساوي المناسيب للمياه الجوفية. تم استخدام نموذج رقمي لمحاكاة الوضع الطبيعي للمياه الجوفية في قطر (Baalousha, 2016a) (يشبه ظروف الحالة المستقرة للمياه الجوفية، انظر القسم 8.4). تظهر نتائج النموذج في الشكل 4.14، الذي يبين خطوط تساوي مناسيب المياه الجوفية وخطوط التدفق. تم إنشاء خطوط التدفق هذه باستخدام نموذج MODPATH، وتمثل خطوط التدفق جزيئات قليلة من الماء تبدأ من أماكن المناسيب العالية للمياه الجوفية، وتتحرك باتجاه المصب (Pollock, 2017).

خطوط التدفق مفيدة لحماية المياه الجوفية وإدارة الأراضي. يساعد معرفة اتجاه جريان المياه الجوفية، والمناطق الواقعة حول آبار المياه في حماية إمدادات المياه العامة والتخفيف من مخاطر التلوث. يتوجب أن تكون الأنشطة البشرية على الأرض، والتي قد تؤثر على جودة المياه الجوفية، يجب أن تقع بعيداً عن المناطق المحيطة بآبار مياه الشرب. تساعد هذه الخريطة، إلى جانب خرائط القابلية للتلوث (انظر القسم 7.4) في حماية المياه الجوفية (Baalousha, 2011).

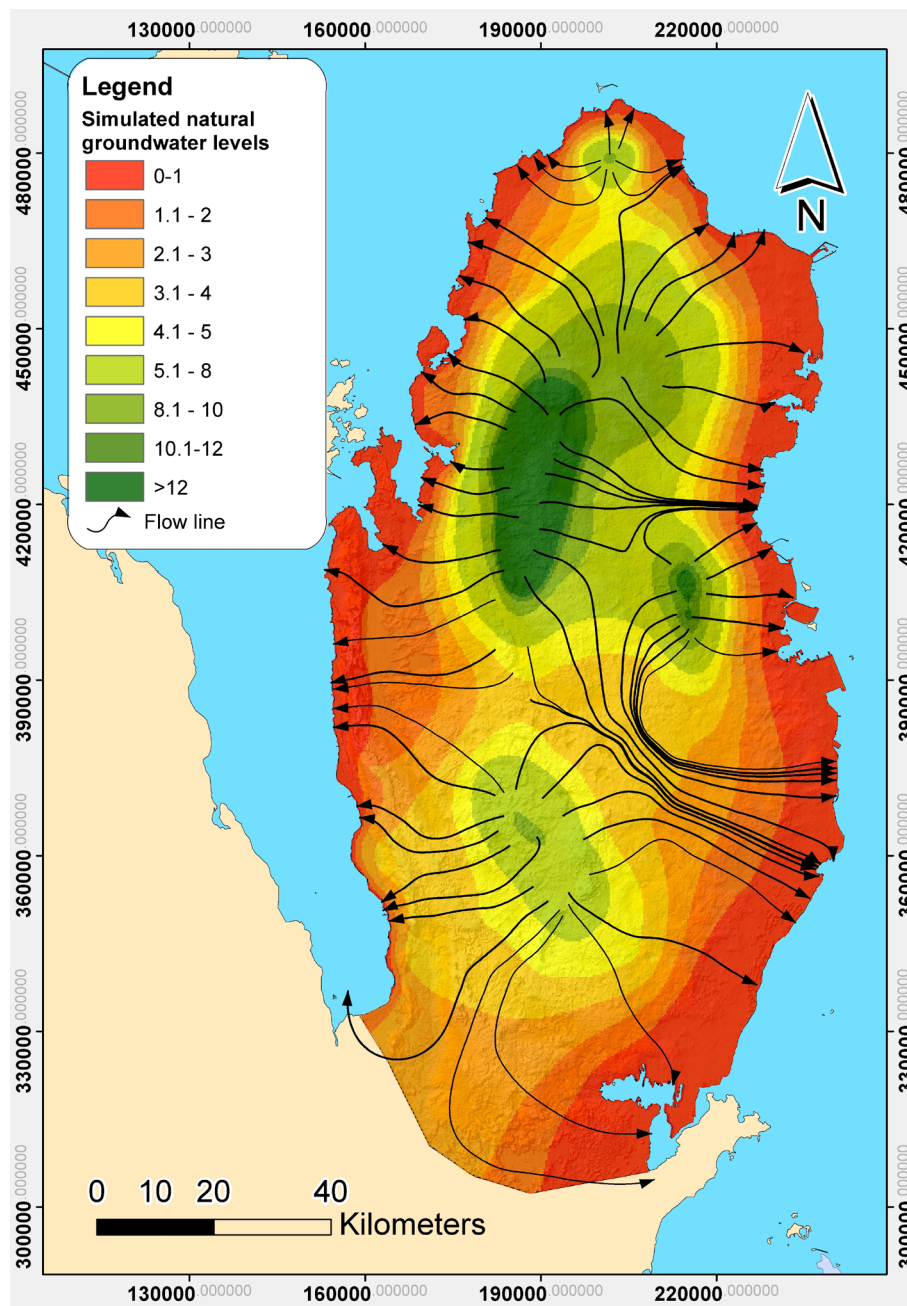


Figure 4.14: Simulated natural groundwater levels and flow paths (meters above mean sea level)
 شكل 14.4: خريطة مناسيب المياه الجوفية الطبيعية المحاكاة، واتجاهات جريان المياه الجوفية (بالمتر بالنسبة لمنسوب سطح البحر)



II

Paleo Hydrogeology, Human and Water

هيدروجيولوجيا الزمن السحيق، الإنسان والمياه



(5)
The Last Glacial Period
العصر الجليدي الأخير



5.1 Arabian Basin During the Last Glacial Period

Earth's history witnessed long periods of glaciation, and shorter warm periods similar to the current conditions. The Pleistocene Epoch (2.58 million years to 11,700 years before the present (BP) is the early Epoch of Quaternary Period, and it witnessed a high variability of temperature, which changed the conditions on earth between glaciation and inter-glaciation. Over the last million years, the cycle time of temperature variability (the time between peaks of low temperatures) was around 100,000 years (Earle & Panchuk, 2019). The inter-glacial periods (warmer periods) are much shorter in terms of geological age than the glaciation periods, and we are living in an inter-glaciation period. The last glacial period occurred in the Pleistocene Epoch and lasted between approximately 115,000 years and 11,700 years BP, where the Holocene Epoch starts. At the beginning of the last glacial period, the sea level was around 3 meters higher than the present level. It continues dropping as the glacial mass on earth accumulates further until 18,000 year BP, where the ice sheets reach the maximum level.

The sea level during the LGM was 120 meters below the current sea level. The Last Glacial Maximum (LGM) is the time when sea level was at its lowest level (around 120 meters below the present sea level (Siegert, 2014). During the Maximum Glacial, most of the water on earth was locked in the ice sheets, which covered wide areas in the northern hemisphere and the Arctic Ocean up to the continental shelf break.

Figure 5.1 shows the area of present Arabian Gulf, where the sea floor was exposed. At the LGM the weather was very dry and no rivers or streams existed. The Arabian Basin was disconnected from the Gulf of Oman until 14,000 years BP, when Hormuz Strait opened a narrow waterway into the Arabian Basin (Lambeck, 2004; Rose, 2010).

1.5 الحوض العربي خلال العصر الجليدي الأخير

شهد تاريخ الأرض فترات طويلة من العصور الجليدية وفترات دافئة أقصر مشابهة لظروف الأرض الحالية. تعتبر فترة البليستوسين (2,58 مليون سنة إلى 11,700 سنة قبل الوقت الحالي) الفترة المبكرة من العصر الرباعي، وقد شهدت تغيرًا كبيرًا في درجة الحرارة؛ حيث غيرت الظروف على الأرض بين تراكم الجليد والدفيء. كان وقت دورة تقلب درجات الحرارة (الوقت بين درجات الحرارة الدنيا) على مدى المليون سنة الماضية، حوالي 100,000 سنة (Earle & Panchuk, 2019). إن الفترات بين العصور الجليدية (الفترات الدافئة) التي مرت بها الأرض تعتبر قصيرة مقارنةً مع فترات العصور الجليدية، وعصرنا الحالي يعتبر فترة ما بين عصرين جليديين. لقد امتد آخر عصر جليدي طوال الفترة الواقعة ما بين 11,500 سنة قبل الآن وحتى 11,700 سنة قبل الآن؛ حيث يمثل انتهاء العصر الجليدي الأخير بداية عصر الهولوسين. لقد كان منسوب مياه البحر أكثر من منسوبه الحالي بثلاثة أمتار في بداية العصر الجليدي الأخير واستمر في الانخفاض التدريجي مع تقدم العصر الجليدي وتراكم الجليد فوق سطح الأرض حتى ما قبل ثمانية عشر ألف سنة؛ حيث بلغ تراكم الجليد أقصى مستوى له.

في أقصى العصر الجليدي بلغ منسوب سطح البحر 120 م أقل من منسوبه الحالي. في ذلك الوقت غطت طبقات الجليد أجزاءً واسعة من نصف الكرة الشمالي والمحيط المتجمد الشمالي حتى طرف الجرف القاري. إن الوقت الذي وصل فيه العصر الجليدي أقصاه انخفض فيه مستوى سطح البحر إلى أقل منسوب ممكن (حوالي 120 م تحت المنسوب الحالي) (Siegert, 2014).

يظهر الشكل 5.1 المناطق التي تشكل اليوم الخليج العربي؛ حيث كان قاع البحر مكشوفًا في وقت الحد الأقصى للعصر الجليدي الأخير. في تلك الفترة كان المناخ جافًا جدًا؛ حيث لم تتواجد أي أنهار أو جداول في الجزيرة العربية. لقد كان الحوض العربي منفصلاً عن خليج عمان حتى 14,000 سنة قبل وقتنا الحاضر؛ حيث بدأت المياه تتدفق بشكل بسيط عبر مضيق هرمز (Lambeck, 2004; Rose, 2010).

Figure 5.2 shows wider areas of the Basin, which are flooded with sea water at 12,000 years BP present. When the weather started warming at the beginning of Holocene (11,700 years BP), many rivers and streams used to flow through Mesopotamia and Arabia draining into this depression in the Arabian Basin (Rose, 2010). The sea level continues rising and so does the flooding of the basin, as shown in Figure 5.3. At 8,000 years before present, the majority of the Arabian Basin was covered with sea water and Qatar peninsula started taking its current shape, as appears in Figure 5.4. It was not until around 7,000-5,000 years BP when the sea level reached today's level (Lokier et al., 2015), and continued rising to surpass it by more than 2 meters, as is explained in Section 33. Evidence from many places shows the location and the extent of the old shorelines. For example, archaeologists found evidence of ancient flooding of the Ur City just to the north of the Arabian Gulf in the Mesopotamian region around 5,000 years BP, which coincides with the sea level rise in the Holocene Epoch (Mörner, 2015).

يظهر الشكل 5.2 مناطق واسعة من الحوض العربي، وقد غمرتها مياه المحيط قبل 12,000 سنة من الآن. عندما بدأ المناخ بالتحسن ودرجات الحرارة بالارتفاع في بداية عصر الهولوسين (قبل 11700 سنة) جرت العديد من الأنهار التي كانت تنساب من بلاد ما بين النهرين وجزيرة العرب وتصب في تلك المنخفضات المغمورة في الحوض العربي (Rose, 2010). لقد استمر ارتفاع منسوب البحر وبالتالي غمر الحوض العربي بالمياه كما يظهر في الشكل 5.3. مع مرور العام ثمانية آلاف قبل الآن كان معظم الحوض العربي قد غمرته المياه وبدأت شبه الجزيرة القطرية تأخذ شكلها الحالي كما يظهر في شكل 5.4، ولكن لم يصل ارتفاع البحر لمنسوبه الحالي حتى ما قبل 7,000 إلى 5,000 سنة من وقتنا الحاضر (Lokier et al., 2015) واستمر منسوب البحر بالارتفاع حتى تجاوز منسوبه الحالي بأكثر من مترين، كما هو موضح في قسم 2.5 هنالك دلائل كثيرة تظهر أماكن الشواطئ القديمة وامتدادها. لقد وجد الباحثون على سبيل المثال دليلاً على حصول فيضان غمر مدينة أور الواقعة مباشرة شمال الخليج، وأن هذا الفيضان حصل قبل 5,000 عام تقريباً، الأمر الذي يتوافق مع ارتفاع مستوى البحر في عصر الهولوسين (Mörner, 2015).

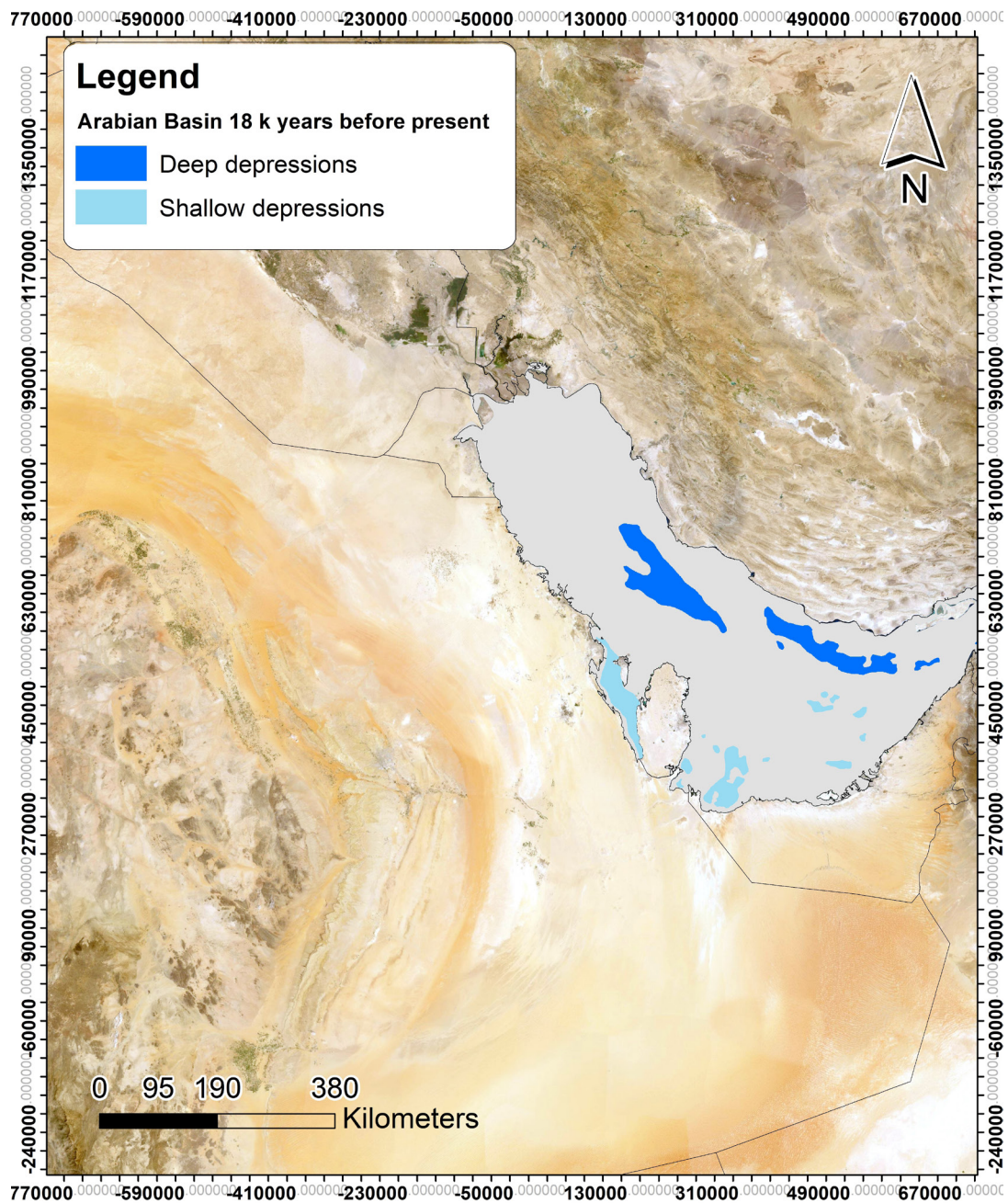


Figure 5.1: Arabian Basin (Arabian Gulf at present) at the Last Glacial Maximum (18000 years before the present)
شكل 1.5: الحوض العربي (الخليج العربي حاليًا) خلال فترة الحد الأقصى للعصر الجليدي الأخير (قبل 18000 سنة من الآن)

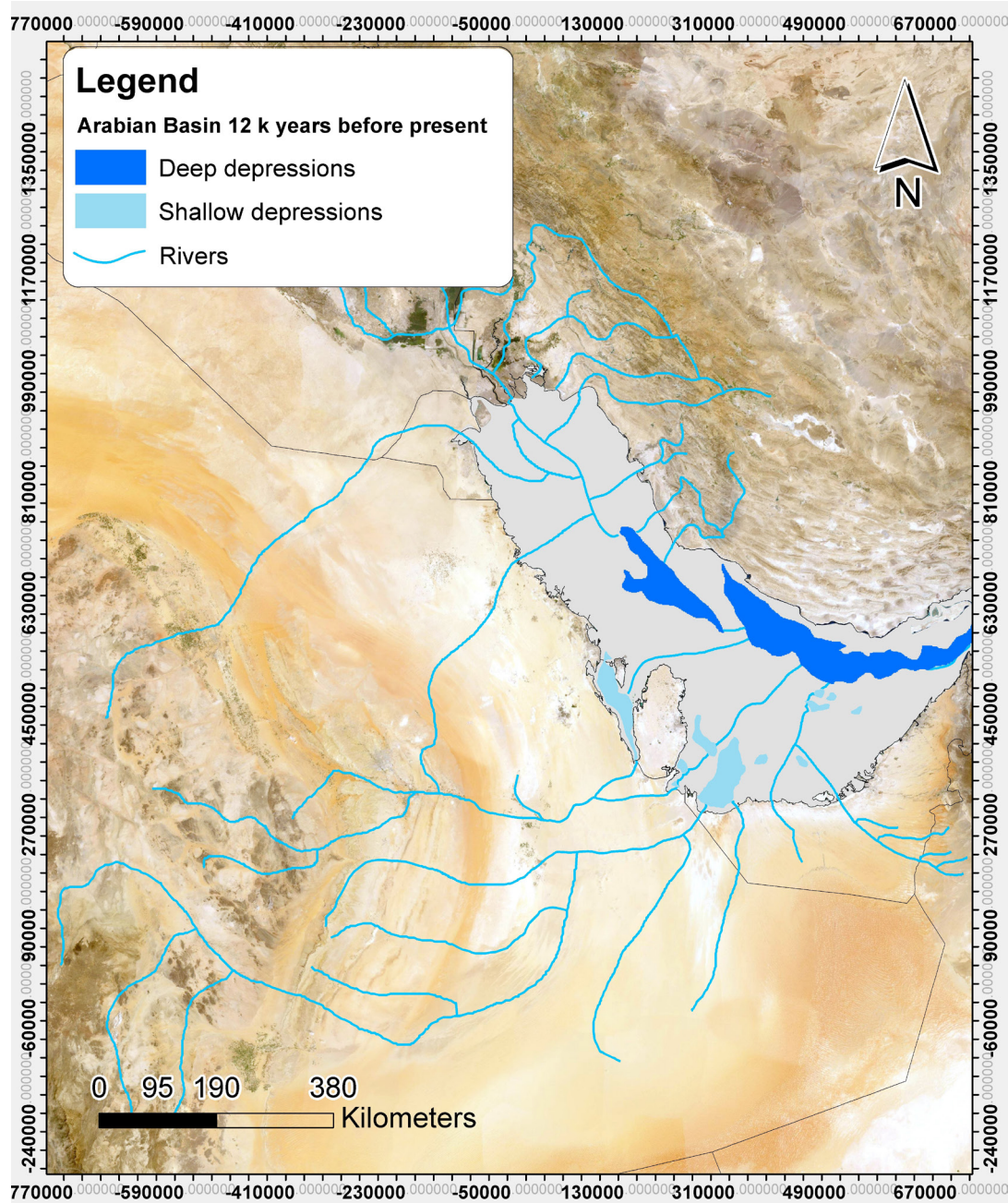


Figure 5.2: The beginning of Strait Hormuz flooding at the late Pleistocene/early Holocene (12000 years before the present)
شكل 2.5: بداية غمر مضيق هرمز في نهاية عصر البليستوسين وبداية عصر الهولوسين (قبل 12000 سنة من الآن)

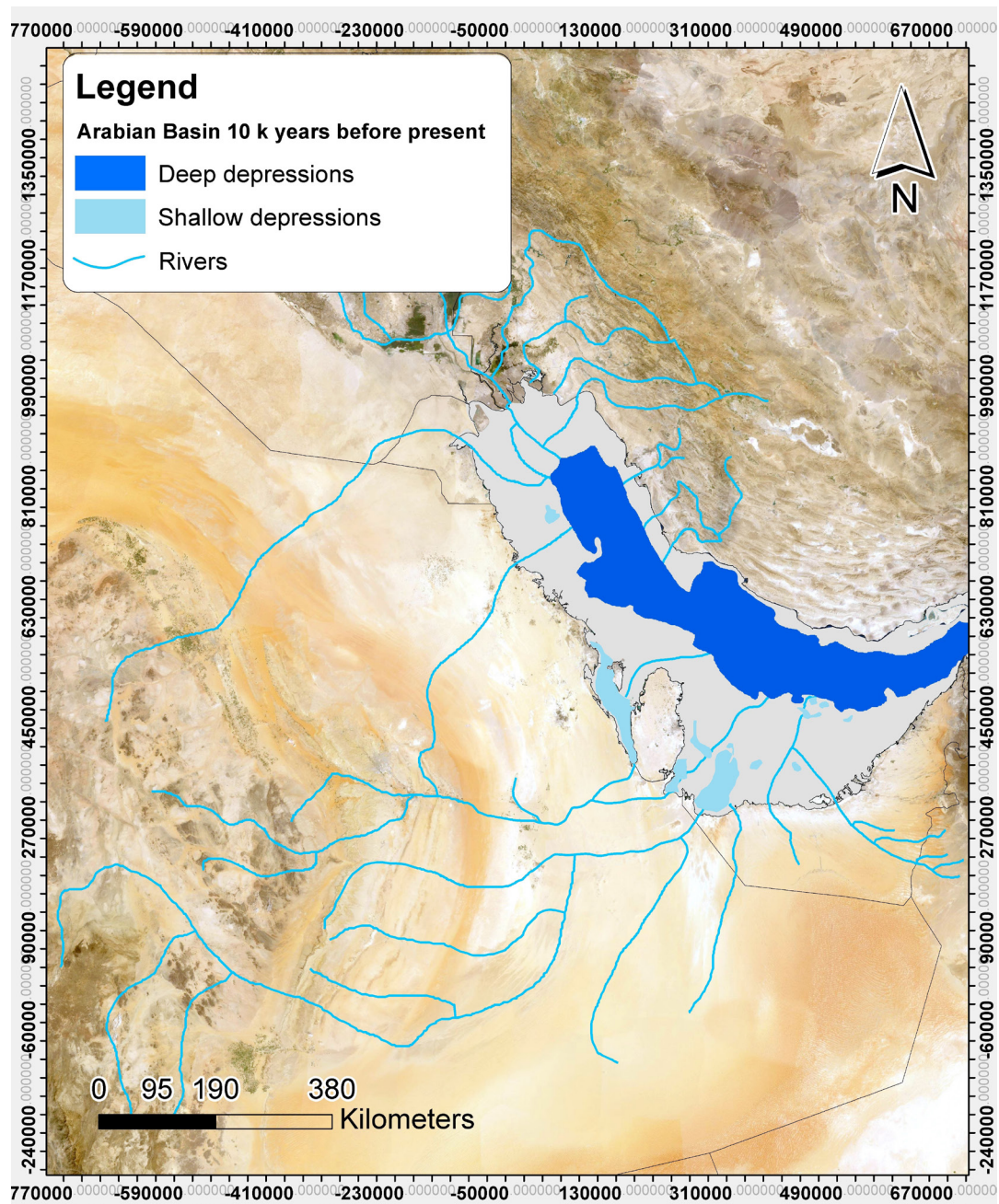


Figure 5.3: Flooding of the Arabian Basin 10000 years before the present

شكل 3.5: بداية عمر الحوض العربي قبل عشرة آلاف سنة من الآن

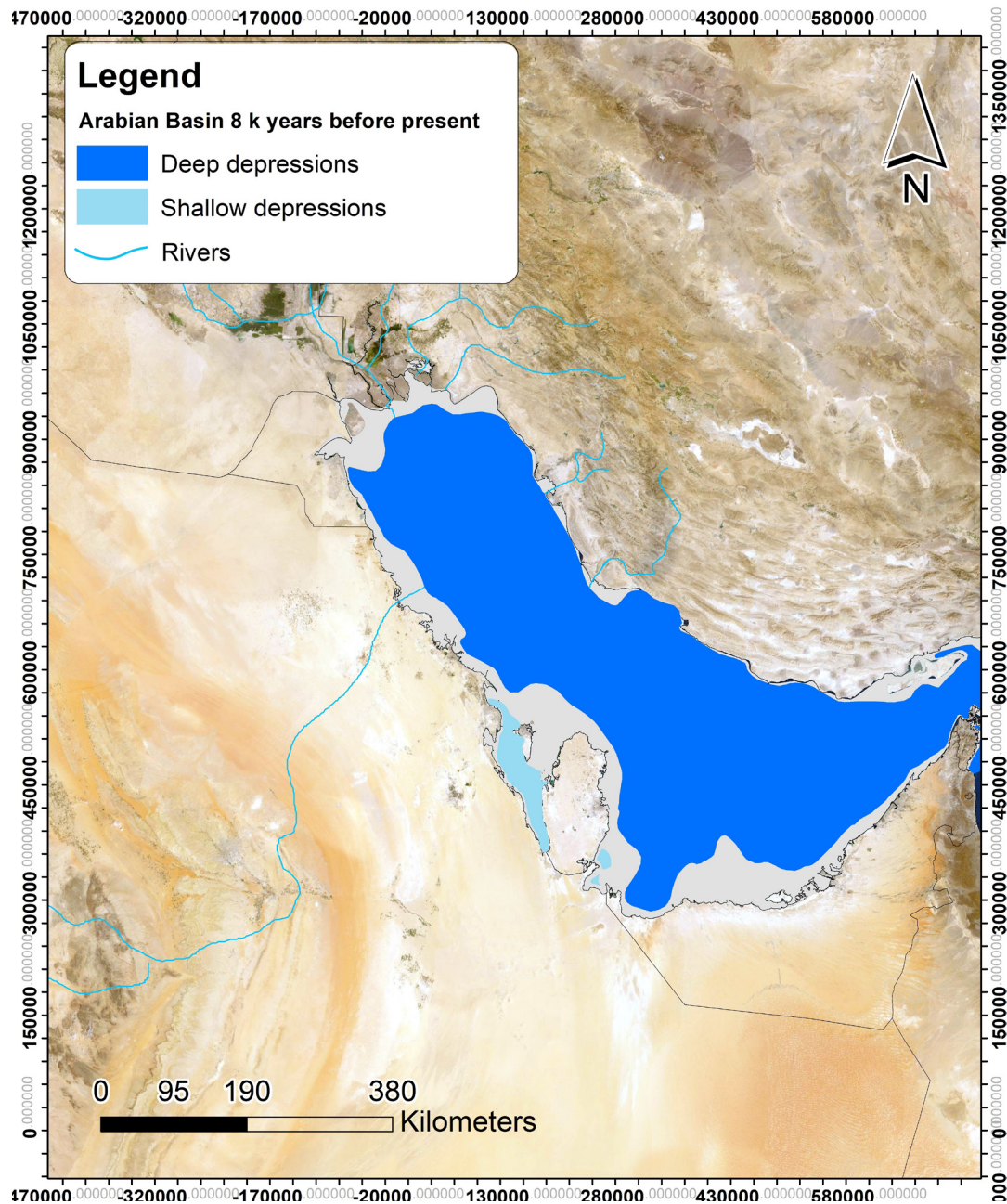


Figure 5.3: Flooding of the Arabian Basin 10000 years before the present

شكل 3.5: غمر معظم الحوض العربي قبل ثمانية آلاف سنة من الآن

5.2 Holocene Highstand

The Holocene Highstand is the time period during which the sea level rose above its current level, and reached its maximum. This period was between 7,500 and 3,000 years before the present (BP) (Jameson & Strohmenger, 2012). As discussed in Section 5.1, the sea level started rising relatively quickly post-Last Glacial Maximum, as the ice started melting. The sea level was 120 meters below the present level at 18,000 years BP (Strohmenger & Jameson, 2018). It continued to rise until it reached more than 2 meters above the present level between 7,000 and 3,000 years BP. At some stage during the Holocene highstand, Qatar was like an island, connected to the main land of Arabian Peninsula through a narrow land strip (Strohmenger & Jameson, 2018). The Holocene Highstand, which lasted for a few thousands of years, had a significant impact on the human history in the region (see section 7.1). During the period between 5,285 and 4,574 years BP, the sea level reached its maximum, and then dropped at a fast rate before stabilizing to near its current level around 1,140 to 1,170 years BP (Lokier et al., 2015). Several studies were done at coastal areas of Qatar to investigate the coastal records and barrier islands reflecting sea level rise (Engel, Strohmenger & Brückner, 2014; Jameson & Strohmenger, 2012; Mörner, 2015; Rivers et al, 2019). The Holocene Highstand can be explained by a phenomenon called *ocean siphoning* (Gehrels & Long, 2008; Rashid et al., 2015). When ice mass melted into the oceans, this increase in mass created a collapse in the ocean floors, widening the ocean basins. The water was slowly siphoned in the ocean floor, but this was masked by the rapid rise of sea level. The rate of sea level rise as a result of ice melting was higher than the rate of drop due to ocean siphoning. This continued until the ice melting ceased some 4,000 years ago. The ocean siphoning continued afterwards, which resulted in drop in global sea level and exposure of up to 3 meters at the beaches

2.5 الحد الأعلى لمنسوب سطح البحر خلال عصر الهولوسين

الحد الأعلى لفترة الهولوسين هي الفترة التي ارتفع فيها منسوب البحر عن مستواه الحالي ليبلغ أقصى ارتفاع له، وذلك في الفترة الواقعة بين 7500 إلى 3000 سنة قبل الوقت الحاضر (Jameson & Strohmenger, 2012). كما نُوقش في القسم 5.1؛ فإن مستوى سطح البحر بدأ بالارتفاع بشكل متسارع بعد أعلى مستوى جليدي خلال العصر الجليدي الأخير. كان مستوى سطح البحر في ذلك الوقت 120 م أقل مما هو عليه الآن وذلك قبل 18000 عامًا، (Strohmenger & Jameson, 2018) واستمر بالارتفاع التدريجي ليبلغ أكثر من مترين فوق مستواه الحالي في الفترة الزمنية بين 7000 إلى 3000 عام قبل الآن. كانت قطر في مرحلة ما خلال الحد الأقصى لارتفاع البحر أشبه بجزيرة تتصل بالأرض الرئيسية لشبه الجزيرة العربية من خلال شريط أرضي ضيق (Strohmenger & Jameson, 2018). لقد امتدت تلك الفترة الزمنية لبضعة آلاف من السنين، وكان لها تأثير كبير على تاريخ الإنسان في المنطقة (انظر القسم 7.1). بلغ مستوى سطح البحر أعلى مستوى له في منطقة الخليج في الفترة ما بين 5285 إلى 4574 سنة قبل الوقت الحالي، قبل أن يبدأ بالهبوط السريع ليصل إلى ما يقارب مستواه الحالي في الفترة ما بين 1140 إلى 1170 سنة قبل الوقت الحالي (Lokier et al., 2015). لقد أجريت العديد من الدراسات على سواحل دولة قطر لدراسة بيانات الشواطئ والجزر الحاجزة والتي نتجت عن تغير منسوب البحر اخلال عصر الهولوسين (Engel, Strohmenger & Brückner, 2014; Jameson & Strohmenger, 2012; Mörner, 2015; Rivers et al, 2019). يمكن تفسير الحد الأعلى لمنسوب البحر خلال عصر الهولوسين بظاهرة إمتصاص قاع المحيطات للماء (Gehrels & Long, 2008; Rashid et al., 2015). لقد أدى ذوبان كميات كبيرة من الجليد إلى حدوث انهيارات في قيعان المحيطات واتساع أحواضها، وتم احتواء كميات إضافية من المياه في المحيطات بشكل بطيء؛ حيث إن معدل ارتفاع سطح البحر نتيجة ذوبان الجليد أسرع من معدل انخفاضه نتيجة إتساع المحيطات، واستمر الوضع على ذلك حتى ما قبل 4000 عام؛ حيث توقف ذوبان الجليد. لقد استمرت عملية امتصاص كميات من المياه لقيعان المحيطات خلال الفترة اللاحقة، الأمر الذي أدى إلى انخفاض

in Qatar. Figure 5.5 shows the sea level at the Holocene Highstand, which is 2 meters above its current level. When sea level dropped and the coastline retreated, remnants of saltwater remained in depressions along the shoreline. At present, most of these depressions are covered with salt flats (sabkhas).

منسوب البحر وانكشاف شواطئ بارتفاع أكثر من ثلاثة أمتار في قطر. يبين الشكل 5.5 منسوب البحر في قطر خلال الحد الأقصى في عصر الهولوسين بمنسوب مترين أعلى من المنسوب الحالي. عندما انخفض منسوب البحر لاحقاً تجمعت مياه البحر في المناطق المنخفضة على امتداد شواطئ قطر، الأمر الذي أدى إلى تشكل المسطحات الملحية (السيخات) فيما بعد.

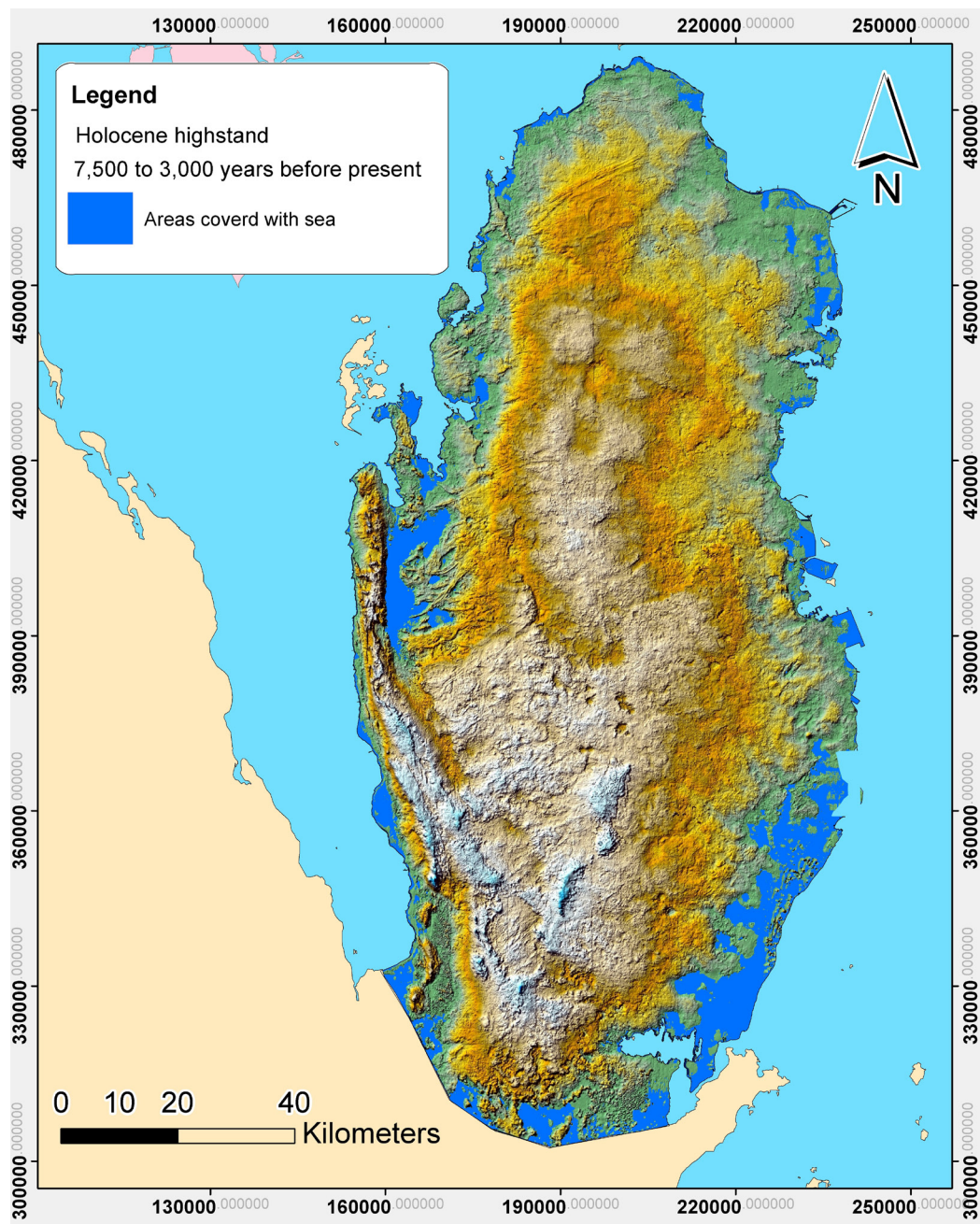


Figure 5.5: Holocene highstand (7500 to 3000 years before the present)
شكل 5.5: أعلى منسوب لسطح البحر في قطر خلال عصر الهولوسين (قبل 7500 إلى 3000 سنة من الآن).

5.3 Qatar Climate during the Holocene

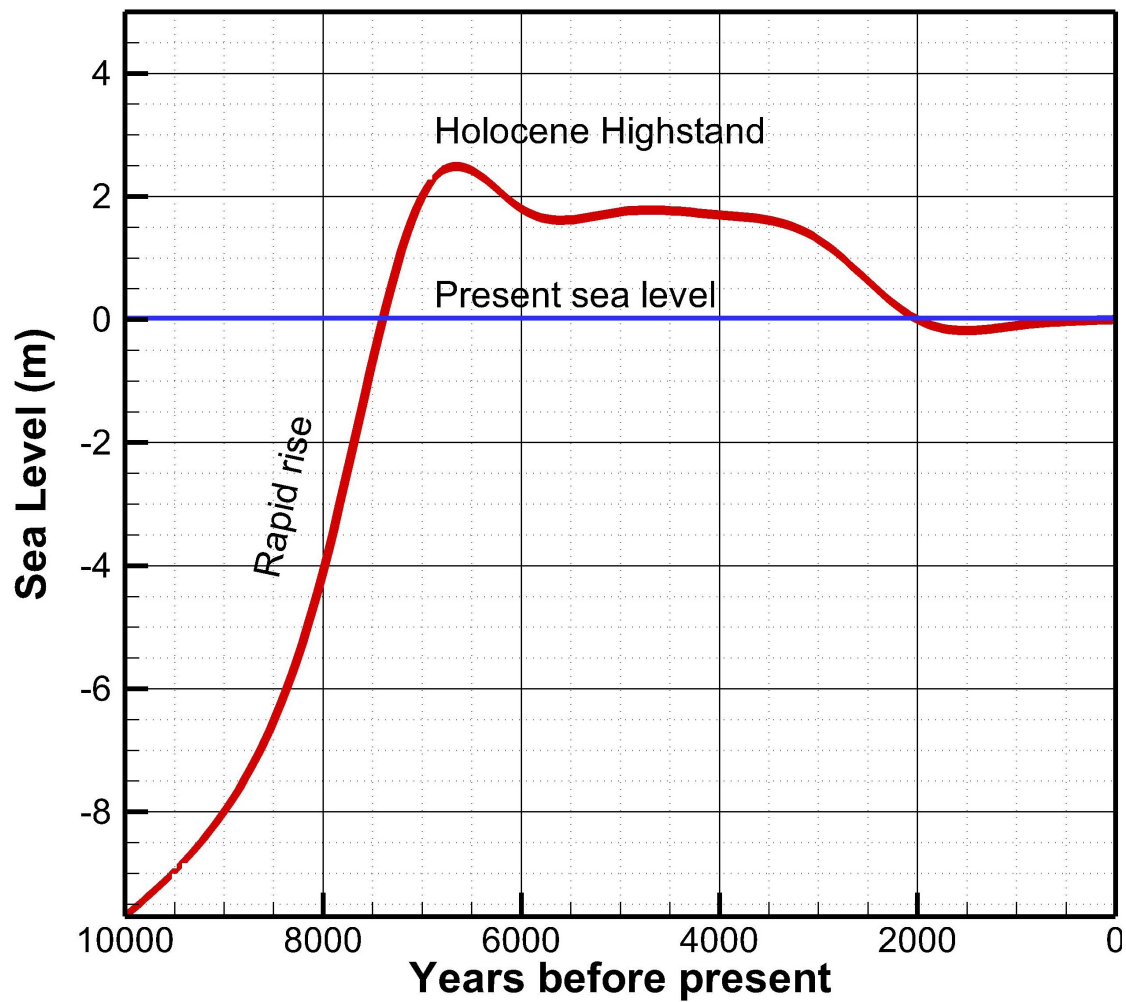
The climate in the Arabian Gulf region over the Last Glacial, which lasted between approximately 115,000 years and 11,700 years before present (BP), was fluctuating between pluvial and arid (al-Naimi et al., 2012). From Last Glacial Maximum (LGM) 18,000 years ago, sea levels started rising and sea transgression over land took place (see section 5.5). This continued into the Holocene, the second Epoch of Quaternary Period, (started at the end of the last glacial).

The early stage of the Holocene witnessed arid conditions in its beginning (al-Naimi et al., 2012; Parker & Goudie, 2008), and the sea level was between 40 to 49 meters below present level (Lambeck, 1996; Macumber, 2011). During these arid conditions, the Shamal winds prevailed, and the sand dunes accumulated in the northern part of Qatar. After 10,000 years BP, the melting ice in the glaciers changed the air circulation globally, which weakened the dry Al-Shamal winds (al-Naimi et al., 2012). In the period between 8,500 and 6,000 years BP, Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ) moved north, bringing the Indian Monsoon rain to Arabia. As a result, wet and rainy conditions prevailed in Qatar and the region (Macumber, 2018), but the exact location of the ITCZ is under much debate (Fleitmann et al., 2007; Parker & Goudie, 2008). This period is known as Holocene Climatic Optimum, and it witnessed a rapid increase in sea levels (Strohmenger & Jameson, 2018). Isotopes analysis in many coastal areas of Qatar showed the age of groundwater refers to that period (Eccleston, Pike & Harhash, 1981). After Holocene Highstand, the supply of sand from the Gulf floor was cut due to marine transgression (Glennie & Singhvi, 2002). Since 6000 years BP, the monsoon rain retreated back to the south, and arid climate prevailed in Qatar, with no change since, except the intensification of the aridity since 4,000 year bp.

3.5 مناخ قطر خلال فترة الهولوسين

كان المناخ في منطقة الخليج العربي خلال العصر الجليدي الأخير، الذي استمر ما بين 115,000 سنة و11,700 سنة قبل الوقت الحاضر، يتقلب بين المطري والجاف (al-Naimi et al., 2012). بدأ مستوى سطح البحر بالارتفاع التدريجي منذ ذروة العصر الجليدي قبل 18,000 سنة، مصحوبًا بامتداد مياه البحر على اليابسة (انظر القسم 5.5). استمر هذا الأمر خلال فترة الهولوسين (الفترة الثانية من الحقبة الرباعية) التي بدأت مع نهاية العصر الجليدي الأخير.

شهدت المرحلة الأولى من فترة الهولوسين ظروفًا مناخية قاحلة (al-Naimi et al., 2012; Parker & Goudie, 2008). وكان مستوى سطح البحر بين 40 إلى 49م تحت المستوى الحالي (Lambeck, 1996; Macumber, 2011)، وخلال هذه الظروف القاحلة سادت رياح الشمال وتراكمت الكثبان الرملية في الجزء الشمالي من قطر. خلال الفترة ما بين 8500 و6000 سنة قبل الوقت الحاضر. أدى ذوبان الجليد في القطب الشمالي لإضعاف رياح الشمال في الفترة بعد 10,000 سنة قبل الوقت الحاضر، مما أدى إلى تحرك منطقة الالتقاء الواقعة بين المدارين ITCZ شمالاً الأمر الذي جلب الأمطار الموسمية الهندية للجزيرة العربية وقطر؛ حيث سادت الظروف المناخية الماطرة (Macumber, 2018) على الرغم من الخلاف الكثير المتعلق بالموقع الحقيقي لمنطقة ITCZ (Fleitmann et al., 2007; Parker & Goudie, 2008). تُعرف هذه الفترة باسم المناخ الهولوسيني الأمثل، وشهدت زيادة سريعة في مستوى سطح البحر (Strohmenger & Jameson, 2018). أظهر تحليل النظائر لعينات المياه الجوفية في بعض مناطق قطر أن عمر تلك المياه يعود لتلك الفترة (المناخ الهولوسيني الأمثل) (Eccleston, Pike, & Harhash, 1981). بعد ارتفاع مياه البحر خلال الحد الأعلى لفترة الهولوسين انقطع مصدر الرمال التي كانت تأتي من قاع الخليج حين كان منكشفًا، وذلك بسبب امتداد مياه البحر فوق تلك المنطقة (Glennie & Singhvi, 2002). تراجعت الأمطار الموسمية إلى الجنوب بعد فترة الحد الأعلى لعصر الهولوسين، وساد المناخ القاحل قطر على مدى 6000 سنة الماضية، بدون أي تغيير منذ ذلك الوقت باستثناء زيادة حدة الجفاف قبل 4000 سنة الماضية.



Sea level over the last 10,000 years
منسوب البحر خلال العشرة آلاف سنة الماضية



(6)
Paleography
خرائط الزمن السحيق

6.1 Introduction

As discussed in the geology Chapter (3), most of the top carbonate formations of Qatar (down to around 300 meters deep) occurred over the last 60 million years. This includes surface geology, Dam, Dammam, Rus, and Um Er Radhuma Formation. Dam is from Miocene Epoch, whereas both Dammam and Rus Formations are from the Eocene Epoch. The Umm Er Radhuma Formation is from Paleocene-Early Eocene Epoch.

Understanding the environment and the conditions during which sedimentation occurs helps identify the geology and the climatic conditions at that time. The Paleocene Epoch, which started 65 million years before the present (BP) witnessed the disappearance of the Tethys Sea that separated the super-continent of Laurasia in the north from Gondwana in the south. This sea lasted over the period from 251 to 65.5 million years BP before disappearing. The sea started closing when parts of Gondwana continent (including Arabian Plate) drifted to collide with Laurasia (Cunliffe, 2017), as shown in Figures 6.1 to 6.6. In these figures, remnants of the Tethys Sea can be seen to the east of the Arabian Plate. Complete closing of the former Tethys Sea occurred at the Oligocene/Miocene boundary (Hrbek & Meyer, 2003). The area where the remnant of Tethys Sea existed became the Arabian Gulf, which became a basin during the Last Glacial Maximum, 18,000 years BP (see section 5.1).

This evolution of the region over millions of years, especially the existence of Tethys Sea, the deposition history and the perfect seal by evaporites layers, resulted in the abundance of fossil fuel (i.e. oil and gas), in the region. The organic sediments have been accumulated since the Jurassic time, and as the Arabian Gulf is in the subduction zone, it was buried and subjected to a high pressure. These sediments were converted to oil and gas as a result.

1.6 مقدمة

كما نوقش في فصل الجيولوجيا (راجع الفصل 3) فإن معظم التكوينات الكربونية العلوية في دولة قطر (حوالي 300 متر تحت سطح الأرض) تشكلت على مدى 60 مليون سنة الماضية، وهذا يشمل الجيولوجيا السطحية، تكوين الدمام، تكوين الرس وتكوين أم الرضمة. يتبع تكوين الدمام لفترة الميوسين، وتكوين الدمام والرس لفترة الإيوسين، بينما تكوين أم الرضمة لفترة ما بين الباليوسين - الإيوسين.

إن فهم البيئة والظروف التي حدثت فيها ترسيب الطبقات يساعد على معرفة الجيولوجيا والظروف المناخية السائدة في ذلك الوقت. لقد شهدت فترة الباليوسين التي بدأت قبل 65 مليون سنة اختفاء بحر تيثس الذي فصل القارة الكبرى في لوراسيا في الشمال عن غوندوانا في الجنوب. لقد بقي هذا البحر خلال الفترة من 251 إلى 65.5 مليون سنة قبل الوقت الحاضر قبل أن يختفي. لقد بدأ هذا البحر في الإنغلاق عندما انجرفت أجزاء من غوندوانا (بما في ذلك الصفيحة العربية) لتتصادم بقارة لوراسيا (Cunliffe, 2017)، كما هو موضح في الأشكال 6.1 إلى 6.6. كما هو واضح في تلك الأشكال، يمكن رؤية بقايا بحر التيثس إلى الشرق من الصفيحة العربية؛ حيث حدث الإغلاق الكامل لبحر تيثس في الفترة الانتقالية ما بين بين فترة الأوليجوسين وفترة الميوسين (Hrbek & Meyer, 2003). ولقد أصبحت المنطقة التي كانت فيها بقايا بحر تيثس الخليج العربي الذي تحول لاحقاً إلى حوضي مكشوف خلال العصر الجليدي الأخير قبل 18000 سنة من الوقت الحاضر (راجع قسم 5.1).

أدت هذه التطورات في المنطقة على مدى ملايين السنين، وخاصة وجود بحر تيثس، وتاريخ الترسيب، والإنغلاق المثالي للطبقات الكربونية بطبقات التبخر، إلى وفرة الوقود الأحفوري (أي النفط والغاز) في المنطقة. وقد تراكمت الرواسب العضوية منذ العصر الجوراسي، وبما أن الخليج العربي يقع في منطقة الانغراس للأسفل، فقد تم دفن تلك الرواسب وتعرضها لضغط مرتفع، مما أدى إلى تحول هذه الرواسب إلى النفط والغاز نتيجة لذلك.

6.2 Paleocene-Early Eocene

The Paleocene–Early Eocene is the time when Umm Er Radhuma Formation was deposited (see section 3.6). It is between 60 and 55 million years before the present. During this period, shallow marine ramps covered the southern margin of the Tethys Sea (Ryan, Kaczmarek & Rivers, 2020), as shown in Figure 6.1. This Formation was deposited over the entire area of Qatar, in addition to many adjacent countries. The sedimentation history indicates the environment was sub-tidal, with a decreasing depth trend moving upward (Boukhary M et al., 2011). It was deposited in an open marine environment (Rivers et al., 2019).

6.3 Early Eocene

The Early Eocene Epoch started about 56 million years before the present, and the Rus Formation in Qatar was deposited in during this period (refer to section 3.5) in a shallow shelf (Dill et al., 2005). Rus Formation was deposited in two different environments varying from super tidal to sub-tidal environments (Al-Saad, 2003). It is believed that this Formation was deposited in a warm and shallower marine environment than the underlying Umm Er Radhuma Formation (see Figure 6.2) (Rivers et al, 2019). The thickness of Rus Formation is high in the structurally low area, and vice versa, due to subsidence at the time of deposition (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Le blanc., 2017). Several sedimentary facies occurred in Rus Formation, including the evaporites layer (see section 4.5) that occurred in restricted circulation environment. The deposition period of Rus Formation was divided into two time steps, with different environments in the northern and southern parts of Qatar. In the first step, the northern part was a shallow marine, whereas the southern part was a restricted marine/coastal terrestrial (Rivers et al., 2019). During this time the gypsum layer of Tarina Member (see section 3.5) (i.e.gypsum) was deposited in the southern part only. In the second time step, one environment dominated the entire country, which is shallow marine. In this time period the limestone layer of Al-Khor Member was deposited (Rivers et al., 2019).

2.6 الباليوسين – الإيوسين المبكر

فترة الباليوسين (الإيوسين المبكر) هو الفترة التي ترسب فيها تكوين أم الرضمة، وقد امتدت تلك الفترة ما بين 60 إلى 55 مليون سنة قبل الوقت الحاضر. خلال هذه الفترة (Ryan, Kaczmarek & Rivers, 2020)، لقد غطت المنحدرات البحرية الضحلة الجانب الجنوبي لبحر تيثس في تلك الفترة، كما هو موضح في شكل 6.1. لقد ترسب تكوين أم الرضمة في جميع أنحاء دولة قطر، بالإضافة إلى العديد من البلدان المجاورة. يشير تاريخ الترسيب إلى أن البيئة كانت تحت منطقة المد والجزر، ويقل عمق الترسيب كلما اتجهنا للأعلى (Boukhary M et al., 2011). وتم الترسيب في بيئة بحرية مفتوحة (Rivers et al., 2019).

3.6 الإيوسين المبكر

بدأت حقبة الإيوسين المبكر قبل 56 مليون سنة تقريباً قبل الوقت الحاضر، وتم ترسيب تكوين الرس في قطر خلال هذه الفترة (راجع القسم 5.3) على الرف القاري الضحل (Dill et al., 2005). لقد ترسب تكوين الرس على مرحلتين في بيئتين مختلفتين ما بين منطقة فوق المد إلى منطقة تحت المد (Al-Saad, 2003). من المعتقد أن تكوين الرس تم ترسيبه في بيئة بحرية دافئة وأكثر ضحالة من البيئة التي ترسب فيها تكوين أم الرضمة الواقع تحت تكوين الرس (انظر شكل 6.2) (Rivers et al, 2019). تزداد سماكة تكوين الرس في المناطق المنخفضة من ناحية الجيولوجيا التركيبية، والعكس صحيح، وهذا نتيجة الهبوط وقت حدوث الترسيب (Eccleston, Pike & Harhash, 1981; Le blanc., 2017). هنالك العديد من السحنات الرسوبية في تكوين روس، بما في ذلك الطبقة التبخرية (انظر القسم 5.4) التي تشكلت في بيئة بحيرات ملحية محدودة الإتصال بالبحر. تم تقسيم فترة ترسيب تكوين الرس إلى مرحلتين زمنييتين، مع بيئات مختلفة في الجزء الشمالي والجنوبي من قطر. في المرحلة الأولى، كان الجزء الشمالي بحرياً ضحلاً، في حين كان الجزء الجنوبي مقيداً بحرياً/ساحلياً (Rivers et al., 2019). خلال هذا الوقت، تم تشكيل طبقة الجبس التبخرية لعضو تارينا (انظر القسم 5.3) في الجزء الجنوبي فقط من قطر. في الخطوة الزمنية الثانية، هيمنت بيئة واحدة على البلد بأكمله، وهي بيئة بحرية ضحلة؛ حيث ترسبت طبقة الحجر الجيري لعضو الخور (Rivers et al., 2019).

6.4 Middle Eocene

The Middle Eocene Epoch started 47.8 million years before the present, and it is the time when the Dammam Formation was deposited (see section 3.4). This Formation was deposited a few meters in deep water (Alsharhan & Nairn, 1997), with transgressive-regressive sequences (Al-Bloushi, 2016). As appears in Figure 6.3, the region was partially covered with shallow sea water and the remnants of the Tethys Sea were filling the area between the African Plate and the Eurasian Plate (Arabian Plate was part of the African Plate until 25 million years before present). The Dammam Formation was deposited in open shallow marine that changed between swamp and tidal flat environments (Al-Awadi et al., 1997; Al-Saad, 2005). Qatar was affected by fluctuating of open marine and karstification due to the uplift of the southern part of Qatar and lengthy exposure (Rivers & Kaczmarek, 2020; Rivers et al., 2019).

6.5 Oligocene

No sediments occurred in Qatar during the Oligocene Epoch, which extends from about 33.9 million to 23 million years before the present. During this period, sea level dropped (Figure 6.4) and the climate changed from a global warm to cooler climate (Fereydoun, 2009; Sadooni & Alsharhan, 2019). At the end of Eocene Epoch, sea transgression took place, and during the Oligocene the Qatar dome was uplifted (Dill et al., 2005), and the area was exposed. As a result, deposits from Oligocene are absent in Qatar (Mukhopadhyay et al., 1996). The period between Late Eocene and Early Oligocene marked the collision between Arabian Plate and the Eurasian Plate and shrinkage of the Tethys Sea (Kargaranbafghi & Neubauer, 2018).

4.6 الإيوسين الأوسط

بدأت فترة الإيوسين الأوسط 47.8 مليون سنة قبل الوقت الحاضر، وهو الوقت الذي تم فيه ترسيب تشكيل الدمام (انظر القسم 4.3). لقد ترسب هذا التكوين في مياه ضحلة يبلغ عمقها أمتاراً قليلة (Alsharhan & Nairn, 1997) مع حدوث تعاقب لتقدم وتراجع لمياه البحر (Alsharhan & Nairn, 1997). كما يظهر في شكل 6.3 فإن المنطقة كانت مغطاة جزئياً بمياه بحرية ضحلة؛ حيث كان الجزء المتبقي من بحر التيثيس يملأ المساحة ما بين الصفيحة الإفريقية وصفيحة لوراسيا (كانت الصفيحة العربية جزء من الصفيحة الإفريقية حتى ما قبل 25 مليون سنة). لقد تعاقبت بيئات مختلفة في وقت ترسيب تكوين الدمام في بيئة بحرية ضحلة تتغير ما بين بيئة المستنقعات إلى بيئة المد والجزر المسطحة (Al-Awadi et al., 1997; Al-Saad, 2005). تأثرت قطر بتذبذب البيئة البحرية المفتوحة والتحول الكارستي بسبب الرفع التكتوني للجزء الجنوبي لقطر مما كشف المنطقة لفترة طويلة (Rivers & Kaczmarek, 2020; Rivers et al., 2019).

5.6 الأوليغوسين

لا يوجد في قطر أي رسوبيات من عصر الأوليغوسين الذي امتد من حوالي 33.9 إلى 23 مليون سنة قبل الوقت الحاضر. لقد انخفض منسوب البحر خلال تلك الفترة (انظر شكل 6.4)؛ حيث تغير المناخ عالمياً من مرحلة الدفء إلى المناخ البارد (Fereydoun, 2009; Sadooni & Alsharhan, 2019). شهدت نهاية فترة الإيوسين امتداداً للبحر، وخلال فترة الأوليغوسين ارتفعت قبة قطر المحدبة تكتونياً (Dill et al., 2005) مما أدى إلى انكشاف المنطقة. نتيجة لذلك، فإن الرسوبيات من فترة الأوليغوسين غير موجودة في قطر (Mukhopadhyay et al., 1996). شهدت الفترة بين أواخر العصر الإيوسيني والأوليغوسين المبكر التصادم بين الصفيحة العربية والصفيحة الأوراسية وانكماش بحر التيثيس (Kargaranbafghi & Neubauer, 2018).

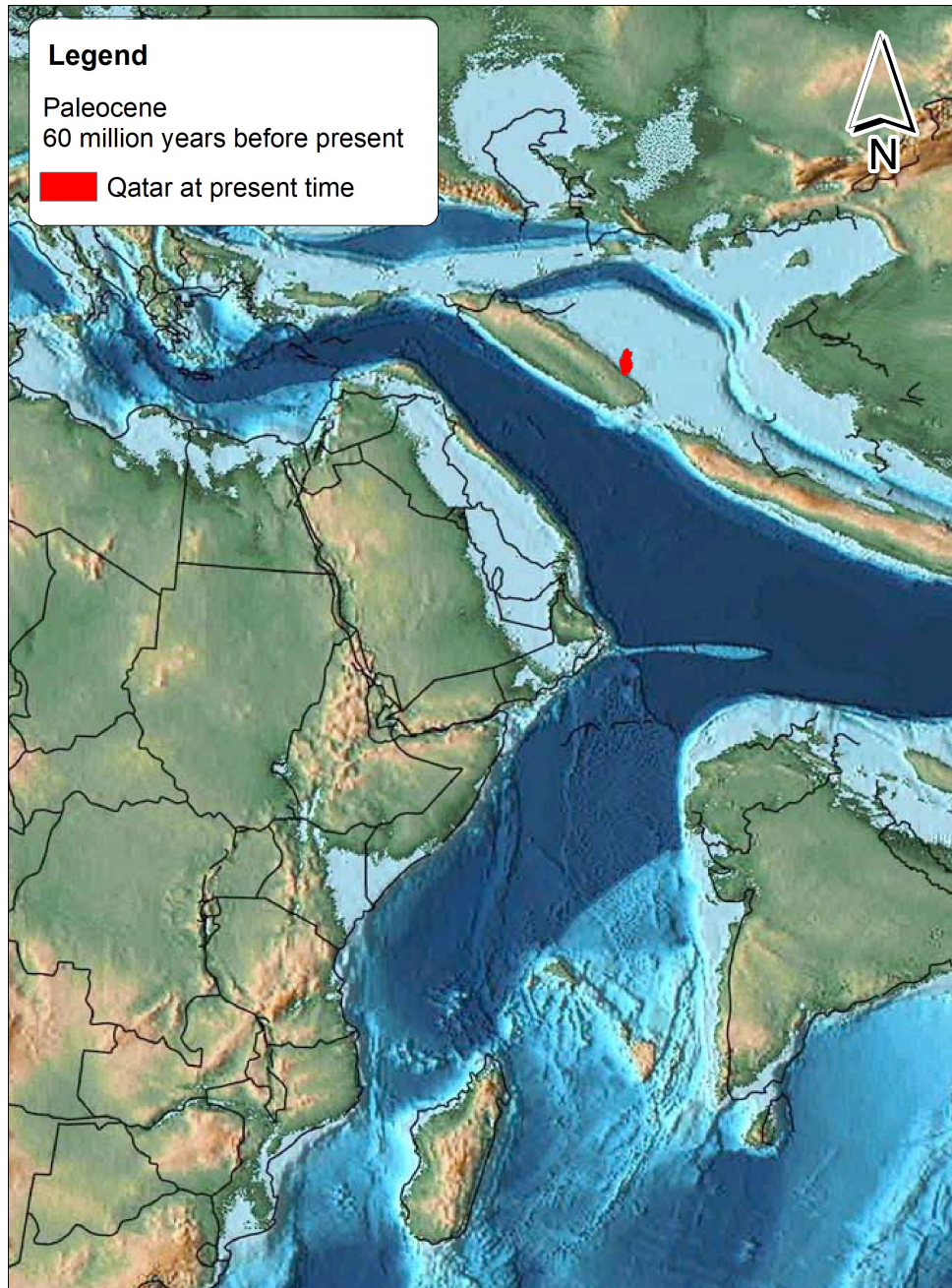


Figure 6.1: Regional map of Late Paleocene and the present location of Qatar
شكل 1.6: خريطة إقليمية في فترة الباليوسين المتأخر، ويظهر موقع قطر الحالي.

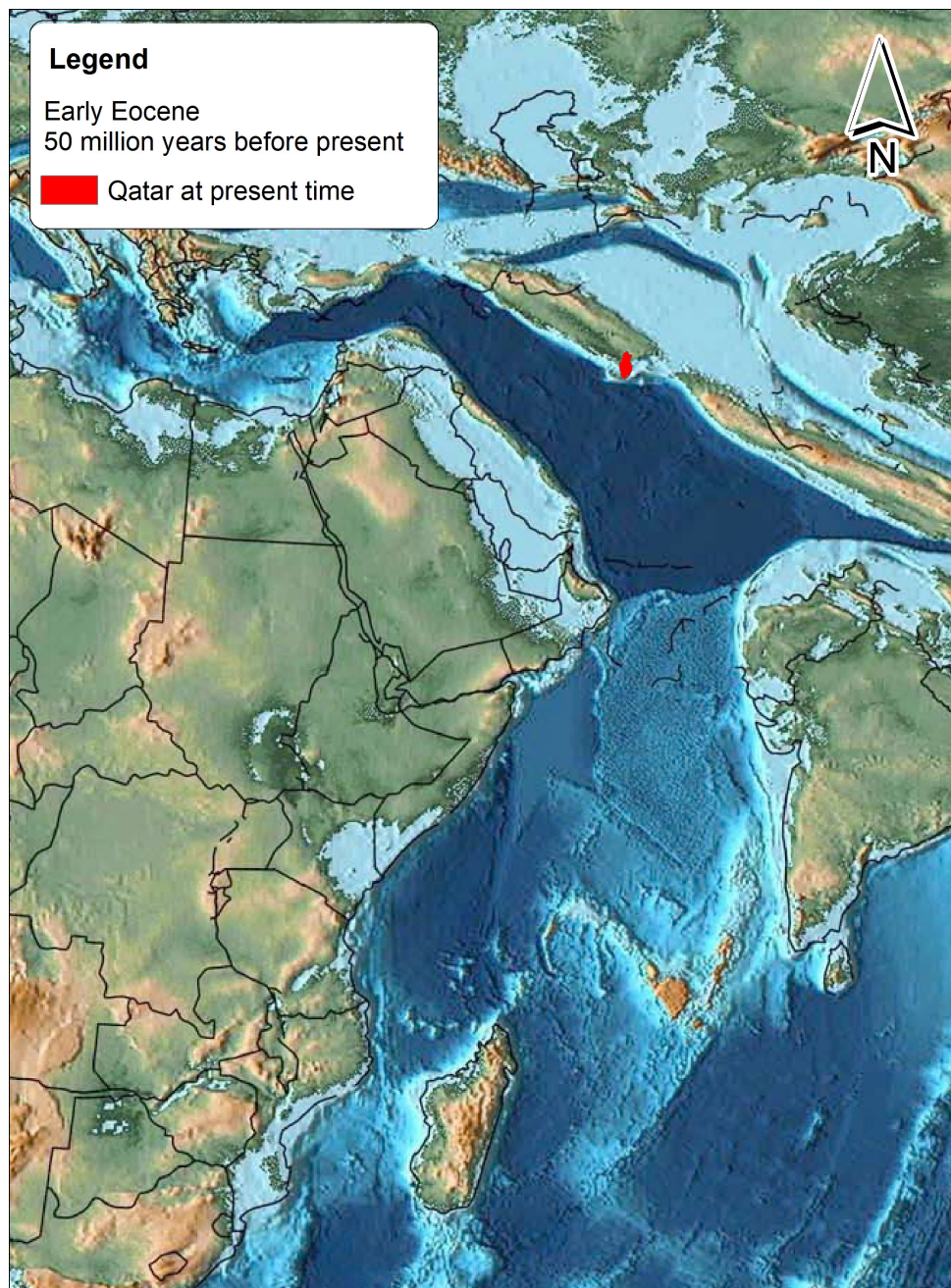


Figure 6.2: Regional map of Early Eocene and the present location of Qatar
شكل 1.6: خريطة إقليمية في فترة الإيوسين المبكر ويظهر موقع قطر الحالي.

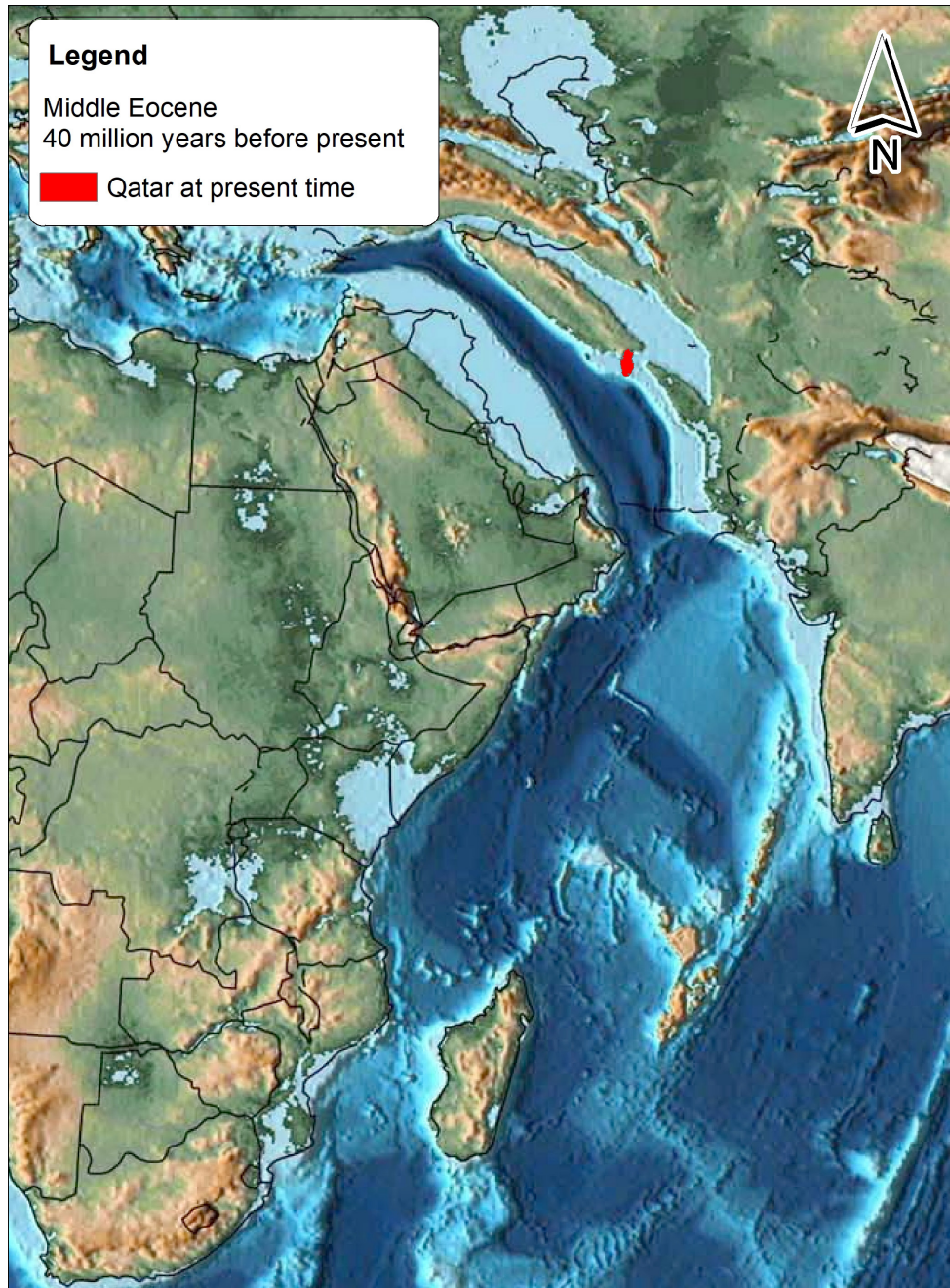


Figure 6.3: Regional paleomap of the Middle Eocene and the present location of Qatar
شكل 3.6: خريطة إقليمية في فترة الإيوسين الأوسط ويظهر موقع قطر الحالي.

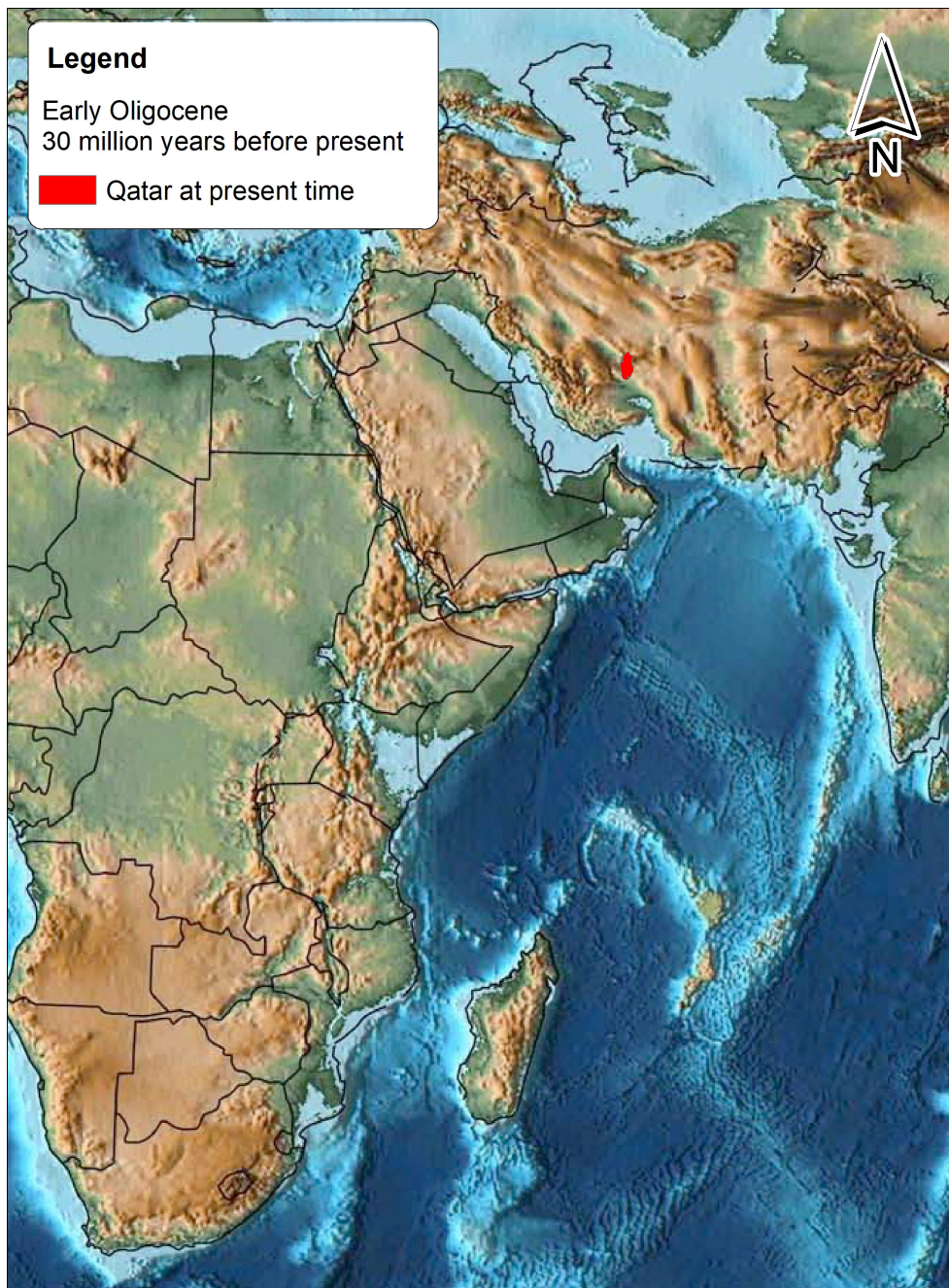


Figure 6.4: Regional paleomap of the Early Oligocene and the present location of Qatar
شكل 4.6: خريطة إقليمية في فترة الأوليغوسين المبكر، ويظهر موقع قطر الحالي.

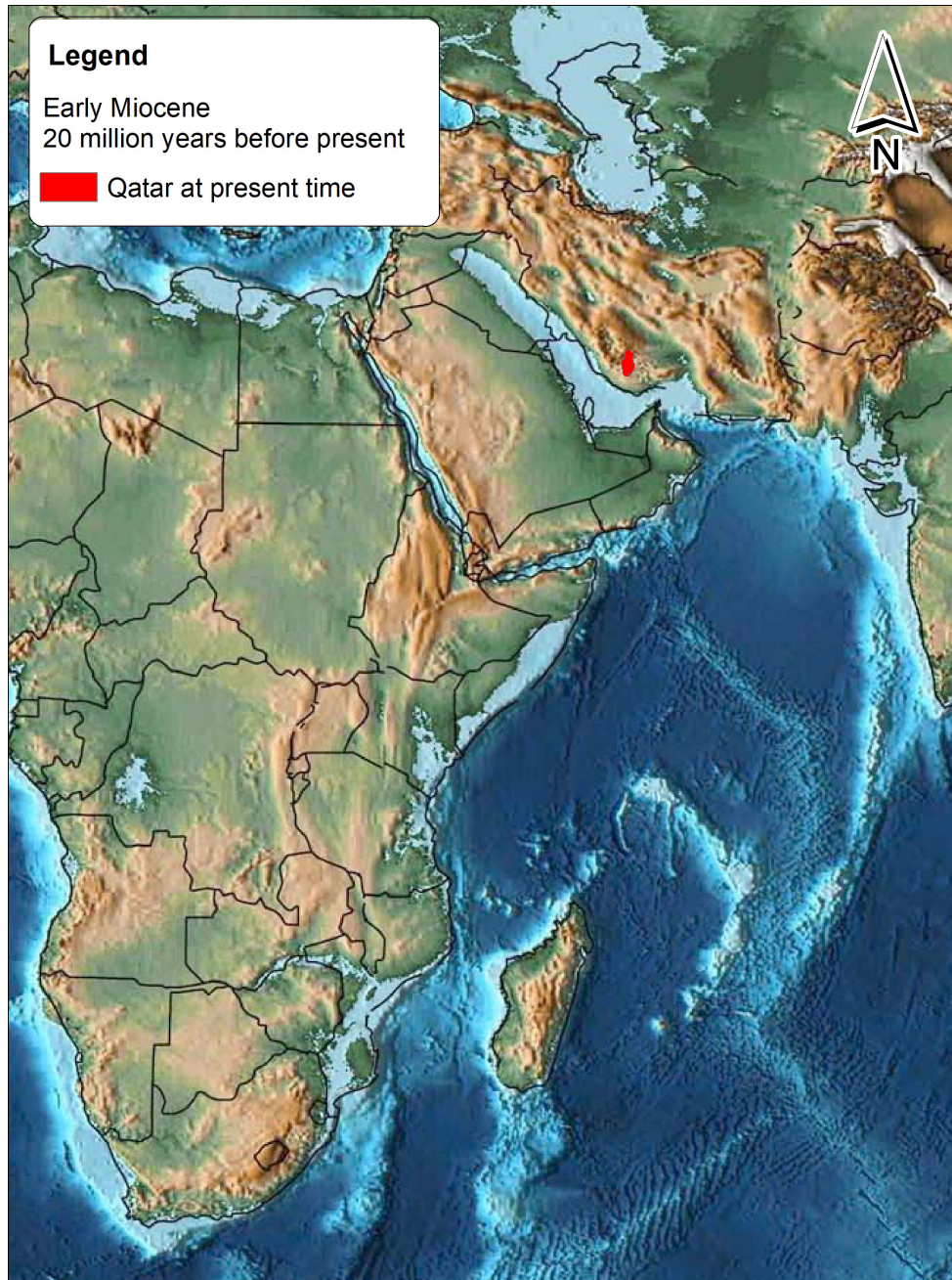


Figure 6.5: Regional paleomap of the Early Miocene and the present location of Qatar
شكل 5.6: خريطة إقليمية في فترة الميوسين المبكر ويظهر موقع قطر الحالي

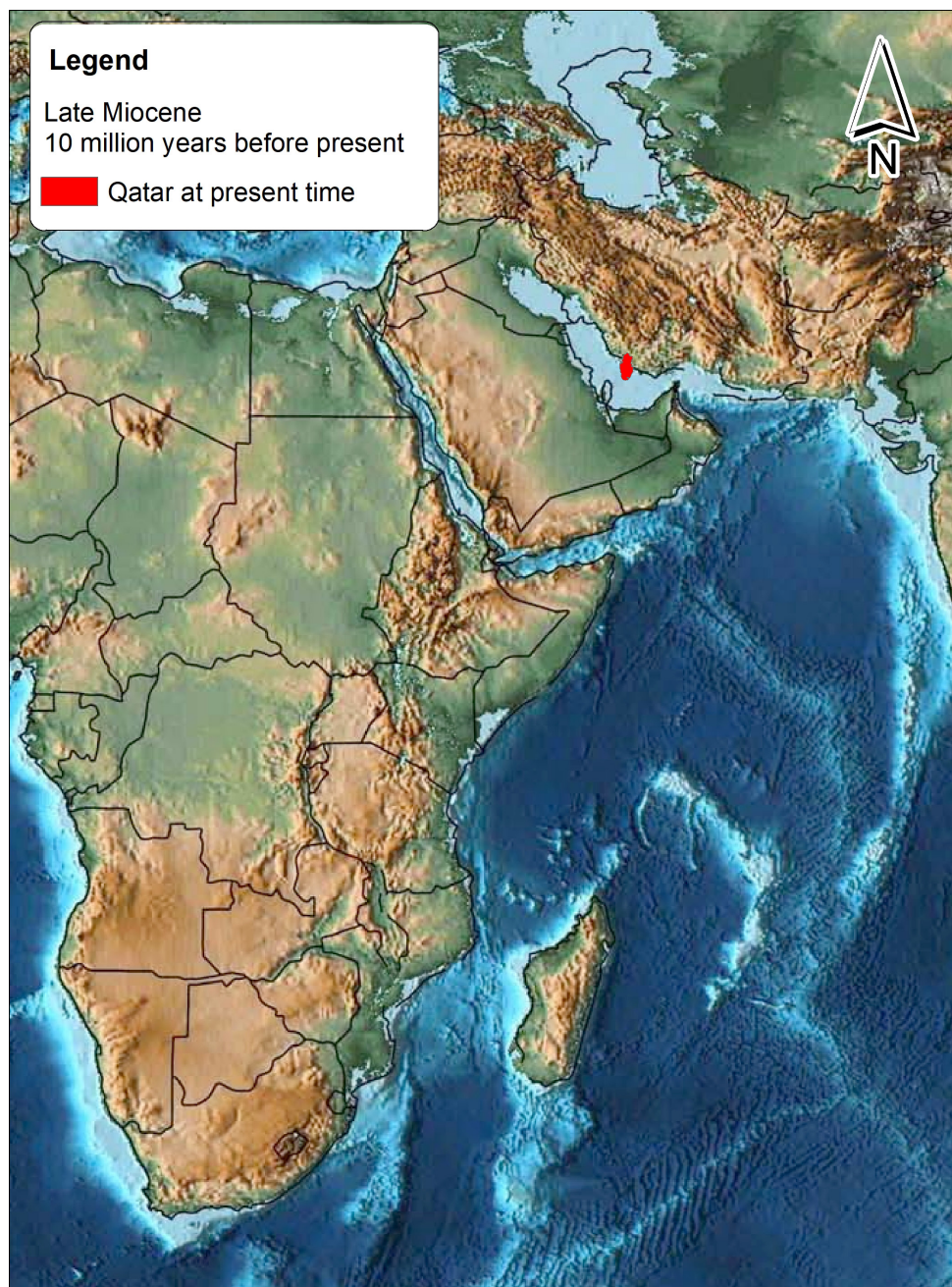


Figure 6.6: Regional paleomap of the Late Miocene and the present location of Qatar
شكل 6.6: خريطة إقليمية في فترة الميوسين المتأخر، ويظهر موقع قطر الحالي

A photograph of a dry, arid landscape. In the foreground, there is a low wall made of stacked, light-colored stones. To the left, a dirt path or road is visible, bordered by more stones. The background shows a sandy area with scattered, dry-looking bushes and trees under a clear sky. A dark, semi-circular overlay is positioned in the center of the image, containing text.

(7)
Human & Water
الإنسان والمياه

7.1 Man and Water in The Neolithic Period

Human settlements over history have been connected to sources of water. It is important to understand the evolution and occurrence of water resources, which enables us to understand the rise and ebb of various civilizations in any region. As in many places around the globe, the immigration and settlement in Qatar was affected by the climate, sea level, and the tectonic activities (Scott-Jackson et al., 2014).

The Holocene Highstand lasted between 7,500 and 3,000 years before the present (BP) (see section 5.2). The Neolithic Period in Qatar occurs approximately between 7,700 to 6,000 years BP. As such, this period occurs during the Holocene Highstand, where the weather conditions were optimal. Many archaeological sites and settlements from that period were discovered in Qatar. At the beginning of the Holocene (11,700 BP), sea level was around 49 meters lower than at present, which implies the groundwater level was deep, and not accessible by hand-dug wells. Between 7,500 and 6,000 BP, sea level rose to more than 2 meters above its present level, and Qatar's climate became more favourable for settlement (Engel et al., 2020). Carbon 14 (C^{14}) analysis showed the groundwater age varies between 5,050 and 23,350 years BP in various areas of Qatar [(Eccleston, Pike & Harhash, 1981), Table 9.1]. This means some areas received their recharge in the Holocene Optimal climate conditions. In addition, the high sea level caused the groundwater level to rise, and thus, water became easily accessible. In land depressions (see section 2.3), water level rose to near surface. At that time, groundwater was only a few meters below the land surface. The whole region became wetter due to monsoon rain movement to the northwards (see section 5.3). The population of Neolithic settlements increased in the period between 7000 to 6000 years BP. At some stage, there was a connection between settlements in Qatar and the Ubaid in Southern Mesopotamia, as some pottery discovered in Qatar belongs to Ubaid (Macumber, 2011). The population of the

1.7 الإنسان والمياه في العصر الحجري

لقد تأثر الاستيطان البشري عبر التاريخ بمصادر المياه. من المهم معرفة وفهم تواجد وتطور موارد المياه، مما يتيح فهم صعود وانحسار الحضارات المختلفة في أي منطقة. وكما في الكثير من المناطق حول العالم فقد تأثرت عمليات الهجرة والاستيطان في قطر بالمناخ ومستوى البحر والأنشطة التكتونية (Scott-Jackson et al., 2014).

إن الفترة ما بين 7,500 و3,000 سنة قبل الوقت الحاضر هي الفترة التي بلغ فيها مستوى سطح البحر أقصاه خلال الهولوسين (انظر القسم 2.5)، بينما امتد العصر الحجري في قطر في الفترة ما بين 7,700 و6,000 سنة قبل الوقت الحاضر. إذن فإن فترة العصر الحجري وقعت في الغالب خلال فترة الحد الأقصى لارتفاع البحر في عصر الهولوسين؛ حيث كان المناخ في قطر هو الأفضل، وقد تم اكتشاف العديد من المواقع والمستوطنات الأثرية التي تعود لتلك الفترة.

في بداية فترة الهولوسين (11,700 سنة قبل الآن)، كان مستوى سطح البحر أقل بنحو 49 م مما هو عليه الآن، مما يعني أن مستوى المياه الجوفية كان عميقاً ولا يمكن الوصول إليه بواسطة الآبار المحفورة يدوياً. بين العام 7,500 و3,000 قبل الآن ارتفع مستوى سطح البحر إلى أكثر من مترين فوق مستواه الحالي، وأصبح مناخ قطر أكثر ملاءمة للاستيطان (Engel et al., 2020). أظهر تحليل نظير الكربون 14 أن عمر المياه الجوفية في قطر يتراوح ما بين 5050 سنة إلى حوالي 23350 سنة قبل الوقت الحاضر في العديد من المناطق في قطر (Eccleston, Pike & Harhash, 1981)، والجدول 9.1. هذا يعني أن العديد من تغذية المياه الجوفية في العديد من المناطق حصلت خلال المناخ الجيد خلال عصر الهولوسين. إضافة إلى ذلك فقد تسبب ارتفاع مستوى سطح البحر في ارتفاع مستوى المياه الجوفية، وبالتالي أصبح من السهل الوصول إلى المياه، وخصوصاً في المنخفضات الأرضية (الروض – انظر القسم 3.2)؛ حيث ارتفع مستوى المياه إلى ما يقرب من سطح الأرض. وأصبحت المنطقة بأكملها ماطرة بسبب حركة الأمطار الموسمية إلى الشمال (راجع 3.5). لقد ازداد عدد سكان المستوطنات من العصر الحجري الحديث في الفترة ما بين 7700 إلى 6000 سنة قبل الوقت الحاضر. وفي مرحلة ما، كان هناك ارتباط بين المستوطنات في قطر والعبيد في جنوب بلاد ما بين الرافدين (التسمية نسبة إلى تل العبيد في جنوب العراق)؛ حيث

Gulf region and Mesopotamia started to decline 4000 years ago, as climate conditions changed and the arid conditions prevailed (Parker & Goudie, 2008).

There are many sites that belong to Neolithic period in Qatar, but the main ones are: Wādī ebay'ān, Al Khor Island (also known as Purple Island or Bin Ghannamm Island), Ras Abaruq, Al Shagra, Aceila, and Al-Da'asa, Al-Wusail (Cuttler, Tetlow & al-Naimi, 2011; MOFA, 2000; OBG, 2014; Potter, 2009). Some sites revealed pottery from Ubaid period (originating from Mesopotamia between 8,000 and 6,000 years BP). The most important sites referring to that period are Ras Abaruq and Al-Da'asa, and Al Khor Island (Muhsen & Al Naimi, 2014; Rice, 1949; Zamora, Cuttler & al-Naimi, 2015).

Figure 7.1 shows the locations of the main coastal settlements in Qatar during the Neolithic period, and the sea level during the Holocene Highstand. It is clear all of these settlements were located along the old shoreline (shoreline during the Holocene Highstand), which was more than 2 meters above its current level. The groundwater levels are shallow at the coastal areas, and easily accessible. These settlements would have an easy access to water supply manually, at the time when pumps and drilling rigs were non-existent.

تم اكتشاف بعض الفخار في قطر ينتمي إلى حضارة العبيد (Macumber, 2011). بدأ انحسار تلك الحضارة حوالي 3000 عام قبل الآن؛ حيث أصبح المناخ قاحلاً. بدأ عدد سكان منطقة الخليج وبلاد الرافدين يقل منذ 4000 عام؛ حيث تغيرت الظروف المناخية وسادت الظروف الجافة (Parker & Goudie, 2008).

تم اكتشاف العديد من المواقع الأثرية في قطر والتي تنتمي إلى العصر الحجري، وأهمها: وادي ضبيان، جزيرة الخور (المعروفة أيضاً باسم جزيرة بن غنام)، رأس أبروق، الشقرة، عسيلة، الدعسة، والوسيل (Cuttler, Tetlow & al-Naimi, 2011; MOFA, 2000; OBG, 2014; Potter, 2009). كما تم اكتشاف بعض الأواني الفخارية التي تعود للعبيد في بلاد الرافدين في الفترة ما بين 8000 و6000 سنة قبل الآن. أهم المواقع التي أشارت إلى تلك الفترة هي رأس أبروق والدعسة وجزيرة الخور «جزيرة بن غنام» (Muhsen & Al Naimi, 2014; Rice, 1949; Zamora, Cuttler & al-Naimi, 2015).

يبين الشكل 7.1 المواقع الأثرية الساحلية الرئيسية في قطر والتي تعود للعصر الحجري، كما يبين الشكل أيضاً منسوب سطح البحر في تلك الفترة (فترة الحد الأقصى لمنسوب البحر خلال الهولوسين). من الواضح أن جميع تلك المستوطنات تقع على امتداد سواحل قطر في تلك الفترة؛ حيث كان المنسوب أعلى بكثير من مترين مما هو عليه الآن. من المعروف أن المياه الجوفية ضحلة في المناطق الساحلية، وبذلك كان من السهل لتلك المستوطنات الوصول لمصادر المياه يدوياً في وقت لم تكن الحفارات ومضخات المياه موجودة.

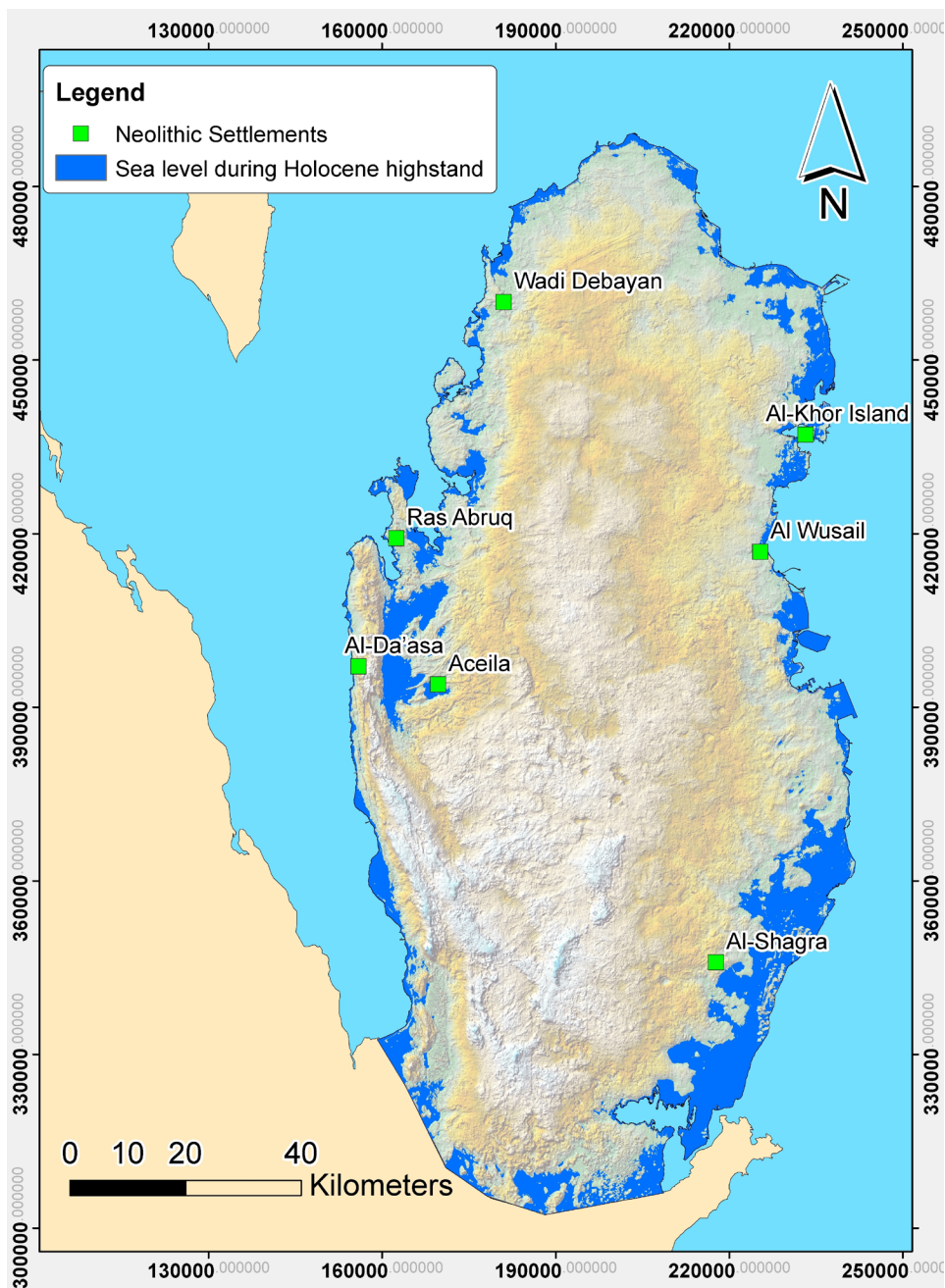


Figure 7.1: Coastal settlements in Qatar and Holocene Highstand (8,000-2,000 years BP)
 شكل 1.7: مواقع المستوطنات الساحلية في قطر ومستوى سطح البحر الأعلى خلال فترة الهولوسين. (8000 إلى 2000 سنة قبل الآن).

7.2 Man and Water in the Abbasid Period

When Abbasid Caliphate was established (750 AD), they moved the Capital from Damascus to Baghdad. As such, the Arabian Gulf gained a great importance as a trading route between the new capital and India and far East. Also, the demand for pearls increased in this period, which benefited pearl industry in the region. Several settlements were established in Qatar in that period. As water is essential for living, it is no wonder that these settlements were located in water-rich and readily available zones (Mcphillips, Rosendahl & Morgan, 2015). Archaeological excavations revealed a cluster of settlements along the northern shore of Qatar dated back to (750-1253AD) (UNESCO, 2014). As shown in Figure 7.2, these settlements are (clockwise from west to east): Al-Haddiyah, Murwab, Mussaykah, Makin, Rakiyat, and Umm Al Kilab (Macumber, 2015). Murwab settlement contains 220 houses, two forts and two mosques (Guérin & Al-Naimi, 2010; Muhesen & Al Naimi, 2014) as it was occupied for once century at least (Guérin & Al-Na'imi, 2010). These settlements were roughly aligned with Makkah, and located in land depressions (rowdas) so access to water is easy. Figure 7.2 shows the depth to groundwater in the settlements area, based on 1958 data, which roughly represented the natural pre-development conditions of groundwater. All these settlements occur in areas where depth to water is less than 20 meters, so it was possible to access water using hand-dug wells.

2.7 الانسان والمياه في العصر العباسي

عند إقامة الخلافة العباسية عام 750م تم نقل عاصمة الخلافة من دمشق إلى بغداد، الأمر الذي كان له تأثير بارز على مكانة الخليج العربي كممر للتجارة بين دولة الخلافة في بغداد وبين الهند والشرق، وقد ازداد الطلب على اللؤلؤ، الأمر الذي كان له أثر إيجابي على منطقة الخليج وقطر، فقد أقيمت العديد من المستوطنات في قطر في تلك الفترة. كما هو معلوم أن تواجد المياه مهم وضروري للحياة فقد أقيمت تلك المستوطنات في مناطق غنية بالمياه سهلة الوصول (Mcphillips, Rosendahl & Morgan, 2015). لقد كشفت الحفريات الأثرية تجمعا لتلك المستوطنات في شمال قطر يعود تاريخها إلى العصر العباسي -750-1253م (UNESCO, 2014). يبين شكل 7.2 مواقع تلك المستوطنات وهي (من الغرب للشرق باتجاه عقارب الساعة): الهداية، مروب، مسيكة، مكين، الركيات، وأم الكلاب (Macumber, 2015). يحتوي موقع مروب على 220 مسكن وقلعتين ومسجدين (Guérin & Al-Naimi, 2010; Muhesen & Al Naimi, 2014)؛ حيث ازدهرت مروب لقرن من الزمن على الأقل (Guérin & Al-Na'imi, 2010)، واتجاه تلك المستوطنات تقريبا صوب مكة، وتقع في مناطق المنخفضات (الروض)؛ حيث من السهل الوصول للمياه الجوفية. يبين شكل 7.2 العمق للمياه الجوفية في مناطق تلك المستوطنات بناء على بيانات عام 1958 التي يمكن اعتبارها تمثل الوضع الطبيعي للمياه. من الواضح أن جميع تلك المستوطنات تقع في مناطق عمق المياه الجوفية فيها أقل من عشرينم، وبالتالي يمكن الوصول للمياه الجوفية بواسطة آبار محفورة يدويا.

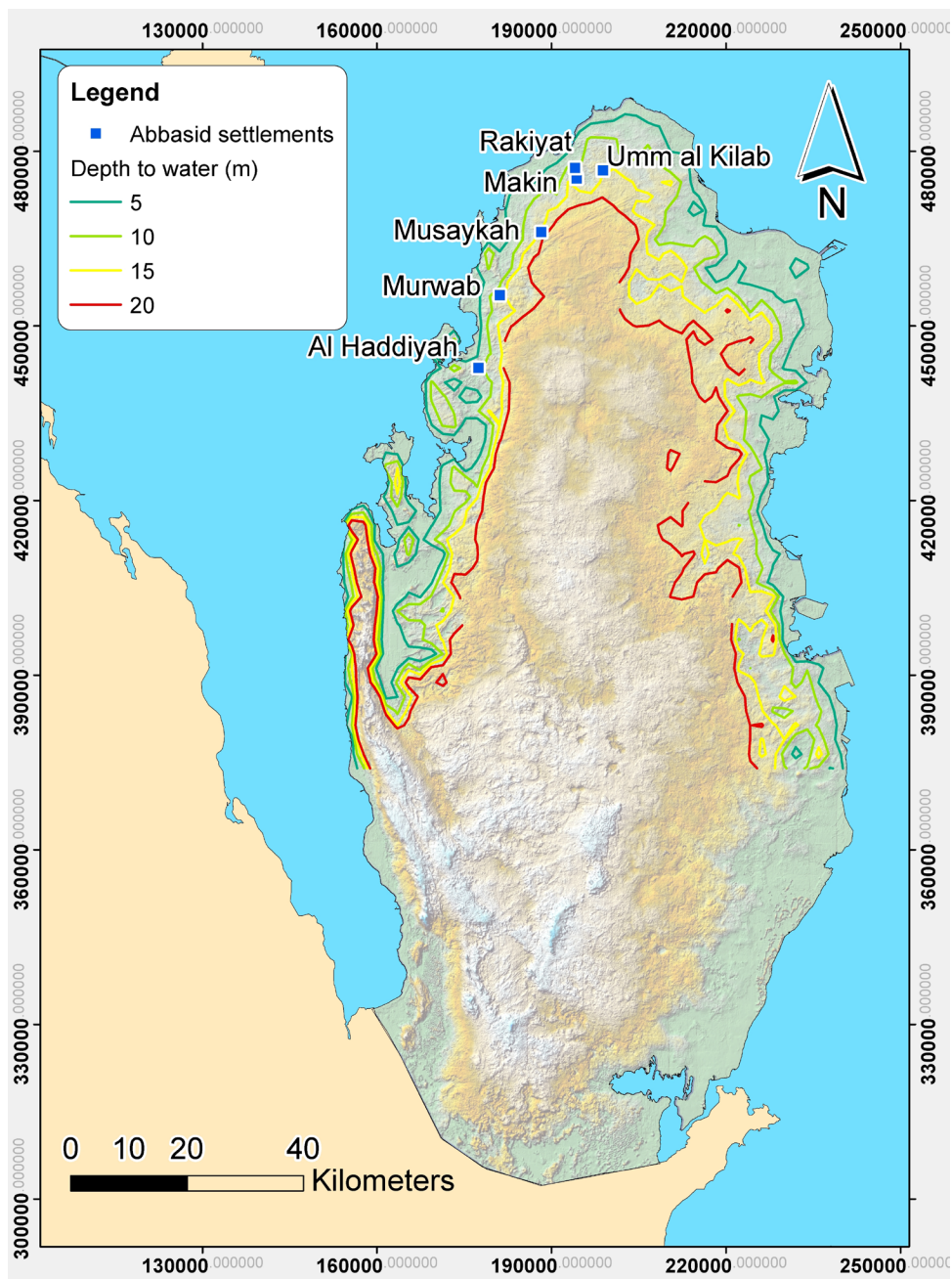


Figure 7.2: Abbasid settlements in Qatar (750-1253) and depth to groundwater in meters
 شكل 2.7: مواقع المستوطنات في العصر العباسي في قطر (750 م إلى 1253م) وأعماق المياه الجوفية بالمتر.

7.3 Man and Water (1500-1900 AD)

The period between 1500 and 1900 AD witnessed establishment of many villages, towns and forts in Qatar, as is evident in many archaeological sites discovered in Qatar (de Cardi, 1973-1974; MOFA, 2000; Højlund, 2017; Macumber, 2011; Potter, 2009; Rees, Richter & Walmsley, 2011; Baalousha, 2016a). The coastal sites (from west to east clockwise) are: Al Murair Castle, Al Zubara, Freiha, Al Arish, Al Khuwayr, Ruwayda, Al Jumail, Al Yosfiya Castle, Al Ruwais, Al Mafjar, Al Ghariya, Fuwayrit and Al Huwaila. Further inland sites are Ath Thaqab, and Al Athbah. All the settlements evolved around water resources, trading and fishing. It is no wonder that most sites are located on coastal areas, where groundwater is shallow (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). The most prominent settlement and a world heritage UNESCO site is Al Zubarah. Al Zubarah was established in 18th century, and was the center for trade, pearl diving, commercial and political events, until the nineteenth century when it was deserted. It is located on the north-western coast of Qatar, as shown in Figure 7.3, on inter-tidal zone between the sea in the west and the sabkha in the east. During the Holocene Highstand (see section 5.2), the area where Al Zubara is, was covered with the sea. After the sea retreated, the inter-tidal area was exposed between the salt flats (sabkha) in the east and the sea in the west (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). This is probably why it got its name, as Al Zubarah in Arabic means 'mounds of sand.' A nearby castle called Al Murair, about 1.6 kms away from Al Zubarah, was built to protect the groundwater wells that used to supply Al Zubarah with fresh water (Rees, Richter & Walmsley, 2011). The wells are hand-dug, located beyond the sabkha and have a depth of 2.4 meters, where they used to skim fresh groundwater (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). The town was destroyed in 1811 and completely abandoned in early twentieth century due to lack of fresh water supply (Gillespie & Al-Naimi, 2013). The township of Al Bidaa on the eastern coast grew to take its place (The capital Doha at present).

3.7 الإنسان والمياه (1500-1900م)

شهدت الفترة ما بين 1500 و1900م إنشاء العديد من القرى والبلدات والقلاع في قطر، كما هو واضح في العديد من المواقع الأثرية المكتشفة (de Cardi, 1973-1974; MOFA, 2000; Højlund, 2017; Macumber, 2011; Potter, 2009; Rees, Richter & Walmsley, 2011; Baalousha, 2016b). المواقع الأثرية الساحلية (من الغرب إلى الشرق في اتجاه عقارب الساعة) هي: قلعة الميرير، الزبارة، فريحة، العريش، الخوير، الرويضة، الجميل، قلعة اليوسفية، الرويس، المفجر، الغارية، فويرط، الحويلة، أما المواقع الداخلية فهي الثغب والعذبة. لقد تطورت وازدهرت جميع المستوطنات حول موارد المياه، وعمل أهلها بالتجارة وصيد الأسماك واللؤلؤ، ولذا ليس من المستغرب أن معظم المواقع في تلك الفترة كانت في المناطق الساحلية؛ حيث المياه الجوفية ضحلة (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). الزبارة هو الموقع الأبرز والمسجل على لائحة التراث العالمي لليونسكو، وتقع الزبارة على الساحل الشمالي الغربي لقطر، كما هو مبين في الشكل 7.3، في منطقة المد والجزر بين البحر في الغرب والسيخة في الشرق. أسست الزبارة في القرن الثامن عشر، وكانت مركزاً للتجارة والغوص على اللؤلؤ والأحداث التجارية والسياسية حتى القرن التاسع عشر عندما أصبحت مهجورة. كانت المنطقة التي تقع فيها الزبارة مغطاة بالبحر خلال الحد الأعلى لمنسوب البحر في فترة الهولوسين (راجع 2.5)، وانكشفت تلك المنطقة بعد انخفاض منسوب البحر بين المسطحات الملحية (السيخة) في الشرق والبحر إلى الغرب (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). ربما يكون هذا هو سبب تسميتها؛ حيث تعني الزبارة بالعربية تلال من الرمال. تم بناء قلعة قريبة تسمى الميرير، على بعد حوالي 1.6 كم من الزبارة، لحماية آبار المياه الجوفية التي كانت تستخدم لتزويد الزبارة بالمياه العذبة (Rees, Richter & Walmsley, 2011). الآبار محفورة يدوياً، وتقع خلف السيخة على عمق 2.4 متر؛ حيث كان يتم جمع الماء العذب من فوق المياه المالحة (Walmsley, Barnes & Macumber, 2010). دمرت البلدة عام 1811 وهجرها أهلها بالكامل في أوائل القرن العشرين بسبب نقص إمدادات المياه العذبة (Gillespie & Al-Naimi, 2013). فيما نمت بلدة البدع على الساحل الشرقي لتأخذ مكانة الزبارة

The inland towns Al Athbah and Ath Thaqab used to supply the nearby coastal towns, which have no water resources, with fresh groundwater (McPhillips et al., 2012). Al Athbah means 'fresh water' in Arabic, which indicates the existence of fresh groundwater there. Ath Thaqab contains a hand-dug well, which is around 10 meters deep, with fresh groundwater. It was used to supply the nearby Al Khuwayr village with water (Lorimer, 1908).

Some settlements were established in the 16th century such as Al Huwaila. The latter was one of the oldest townships in Qatar, post Abbasid era, long before Al Zubarah was established (Fromherz, 2012). These coastal settlements were abandoned due to deterioration of the fresh groundwater, which occurs as lenses on the top of brackish and saline groundwater (Macumber, 2015; Macumber, 2011). Al Ghariya was founded in 1885 and its name means 'the area with caves' in Arabic, probably due to karst hydrogeology in the area. Fuwayrit is a nearby small settlement where it is located very close to the sea. Both Al Ghariya and Fuwayrit used to get their water from the nearby Al Athbah (McPhillips et al., 2012).

(أصبحت فيما بعد الدوحة عاصمة قطر في الوقت الحاضر).

كانت البلدات الداخلية (التي لا تقع على الساحل مباشرة) وهي العذبة والثغب تزود البلدات الساحلية القريبة منها والتي لا يتوفر فيها الماء العذب بالمياه الجوفية العذبة (McPhillips et al., 2012)، وترجع التسمية «العذبة» نسبة لوجود المياه الجوفية العذبة في المنطقة. أما بلدة الثغب فهي تحتوي على بئر محفورة يدويًا بعمق حوالي 10 أمتار ويحتوي على مياه جوفية عذبة، وقد تم استخدامه لتزويد بلدة الخوير المجاورة بالمياه (Lorimer, 1908).

تم إنشاء بعض البلدات في القرن السادس عشر مثل الحويلة، التي كانت واحدة من أقدم البلدات في قطر بعد العصر العباسي، وقبل فترة طويلة من تأسيس الزبارة (Fromherz, 2012). تم التخلي عن هذه المستوطنات الساحلية لاحقًا بسبب تدهور المياه الجوفية العذبة التي تتواجد على شكل طبقات تطفو فوق المياه الجوفية المالحة (Macumber, 2011; Macumber, 2015). تأسست الغارية عام 1885 ويعني اسمها بالعربية المنطقة التي بها كهوف، ربما بسبب جيولوجيا المنطقة، أما فويرط فهي مستوطنة صغيرة تقع بالقرب من البحر. اعتاد كل من الغارية وفويرط الحصول على مياههما من منطقة العذبة القريبة (McPhillips et al., 2012).

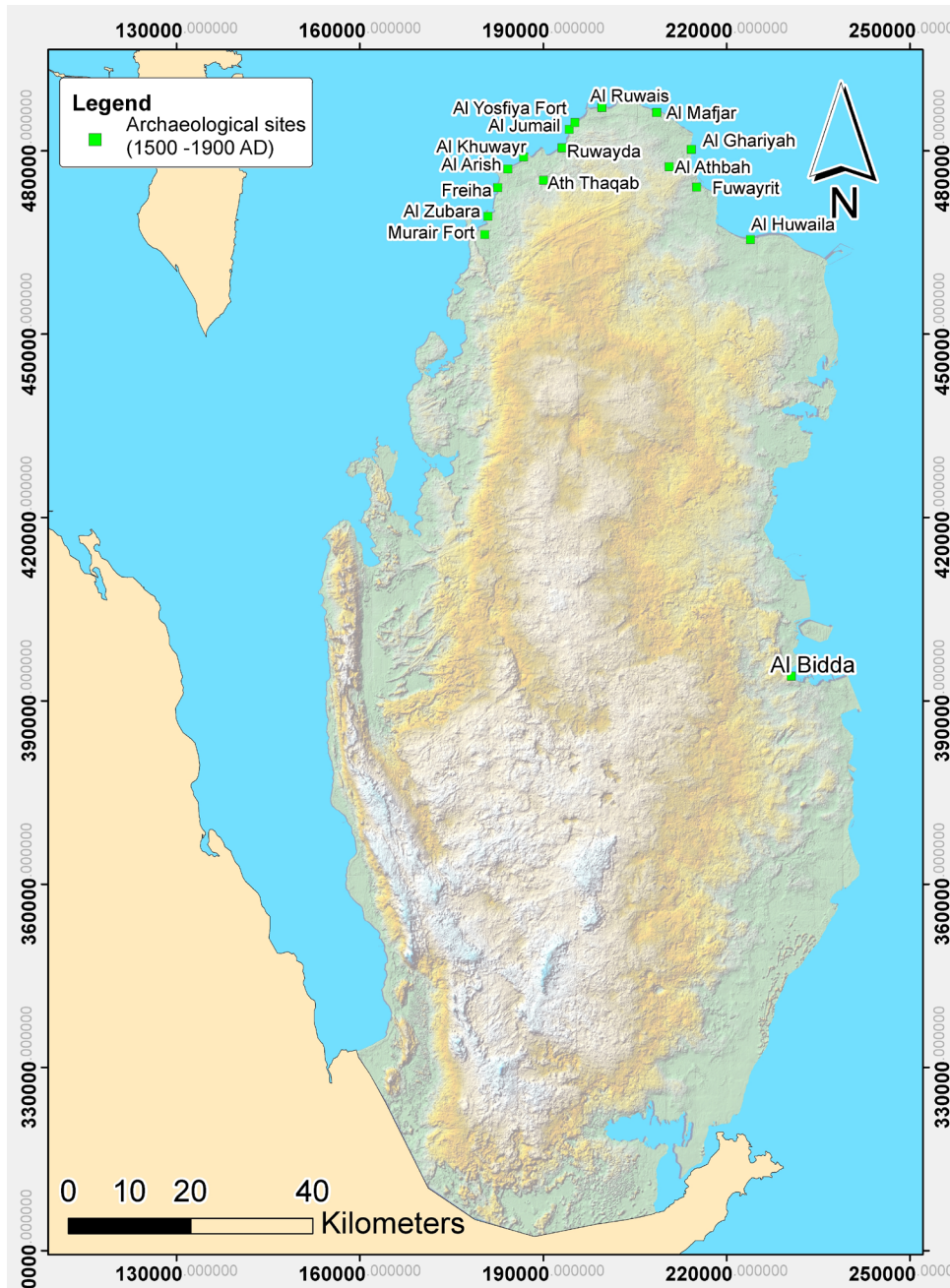


Figure 7.3: Main coastal archaeological sites in Qatar between 1500-1900 AD
 شكل 3.7: المواقع الأثرية الساحلية الرئيسية في قطر في الفترة بين 1500 إلى 1900م.

7.4 Pearl Diving around Qatar

The pearls of the Arabian Gulf have been known for more than 5,000 years, since the time of the Sumerians (Rice, 1949). The ancient Mesopotamian mythology *Epic of Gilgamesh* was written about the king of Uruk and his expedition to the Arabian Gulf for the search of immortality plant, which is the pearl in the seabed (Donkin, 1998). Pearl diving was the main source of economy for Qatari people until the discovery of oil in 1939, where divers changed to work in oil industry. In addition, the development of the 'Japanese cultured pearls' adversely affected the pearl diving, and made it less rewarding.

The pearls of the Arabian Gulf are renowned for their 'special magic', and 'it is the best in the world.' The reason is the unique natural conditions and habitat for the oysters in the shallow banks of the Gulf. Figure 7.4 shows the locations of diving spots around Qatar (Carter, 2005; Fekri, 2017). Plenty of submarine spring used to flow in the shallow seabed, when stress on water resources was much less than it is at present. Only a few of them are still flowing (see section 4.4). The submarine springs are vital for marine habitat, as they bring nutrients to the sea (Moosdorf & Oehler, 2017). The most valuable pearls used to be found around these springs (Rausch et al., 2014). Unfortunately the pollution and exploitation of natural resources had an adverse impact on the habitat of the best pearls in the world.

4.7 مغاصات اللؤلؤ حول قطر

عُرف لؤلؤ الخليج العربي والغوص بحثًا عنه منذ أكثر من 5000 عام، إبان زمن السومريين (Rice, 1949)؛ حيث كتبت أساطير بلاد ما بين النهرين القديمة «ملحمة جلجامش» عن ملك أوروك ورحلته إلى الخليج العربي للبحث عن نبتة الخلود، التي هي اللؤلؤة في قاع الخليج العربي (Donkin, 1998). كان الغوص بحثًا عن اللؤلؤ المصدر الرئيسي للاقتصاد للقطريين حتى اكتشاف النفط عام 1939، مما صرف العاملين في هذا المجال للعمل في صناعة النفط، كما أثر تطوير اللؤلؤ الياباني الصناعي سلبيًا وجعل مهنة صيد اللؤلؤ في الخليج غير مجدية.

وتشتهر لآلئ الخليج العربي بسحرها الخاص، وهي الأفضل في العالم، ويرجع ذلك إلى الظروف الطبيعية الفريدة وموطن المحار في مياه الخليج الضحلة. يوضح الشكل 7.4 مواقع أماكن الغوص حول قطر (Carter, 2005; Fekri, 2017). كان الكثير من ينابيع المياه العذبة تتدفق في قاع البحر الضحل؛ حيث كان أثر الإنسان على موارد المياه أقل بكثير مما هي عليه في الوقت الحاضر، ولا يزال عدد قليل من تلك الينابيع فقط تتدفق في الوقت الحاضر (راجع 4.4). تعتبر الينابيع البحرية حيوية للحياة البحرية؛ حيث إنها تجلب المغذيات إلى البحر (Moosdorf & Oehler, 2017). إن أفضل اللآلئ وأكثرها قيمة في تلك المتواجدة حول الينابيع البحرية (Rausch et al., 2014). للأسف فإن عوامل التلوث واستنزاف موارد الطبيعة قد أثرا سلبيًا على البيئة، ومن ضمنها موطن أفضل أنواع اللؤلؤ الطبيعي في العالم.

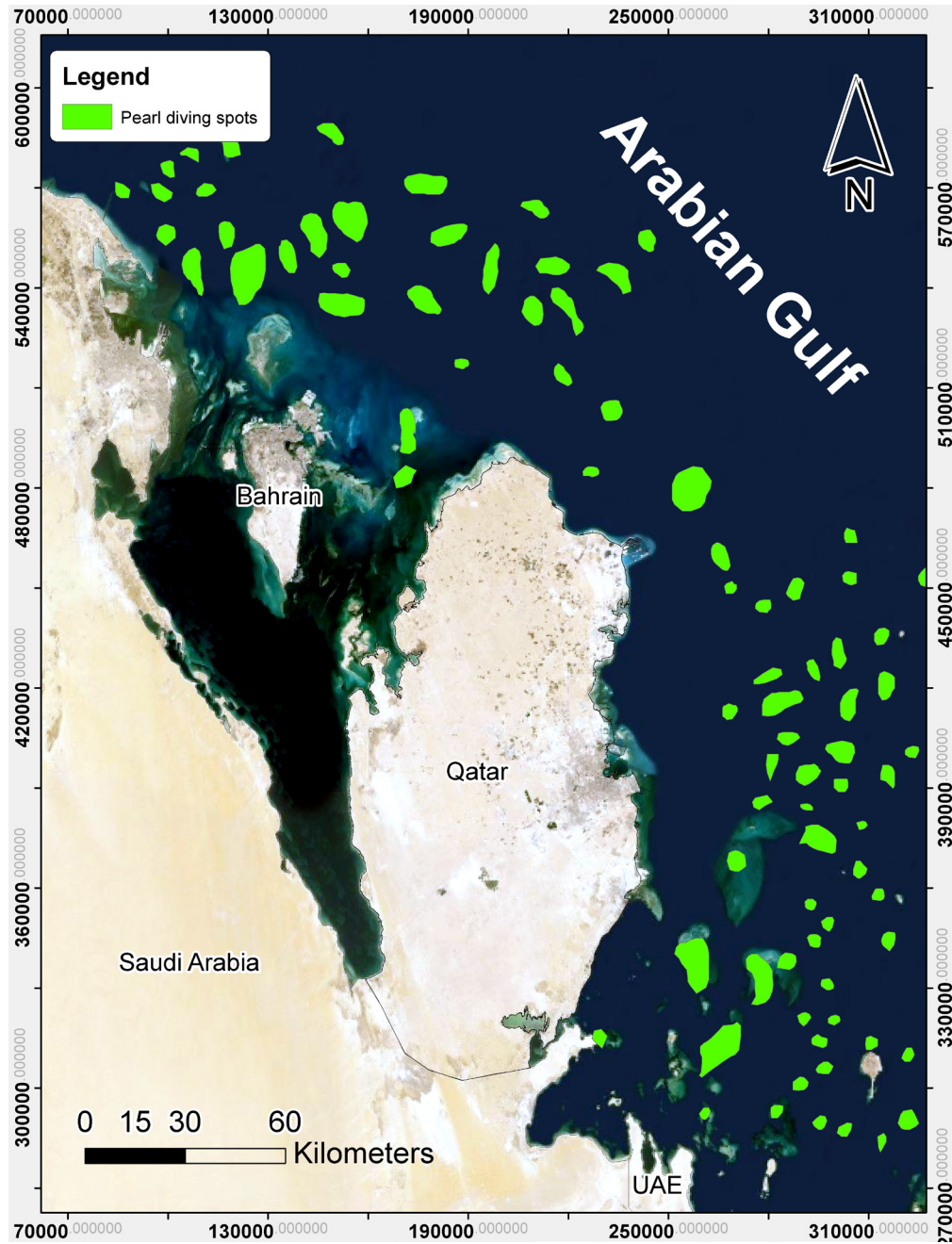


Figure 7.4: Pearl diving spots around Qatar

شكل 4.7: مغاصات اللؤلؤ حول قطر



Ruins of Al Mafjar village
أطلال قرية المفجر

Al Mafjar village is one of many settlements in northern Qatar that survived on pearl diving. This village, along with many others (shown in Figure 7.4) was prosperous until the beginning of the 20th century. Easy access to groundwater and the sea enabled the flourishing of these villages. Remnants of some of those villages are still available

قرية المفجر هي إحدى المستوطنات العديدة في شمال قطر التي كانت تعيش على الغوص بحثاً عن اللؤلؤ. كانت هذه القرية، إلى جانب العديد من القرى الأخرى (الموضحة في الشكل 7.4)، مزدهرة حتى بداية القرن العشرين. وقد أتاح الوصول السهل إلى المياه الجوفية والبحر ازدهار هذه القرى التي يمكن مشاهدة بقايا بعضها في الوقت الحالي.

References

- Adrian, G. P., & Andrew S. Goudie. Geomorphological and palaeoenvironmental investigations in the southeastern Arabian Gulf region and the implication for the archaeology of the region. In: *Geomorphology* 101(3). Geoarchaeology and Geomorphology: Soils, Sediments, and Societies, pp. 458–470. ISSN: 0169-555X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.028>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X08000676>.
- Al Baida Technical Services. *Drilling of four deep wells (Aruma Formation) project south west Qatar* [Technical Report]. Ministry of Municipal Affairs and Agriculture (MMAA), 2004, p. 84.
- Al Kaabi, M., Zhao, J., & Ghedira, H. (2016). MODIS-Based Mapping of Secchi Disk Depth Using a Qualitative Algorithm in the Shallow Arabian Gulf?. *Remote Sens.* 2016, 8(5), 423 ISSN: 2072-4292. doi: 10.3390/rs8050423. url: <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/5/423> (visited on 07/21/2020).
- Al-Awadi et al. (1997). The stratigraphy of the Middle Eocene–Pleistocene sediments in Kuwait. In: *Journal of Arid Environments*, 37(1), pp. 1–22. ISSN: 0140-1963. doi: <https://doi.org/10.1006/jare.1997.0268>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196397902688>.
- Al-Bloushi, A. (2016). Depositional History of the Lower to Middle Eocene Dammam Formation in Kuwait?. In: 2016.1 (2016), pp. 1–5. ISSN: 2214-4609. doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602387>. url: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201602387>.
- Al-Hajari, S. A. (1990). *Geology of the Tertiary and its influence on the Aquifer system of Qatar and eastern Arabia* [PhD Thesis]. University of South Carolina, 1990, p. 283.
- Al-Kubaisi, M. A. M. (1984). *Industrial development in Qatar: A geographical assessment* [PhD Thesis]. Durham University. url: <http://etheses.dur.ac.uk/7144> (visited on 06/03/2020).
- Aller et al. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency, 1987, p. 641.
- al-Naimi et al. (2012). Landscape signatures and seabed characterization in the marine environment of north-west Qatar. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 42, pp. 245–259. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41623641>.
- Al-Saad, H. (2003). Facies analysis, cyclic sedimentation and paleoenvironment of the middle Eocenerus Formation in Qatar and adjoining areas. In: *Carbonates and Evaporites* 18(1), pp. 41–50.
- Al-Saad, H. (2005). Lithostratigraphy of the Middle Eocene Dammam Formation in Qatar, Arabian Gulf: effects of sea-level fluctuations along a tidal environment. In: *Journal of Asian Earth Sciences* 25(5), pp. 781–789. ISSN: 1367-9120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.07.009>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136791200400166X>.
- Alsharhan, A. S., Rizk, Z.A., Nairn, A.E.M., Bakhit, D.W., & Alhajari, S.A. (2001). Hydrogeology of an Arid Region: The Arabian Gulf and Adjoining Areas. *Elsevier Science B.V.*, 2001, pp. 1–6. ISBN: 978-0-444-50225-4. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044450225-4/50002-6>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444502254500026>.
- Alsharhan, A.S., & Nairn, A.E.M. (1997). *Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East*. Elsevier, 1997, p. 979.
- Baalousha, H. M. (2011). Mapping groundwater contamination risk using GIS and groundwater modelling. A case study from the Gaza Strip, Palestine. In: *Arabian Journal of Geosciences*, 4, pp. 483–494. doi: 10.1007/s12517-010-0135-0.
- . (2016a) Development of a groundwater flow model for the highly parameterized Qatar aquifers. In: *Modeling Earth Systems and*

- Environment*, (2)67, pp. 1–11. doi: 10.1007/s40808-016-0124-8.
- . (2016b). Groundwater vulnerability mapping of Qatar aquifers. In: *Journal of African Earth Sciences*, 124, pp. 75–90. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.017.
- . (2016c). Using Monte Carlo simulation to estimate natural groundwater recharge in Qatar. In: *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(87). doi: 10.1007/s40808-016-0140-8. url: <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0140-8>.
- Boukhary M. et al. (2011). Foraminifera and ostracods of early Eocene Umm er Radhuma Formation, Dukhan oil field, Qatar. In: *Micro-paleontology* 57, pp. 37–60. doi: 10.1007/s40808-016-0124-8.
- Carter, R. & Eddisford, D. (2013). *Origins of Doha Project: Season 1*. (Archive Report). url: <https://originsofdoha.files.wordpress.com/2013/11/origins-of-doha-season-1-archive-report-final.pdf>.
- Carter, R. (2005). The History and Prehistory of Pearling in the Persian Gulf. In: *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, 48(2), pp. 139–209. ISSN: 00224995. url: <http://www.jstor.org/stable/25165089>.
- Cavelier, C. (1970). *Geological description of the Qatar peninsula (Arabian Gulf)*. Department of Petroleum Affairs, 1970, p. 48.
- Cunliffe, B. (2017). *On the Ocean: the Mediterranean and the Atlantic from prehistory to AD 1500*. Oxford University Press, 2017, p. 631. ISBN: 978-0-19-875789-4.
- Cuttler, R., Tetlow, E., & al-Naimi, F. (2011). Assessing the value of palaeoenvironmental data and geomorphological processes for understanding Late Quaternary population dynamics in Qatar. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 41, pp. 47–60. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41622121>.
- de Cardi, B. (1974). The British Archaeological Expedition to Qatar 1973–1974. In: *Antiquity* 48(199), pp. 196–200. url: <https://doi.org/10.1017/S0003598X00057896>.
- Department of Agricultural and Water Research – Soil Research Section. (2005). *The Atlas of Soils for the State of Qatar*. Ministry of Municipal Affairs and Agriculture, 2005, p. 118. url: <https://books.google.com.qa/books?id=VLYWSQAACAAJ>.
- Dill et al., H. G. (2005). Sedimentary facies, mineralogy, and geochemistry of the sulphatebearing Miocene Dam Formation in Qatar. In: *Sedimentary Geology* 174(1), pp. 63–96. ISSN: 0037-0738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.11.004>. url: <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0037073804003379>.
- Dill H. G., Nasir, S., & Al-Saad, H. (2003). “Lithological and structural evolution of the northern sector of Dukhan anticline, Qatar, during the early Tertiary: with special reference to sequence stratigraphic bounding surfaces.” In: *Geoarabia-Manama* 8 (2) 2003, pp. 1–13.
- Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1998). Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK), Practical Guide. 1998, p. 56.
- Donkin, R. A. (1998). *Beyond Price: Pearls and Pearl Fishing Origins to the Age of Discoveries*. 1998, p. 445. ISBN: 0-87169-224-4.
- Duggan, J. et al. (2013). Testing karst hazard predictions in Qatar. Geotechnica ME, 2013 conference. <http://www.geotechnica.co.uk/pdfs/James%20Duggan%20-%20Testing%20Karst%20hazard%20prediction%20in%20Qatar.pdf>
- Earle, S., & Panchuk, K. (2019). *Physical Geology* (2nd Edition). Victoria, B.C.: BCcampus. url: <https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/>.
- Eccleston, B. L., Pike, J. G., & Harhash, I. (1981). *The water resources of Qatar and their development*. Vol. I. Doha.
- El-Nakhal, H. A. & El-Naggar, Z. R. (1994). Review of the biostratigraphy of the Aruma Group (Upper Cretaceous) in the Arabian Peninsula and surrounding regions. In: *Cretaceous Research* 15(4), pp. 401–416.
- Engel, M. et al. (2020). Sediment-filled karst depressions and riyad – key archaeological environments of south Qatar. In: *E & G Qua-*

- ternary Science Journal* 68(2), pp. 215–236. doi: 10.5194/egqsj- 68- 215- 2020. url: <https://egqsj.copernicus.org/articles/68/215/2020/>.
- Engel, M., Strohmenger, C. J., & Brückner, H. (2014). Holocene Sea-Level History of Qatar: New Geomorphic and Sedimentary Evidence using Differential GPS. In: *Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings 3*, 2014.
- Fekri, M. H. (2017). *Qatar in the Heart and in History* [Historical report, 2017]. P. 29.
- Fereydoun. G. (2009). *Petroleum Geology of the Persian Gulf*. P. 707. ISBN: 964-03-9420-3.
- Fleitmann et al. (2007). Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Review* 26 (1-2), pp 170-188.
- Flemming, H. (2017). *Archaeological Investigations in Qatar 1956-1974*. Moesgaard Museum, 2017. ISBN: 978-87-93423-20-6.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO (2008). *Country profile – Qatar*. 2008. url: <http://www.fao.org/3/ca0349en/CA0349EN.pdf> (visited on 05/12/2020).
- Fromherz, A. J. (2012). *Qatar: A Modern History*. 2012, p. 224. ISBN: 978-15-89019- 10-2.
- Garbrecht, J., & Lawrence, W. M. (1997). The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. In: *Journal of Hydrology* 193(1), pp. 204–213. ISSN: 0022-1694. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03138-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03138-1). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169496031381>.
- Gehrels, R., & A., Long (2008). Sea level is not level: The case for a new approach to predicting UK sea-level rise”. In: *Geography Compass* 93.1 (2008), pp. 11–16. issn: 0016-7487.
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (2010). *Global Ocean & Land Terrain Models*. url: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data (visited on 03/14/2020).
- Ghazal, R. L. (1987). *Report on the Qatar near surface geology based on uphole logs and lithological descriptions*. P. 71.
- Gillespie, F., & Al-Naimi, F. A. (2013). *Hidden in the Sands: Uncovering Qatar’s Past Paperback*. ISBN: 978-1909339064.
- Glennie, K. W., & Singhvi, A. K. (2002). Event stratigraphy, paleoenvironment and chronology of SE Arabian deserts. In: *Quaternary Science Reviews* 21(7). Interactions between arid and humid records of Quaternary change in drylands (IGCP 413), pp. 853–869. ISSN: 0277-3791. doi: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00133-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00133-0). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379101001330>.
- Guérin, A., & Al-Na’imi, F. A. (2009). Territory and settlement patterns during the Abbasid period (ninth century AD): the village of Murwab (Qatar). In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 39 (2009), pp. 181–196. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41223979>.
- . (2010). Preliminary pottery study: Murwab horizon in progress, ninth century AD, Qatar. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 40, pp. 17–34. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41224004>.
- Hrbek, T. & Meyer, A. (2003). Closing of the Tethys Sea and the phylogeny of Eurasian killifishes (Cyprinodontiformes: Cyprinodontidae). In: *Evolutionary Biology* 16, pp. 17–36.
- Jameson, J., & Strohmenger, C. J. (2012). Relative Sea-Level Changes During the Late Pleistocene to Holocene of Qatar: Implications for Eustasy and Tectonics. In: booktitle. The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California (2012). 2012. url: https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2012/50704jameson/ndx_jameson.pdf.html
- Jeffrey I. Rose. (2010). New Light on Human Prehistory in the Arabo-Persian Gulf Oasis. In: *Current Anthropology* 51(6), pp. 849–883.
- John Rivers et al. (2019). Are carbonate barrier islands mobile? Insights from a mid to late-Holocene system, Al Ruwais, northern Qatar.

In: *Sedimentology* 67(1).

Kargarabafghi, F., & Neubauer, F. (2018). Tectonic forcing to global cooling and aridification at the Eocene-Oligocene transition in the Iranian plateau. In: *Global and Planetary Change 171*. From the deep Earth to the surface, pp. 248–254. ISSN: 0921-8181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.12.012>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818117301923>.

Kimrey, J. (1985). *Proposed artificial recharge studies in northern Qatar*. Open file report 85–343. United States Department of the Interior Geological Survey, 1985. doi: 10.3133/ofr85343. url: <https://pubs.usgs.gov/of/1985/0343/report.pdf> (visited on 04/17/2020).

Lambeck, K. (1996). Shoreline reconstructions for the Persian Gulf since the last glacial maximum. In: *Earth and Planetary Science Letters* 142 (1), pp. 43–57. ISSN: 0012-821X. doi: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00069-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00069-6). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X96000696>.

—. (2004). Sea-level change through the last glacial cycle: Geophysical, glaciological and palaeogeographic consequences. In: *Comptes Rendus Geoscience* 336(7), pp. 677–689. ISSN: 1631-0713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.12.017>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071304000896>.

Leblanc, J. (2017a). *A revised guide to the Cenozoic Surface Formations of Qatar (excluding the islands)*. P. 95. url: https://www.researchgate.net/publication/318035184_A_revised_guide_to_the_Cenozoic_Surface_Formations_of_Qatar_Middle_East_excluding_the_islands

Leblanc, J. (2017b). *Origin and types of silica in the Lower Eocene Carbonates of the Rus Formation, Qatar, Middle-East* [Technical Report]. Institution, p. 111.

Liao, Y. P., & J. M. Kaihatu (2016). Numerical Investigation of Wind Waves in the Persian Gulf: Bathymetry Effects. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 33(1), pp. 17–31. ISSN: 0739-0572. doi: 10.1175/JTECH-D-15-0066.1. eprint: https://journals.ametsoc.org/jtech/article-pdf/33/1/17/3381765/jtech-d-15-0066_1.pdf. url: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0066.1>.

Lokier et al. (2015). Late Quaternary sea-level changes of the Persian Gulf. In: *Quaternary Research* 48(1), pp. 96–81.

Lorimer, J. G. (1908). ‘Gazetteer of the Persian Gulf. Vol. II. Geographical and Statistical. J G Lorimer. 1908’ | Qatar Digital Library (qdl.qa)

Macumber, P. G. (2011). A geomorphological and hydrological underpinning for archaeological research in northern Qatar. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 41, pp. 187–200. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41622132>.

—. (2015). Water heritage in Qatar, in: *Cultural Heritages of Water: Thematic Study on The Cultural Heritages of Water in the Middle East and Maghreb*. Technical Report 2015, pp. 223–239.

—. (2018). Sea Level and Climatic Influences on the Occupation of Qatar and the Gulf during the Holocene Period. *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies*, vol. 48, 2018, pp. 201–17. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/45163155>. Accessed 8 Jun. 2022.

McPhillips, S. et al., (2012). *Qatar Islamic Archaeology and Heritage Project* [Technical report].

Mcphillips, S., Rosendahl, S., & Morgan, V. (2015). Abbasid rural settlement in northern Qatar: Seasonal tribal exploitation of an arid environment? In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 45, pp. 185–197. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/43783632>.

Ministry of Foreign Affairs, Qatar (2000). *History of Qatar*. Online report. 2000. url: http://www.qatarembassy.or.th/download/Complete_History_of_Qatar.pdf (visited on 04/17/2020).

Moosdorf, N., & Oehler, T. (2017). Societal use of fresh submarine groundwater discharge: An overlooked water resource. In: *Earth-Science Reviews* 171, pp. 338–348. ISSN: 0012-8252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.006>. url: <http://www.sciencedirect.com>.

com/science/article/pii/S0012825216302641.

Mörner, N. (2015). The Flooding of Ur in Mesopotamia in New Perspectives. In: *Archaeological Discovery* 3(1), pp. 26–31.

Muhsen, S., & Al Naimi, F. (n.d.). Notes on Archaeological Discoveries from Qatar. In: *FRIENDS OF ASOR*. Retrieved from: <http://www.asor.org/anetoday/2014/12/notes-on-archaeological-discoveries-from-qatar/>.

Mukhopadhyay et al. (1996). An overview of the tertiary geology and hydrogeology of the northern part of the Arabian Gulf region with special reference to Kuwait. In: *Earth-Science Reviews* 40(3), pp. 259–295. ISSN: 0012-8252. doi: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00068-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00068-2). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012825295000682>.

Oxford Business Group. (2014). *The Report: Qatar 2014: Country Profile*. url: <https://oxfordbusinessgroup.com/qatar-2014-0> (visited on 07/20/2020).

Perotti, C.R., S. Carruba, M. Rinaldi, G. Bertozzi, L. Feltre, and M. Rahimi. 2011. ‘The Qatar–South Fars Arch Development (Arabian Platform, Persian Gulf): Insights from Seismic Interpretation and Analogue Modelling’. *New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence*. InTech. doi:10.5772/20299.

Pike, J. G., Harhash, I., & Gemmel, B. A. P (1975). *Rainfall and groundwater recharge over Qatar: United Nations Food and Agriculture Organization*. Integrated water and land use project Tech. Note. [Technical report 24] 1975, p. 22.

Planning and Statistics Authority. (2019). *Population and social statistics 2019*. url: https://www.psa.gov.qa/en/statistics/Statistical%20Releases/Population/Population/2019/Population_social_1_2019_AE.pdf (visited on 07/21/2020).

—. (2020). *Monthly Figures on Total Population 2020*. url: <https://www.psa.gov.qa/en/statistics1/StatisticsSite/pages/population.aspx> (visited on 07/21/2020).

Pollock, D.W. (2017). *MODPATH v7.2.01: A particle-tracking model for MODFLOW*. U.S. Geological Survey Software Release, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.5066/F70P0X5X>. url: <https://www.usgs.gov/software/modpath-a-particle-tracking-model-modflow>.

Potter, L. G. (Ed.). (2009). *The Persian Gulf in History*. Palgrave Macmillan, New York, 2009, p. 326. ISBN: 978-0-230-61282-2. doi: <https://doi.org/10.1057/9780230618459>.

Prehistoric and pre-Islamic burial archaeology in Qatar: New results and perspectives (poster)”. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 45, pp. 159–173. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/43783630>.

Qatar Government Communication Office. *Facts about Qatar* (2020). url: <https://www.gco.gov.qa/en/media-centre/information-about-qatar> (visited on 07/12/2020).

Qatar Meteorological Department. *Climatological Normals*. 2020. url: <https://qweather.gov.qa/CAA/ClimateNormals.aspx> (visited on 07/21/2020).

Rashid et al. (2014). Constraining mid to late Holocene relative sea level change in the southern equatorial Pacific Ocean relative to the Society Islands, French Polynesia. In: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 15(6), pp. 2601-2615.

Rausch et al. (2014). The Riddle of the Springs of Dilmun-Does the Gilgamesh Epic Tell the Truth? In: *Groundwater* 52(4), pp. 640–644. doi: 10.1111/gwat.12214.

Rausch et al. (2014). The Riddle of the Springs of Dilmun–Does the Gilgamesh Epic Tell the Truth? In: *Ground Water* 52(4), pp. 640–644.

Rees, G., Richter, T., & Walmsley, A. (2011). Investigations in al-Zubarah hinterland at Murayr and al-Furayhah, north-west Qatar (poster). In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 41, pp. 309-316. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41622142>.

Rice, M. (1994). *The archaeology of the Arabian Gulf, c. 5000-323 BC*. Taylor and Francis, p. 369. ISBN: 978-0415032681.

- Rivers et al. (2019). The depositional history of near-surface Qatar aquifer rocks and its impact on matrix flow and storage properties. In: *Arabian Journal of Geosciences* 12(380). url: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4498-6>.
- Rivers, J. M. & Kaczmarek, S. E. (2020). Dologrus: The impact of meteoric water-controlled diagenesis following early-marine dolomitization. In: *Sedimentology*. doi: 10.1111/sed.12742. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/sed.12742>.
- Rivers, J. M. & Larson, K. P. (2018). The Cenozoic kinematics of Qatar: Evidence for high-angle faulting along the Dukhan 'anticline. In: *Marine and Petroleum Geology* 92, pp. 953–961. ISSN: 0264-8172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.03.034>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026481721830134X>.
- Ryan, B. H., Kaczmarek, S. E., & Rivers, J. M. (2020). Early and pervasive dolomitization by near-normal marine fluids: New lessons from an Eocene evaporative setting in Qatar. In: *Sedimentology*, pp. 2917-2944. doi: 10.1111/sed.12726. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/sed.12726>.
- Sadooni, F. N. & Alsharhan, A. S. (2019). Regional stratigraphy, facies distribution, and hydrocarbons potential of the Oligocene strata across the Arabian Plate and Western Iran. In: *Carbonates and Evaporites* 34 (4), pp. 1757-1770. doi: 10.1007/s13146-019-00521-3. url: <https://doi.org/10.1007/s13146-019-00521-3>.
- Schlumberger Water Services. Studying and developing the natural and artificial recharge of the groundwater aquifer in the state of Qatar. Study two: build a surface rainfall-runoff model to study the relation between rainfall, runoff and recharge. Appendices. 2009, p. 318.
- Schlumberger Water Services. Studying and Developing the Natural and Artificial Recharge of the Groundwater in Aquifer in the State of Qatar. Doha, 2009.
- Scientific UNESCO: United Nations Educational and Cultural Organization. World Heritage in Qatar- Special Issue. In: *World Heritage* 72, pp. 5-87. doi: 10.1007/s40808-016-0124-8.
- Scotese, C. (2016). *PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates*. url: <https://www.earthbyte.org/paleomap-paleoatlas-for-gplates> (visited on 06/18/2020).
- Scott-Jackson et al. (2014). The Stone Age of Qatar: New investigations, new finds; interim report. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 44, pp. 317–324. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/43782919>.
- Siegert., M. J. (2014). Evidence of the Growth and Decay of Ice Sheets on Glaciated Landscapes. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. ISBN: 978-0-12-409548-9. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09424-0>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489094240>.
- Soille, P., Vogt, J., & Colombo, R. (2003). Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. In: *Water Resources Research* 39(12). doi: 10.1029/2002WR001879. url: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002WR001879>.
- Strohmeinger, C. J., & Jameson, J. (2018). Gypsum stromatolites from Sawda Nathil: relicts from a southern coastline of Qatar. In: *Carbonates and Evaporites* 33(2), pp. 169–186. doi: 10.1007/s13146-017-0365-2. url: <https://doi.org/10.1007/s13146-017-0365-2>.
- United States Department of Agriculture. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 1999, p. 886. url: <https://naldc.nal.usda.gov/catalog/CAT87211181>
- Vecchioli, J. (1976). Preliminary Evaluation of the Feasibility of Artificial Recharge in Northern Qatar. U.S. Geological Siirveyo) pen-File/Repor-b;-(76"540j. Proposed artificial recharge studies in northern Qatar. United States Department of the Interior Geological Survey, 1976. url: <https://pubs.usgs.gov/of/1976/0540/report.pdf> (visited on 05/23/2020).
- Wagner, W. (2011). *Groundwater in the Arab Middle East*. Springer-Verlag Berlin, 2011, p. 467. ISBN: 978-3-642-19351-4. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19351-4>.

- Walmsley, A., Barnes, H., & Macumber, P. (2010). Al-Zubarah and its hinterland, north Qatar: excavations and survey, spring 2009. In: *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies 40*, pp. 55–68. ISSN: 03088421. url: <http://www.jstor.org/stable/41224007>.
- Wang, L. & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. In: *International Journal of Geographical Information Science 20*(2), pp. 193-213. doi: 10.1080/13658810500433453. url: <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>.
- West, I. & Al-Mulla, M. M. (2012). *Qatar-geology, sabkhas, evaporites and desert environments*. url: <https://www.southampton.ac.uk/~imw/Qatar-Sabkhas.bak> (visited on 04/07/2020).
- Whitaker et al. (2014). Origins of Evaporites in a Holocene Mixed Clastic and Carbonate Coastal Sabkha: Preliminary Hydrological and Geochemical Data from Mesaieed Sabkha, Qatar. English. In: *International Petroleum Technology Conference*, Vol. IPTC, 2014.
- Yousif, A. M., & Harhash, I. E. (1985). *Groundwater recharge estimates for the period 1972–1983*. Technical report. Ministry of Industry, Agriculture, Department of Agricultural, and Water Research.
- Yurtsevor, Y. & Payne, B. R. (1978). Application of environmental isotopes to groundwater in Qatar. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 1978, pp. 465–490.

HYDROGEOLOGICAL ATLAS OF QATAR

Geology – Water Resources – Paleoclimate

Husam Musa Baalousha

This is the first atlas book for Qatar, which contains information and maps about surface and sub-surface geology, aquifers, and the hydrodynamic changes in underground water storage overtime. When exploring the paleoclimate, atlas book put more emphasis in particular on the Holocene epoch, as it played a very important role in the climate changes and sea level fluctuations around Qatar over the last 10,000 years. It is a valuable book for researchers, students and anyone who is interested to know about the country's geology, water resources, Holocene climate, and the relation between human settlement and nature. The readers can travel in time to explore the relation between climate, sea level and human settlements' distribution in the country. This covers the time period of the last 10,000 years until the present.

أطلس الهيدروجيولوجيا لدولة قطر

الجيولوجيا – مصادر المياه – المناخ السحيق

د. حسام موسى بعلوشة

أول أطلس للمياه الجوفية لدولة قطر، يحتوي على معلومات وخرائط حول الجيولوجيا السطحية وتحت السطحية، وخزانات المياه الجوفية، والتغيرات الهيدروديناميكية في تخزين المياه الجوفية على مر الزمن. في إطار الحديث عن المناخ في العصور القديمة، يركز الأطلس بشكل خاص على حقبة الهولوسين؛ حيث كان لتلك الحقبة دورٌ مهمٌ في التغيرات المناخية، وتقلبات مستوى سطح البحر في جميع أنحاء دولة قطر خلال العشرة آلاف سنة الماضية. وهو كتاب مهم للباحثين والطلاب والمهتمين بمعرفة جيولوجيا قطر، وموارد مياهها، ومناخها في فترة الهولوسين، كما يبحث العلاقة بين الاستيطان البشري وبين الطبيعة. بهذا الكتاب يمكن للقراء السفر عبر الزمن؛ لاستكشاف العلاقة بين المناخ ومستوى البحر وتوزيع الاستيطان البشري حتى وقتنا الحاضر.



هذا الكتاب هو أول أطلس للمياه الجوفية لدولة قطر، يحتوي على معلومات وخرائط حول الجيولوجيا السطحية وتحت السطحية، وخزانات المياه الجوفية، والتغيرات الهيدروديناميكية في تخزين المياه الجوفية على مر الزمن. في إطار الحديث عن المناخ في العصور القديمة، يركز الأطلس بشكل خاص على حقبة الهولوسين؛ حيث كان لتلك الحقبة دورٌ مهمٌ في التغيرات المناخية، وتقلبات مستوى سطح البحر في جميع أنحاء دولة قطر خلال العشرة آلاف سنة الماضية. وهو كتاب مهم للباحثين والطلاب والمهتمين بمعرفة جيولوجيا قطر، وموارد مياهاها، ومناخها في فترة الهولوسين، كما يبحث العلاقة بين الاستيطان البشري وبين الطبيعة. بهذا الكتاب يمكن للقراء السفر عبر الزمن؛ لاستكشاف العلاقة بين المناخ ومستوى البحر وتوزيع الاستيطان البشري حتى وقتنا الحاضر.

This is the first atlas book for Qatar, which contains information and maps about surface and sub-surface geology, aquifers, and the hydrodynamic changes in underground water storage overtime. When exploring the paleoclimate, atlas book put more emphasis in particular on the Holocene epoch, as it played a very important role in the climate changes and sea level fluctuations around Qatar over the last 10,000 years. It is a valuable book for researchers, students and anyone who is interested to know about the country's geology, water resources, Holocene climate, and the relation between human settlement and nature. The readers can travel in time to explore the relation between climate, sea level and human settlements' distribution in the country. This covers the time period of the last 10,000 years until the present.

ISBN 978-9927-167-38-6



9 789927 167386

تصميم: غسان البتيري