BGR

german cooperation
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

إدارة المياه الجوفية

في المناطق الساحلية

إكيكي، شيلي

BGR 2018 © ، جميع الحقوق محفوظة. لا يتطلب الحصول على الإذن في إعادة الإنتاج لأغراض غير تجارية إذا ما تم إسناده بشكل صحيح.

للاستشهاد بالنسخة الإنجليزية

Post, V.E.A., M. Eichholz, R. Brentführer (2018): Groundwater management in coastal zones. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover, Germany, 107 pp.

للاستشهاد بالنسخة العربية

بوست، ڤ.ي.ڤ، م. إيكهولز، ر. برينتفوهرر (2018) :إدارة المياه الجوفية في المناطق الساحلية . ترجمة صلاح حمد. المعهد الاتحادي لعلوم الأرض والموارد الطبيعية (BGR). هانوفر، ألمانيا، 107 ص.

نشر من قبل

المعهد الاتحادي الألماني لعلوم الأرض والموارد الطبيعية (BGR) بالنيابة عن وبتمويل الوزارة الاتحادية الألمانية للتعاون الاقتصادي والتنمية.

الفكرة الأصلية : رامون برينتفوهرر، فانيسا فاسين

المؤلفون : فنسنت بوست، مايكل إيكهولز، رامون برينتفوهرر

التخطيط والرسوم التوضيحية : Ulysses Erhardt ،ff. mediengestaltung GmbH

الخرائط :مايكل إيكهولز، (BGR) انظر المراجع لمصادر البيانات المكانية

النسخة العربية

ترجمة وتحرير :

هيدروجيولوجي. صلاح مفتاح حمد

كلية الموارد الطبيعية وعلوم البيئة جامعة عمر المختار، البيضاء – ليبيا

مراجعة :أ. عصام بوزيد، كلية العلوم جامعة عمر المختار، البيضاء – ليبيا

إخلاء مسؤولية

الآراء المعبر عنها في هذا الكتيب هي مسؤولية المؤلفين فقط ولا تعكس بالضرورة آراء المعهد الاتحادي لعلوم الأرض والموارد الطبيعية (BGR) أو الوزارة الاتحادية للتعاون الاقتصادي والتنمية (BMZ) .الخرائط الجغرافية في هذا الكتيب لأغراض إرشادية فقط ولا تمثل ترسيما للحدود أو المناطق الدولية.

طبع في ألمانيا.

ردمك 978-3-9814108-2-2
www.bgr.bund.de

الصور

صورة الغلاف: Alice Nerr (fotolia)
صفحة 12: النمو السكاني:rcfotostock ، الزراعة:Dave Willman ، السياحة:Unclesam ، القياس:rupbilder (all fotolia)، IWMI (Monitoring)
صفحة 15: شاطئ سيريلانكا:Dudarev Mikhail/fotolia
صفحة 85:Kadmy (fotolia)

شكر وتقدير

تم تمويل هذا الكتيب من قبل الوزارة الاتحادية الألمانية للتعاون الاقتصادي والتنمية (BMZ) والمعهد الاتحادي لعلوم الأرض والموارد الطبيعية (BGR) .الشكر الجزيل لمساهمة فانيسا فايسن، التي دفعت المشروع في المرحلة الأولية ، ونود أن نشكر مايك جروشكي وهينريك شرايبر على تعليقاتهم القيمة حول فصول معينة الحالات الدراسية. وأخيرًا، نشكر نينو كوكوريك في المركز الدولي لتقييم موارد المياه الجوفية (IGRAC) على مشاركة مجموعة بيانات الملوحة العالمية التي تم استخدامها لإنتاج الخرائط بالخريطة 1.1.

الاختصارات

ASR Aquifer Storage and Recovery

التخزين والاسترداد لطبقة المياه الجوفية

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

المعهد الاتحادي لعلوم الأرض والموارد الطبيعية

(German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) BMZ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und

المعهد الاتحادي الألماني لعلوم الأرض والموارد الطبيعية

Entwicklung (German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development)

الوزارة الاتحادية الألمانية للتعاون الاقتصادي والتنمية

CNY Chinese Yuan

اليوان الصيني

EC Electrical Conductivity

التوصيل الكهربي

GWP Global Water Partnership

الشراكة العالمية للمياه

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations

منظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة

IGES Institute for Global Environmental Strategies, Japan Change

معهد الاستراتيجيات البيئية العالمية، اليابان

IGRAC International Groundwater Resources Assessment Centre

IPCC Intergovernmental Panel on Climate change

الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ

IWRM Integrated Water Resources Management

الإدارة المتكاملة للموارد المائية

OECD Organization for Economic Co-operation and Development

منظمه التعاون الاقتصادي والتنمية

TDS Total Dissolved Solids

مجموع الأملاح الذائبة

WFD (European) Water Framework Directive

التوجيه الإطاري الأوروبي للمياه

WHO World Health Organization

منظمة الصحة العالمية

WRD Water Replenishment District (California, USA)

منطقة تجديد المياه (كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية)

الفهرس

	شكر وتقدير	4
	الاختصارات	5
	قائمة الأشكال	8
	قائمة الجداول	10
	قائمة الخرائط	11
	المياه الجوفية الساحلية – التحديات والحلول	12
	مقدمة الكتاب	
1.	**المقدمة**	17
1.1	حول هذا الكتيب	18
2.1	ديناميكية المنطقة الساحلية	18
3.1	نظرة عالمية على عوامل الخطر المؤثرة على المياه الجوفية الساحلية	22
2.	**ديناميكية المياه العذبة والمياه المالحة في المناطق الساحلية**	23
1.2	الملوحة	24
2.2	تفاعل المياه العذبة ومياه البحر في طبقات المياه الجوفية الساحلية	26
3.2	تداخل مياه البحر	30
4.2	آثار تغير المناخ وارتفاع مستوى سطح البحر	32
5.2	آثار الكوارث الطبيعية على طبقات المياه الجوفية الساحلية	34
6.2	هبوط الأرض	37
3.	**تحديات إدارة المياه في المناطق الساحلية**	39
1.3	النمو السكاني السريع (دار السلام، تنزانيا)	40
2.3	التوسع في الزراعة المروية (حوض سوس ماسة، المغرب)	42
3.3	الاستخدام غير المنظم للمياه الجوفية والثغرات المعرفية (دلتا النيل، مصر)	44
4.3	المياه الجوفية للمناطق السياحية الساخنة (مايوركا، إسبانيا)	47
5.3	تأثير استخراج الرمال (حوض نهر نيلوالا، سريلانكا)	49

.4	**الحوكمة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المناطق الساحلية**	51
1.4	مشاكل المياه الجوفية والحوكمة	52
2.4	المشكلات المرصودة في إدارة المياه الجوفية الساحلية	54
3.4	فهم الجهات الفاعلة في إدارة المياه الجوفية الساحلية	56
4.4	نحو نظام حوكمة للتنمية المستدامة للمياه الجوفية الساحلية	58
5.4	مراقبة طبقات المياه الجوفية الساحلية – حجر الزاوية لدى الإدارة والحوكمة	62
1.5.4	الملوحة	63
2.5.4	المراقبة "المثالية" بشكل جيد	64
3.5.4	كيمياء المياه	65
.5	**الاستراتيجيات والحلول**	67
1.5	نُهُج الاستخراج الأمثل للمياه الجوفية	68
	الحالة 1: آبار الضخ المتناوبة (جنوب داونز، إنجلترا)	69
	الحالة 2: نظام إدارة المياه لنظام هيدروجيولوجي (جنوب تاراوا، كيريباتي)	72
2.5	نُهُج إدارة الطلب	74
	الحالة 3: الطلب المائي على المياه الجوفية (تيانجين، الصين)	75
3.5	نُهُج معززة لتغذية الخزان الجوفي	78
	الحالة 4: حصاد مياه الأمطار من الأسطح للآبار المحفورة (كيرالا، الهند)	79
	الحالة 5: إدارة مبتكرة لعدسات المياه العذبة (زيلاند، هولندا)	82
4.5	نُهُج الهندسة تحت السطحية	85
	الحالة 6: آبار الحقن والحواجز الهيدروليكية (لوس أنجلوس، كاليفورنيا).	86
	الحالة 7: حواجز الملوحة (شاندونغ، الصين)	89
.6	**ملاحظات ختامية**	91
	المراجع	94
	مراجع البيانات المكانية	106

قائمة الأشكال

1. المقدمة

شكل 1.1: تطور السكان في المناطق الساحلية المنخفضة 19

شكل 2.1: العوامل المؤثرة على طبقات المياه الجوفية الساحلية وتأثيراتها 20

2. ديناميكية المياه العذبة والمياه المالحة في المناطق الساحلية

شكل 1.2: تقسيم المياه الطبيعية إلى فئات ملوحة على أساس مجموع الاملاح الكلية الذائبة في ملجم / لتر 25

شكل 2.2: رسم تخطيطي لطبقة مياه جوفية ساحلية نموذجية مع وتد من مياه البحر المتداخلة 27

شكل 3.2: تفاعل المياه العذبة والمياه المالحة في منطقة ساحلية 28

شكل 4.2: تداخل مياه البحر في طبقة المياه الجوفية الساحلية نتيجة للضخ 30

شكل 5.2: خطر تسرب مياه البحر لمواقع الآبار المختلفة 31

شكل 6.2: تأثير ارتفاع منسوب البحر على طبقة مياه جوفية ساحلية نموذجية 32

شكل 7.2: رسم نموذجي يوضح غمر مياه البحر بسبب تسونامي 34

شكل 8.2: المقاومة الكهربائية للمياه الجوفية الضحلة في الجزء الشمالي لمنطقة المسح باندا آتشيه بعد تسعة أشهر من حدوث التسونامي في 2004 35

شكل 9.2: مقاطع عرضية تظهر نمذجة تركيزات الكلوريد بعد غرق وادٍ عرضه 100 متر من الكثبان بمياه البحر في جزيرة بالتروم الألمانية 36

شكل 10.2: الآثار التراكمية لارتفاع مستوى سطح البحر وهبوط الأرض) 37

شكل 11.2: الارتفاع المطلق لمستوى سطح البحر ومتوسط انخفاض اليابسة في العديد من المدن الساحلية 38

3. تحديات إدارة المياه في المناطق الساحلية

شكل 1.3: معدلات السحب مقابل الزمن في دلتا النيل 45

شكل 2.3: مقطع عرضي هيدروجيولوجي يبين الشمال والجنوب عبر دلتا النيل 46

شكل 3.3: نموذج مفاهيمي هيدروجيولوجي لدلتا النيل 46

شكل 4.3: استخراج الرمال في سري لانكا، المقدر بملايين الأمتار المكعبة. 50

4. الحوكمة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المناطق الساحلية

شكل 1.4: الدورة التكرارية في عملية الإدارة التكيفية 60

شكل 2.4: مقطع عرضي تخطيطي لطبقة مياه جوفية ساحلية بثلاثة تصميمات مختلفة لآبار المراقبة: 64

شكل 3.4: رسم بياني يوضح تغير تركيز الكلوريد ونسبة Na/Cl للبئر المتأثرة بالتملح في كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية 66

5. الاستراتيجيات والحلول

شكل 1.5: رسم تخطيطي لمبدأ آبار السحب المتناوبة لمنع تداخل مياه البحر. 70

شكل 2.5: تجربة محاكاة لخيارات إدارة المياه المختلفة؛ 74

شكل 3.5: الناتج المحلي الإجمالي الإقليمي (RGDP) واستخدام المياه الجوفية (IGES 2007). 77

شكل 4.5: حصاد المياه على سطح الأرض وتسربها إلى الآبار المحفورة 80

شكل 5.5: عدسة اصطناعية للمياه العذبة داخل المياه الجوفية المالحة 83

شكل 6.5: نظام رشح التلال الخورية (ذات الجداول المائية) 84

شكل 7.5 تداخل مياه البحر والآبار الحاجزة: 88

شكل 8.5: مقطع عرضي لسد تحت الأرض 90

6. ملاحظات ختامية

شكل 6.1: نظرة عامة على تطور خيارات إمدادات المياه الساحلية 93

قائمة الجداول

3. تحديات إدارة المياه في المناطق الساحلية

جدول 1.3 تطور عدد الآبار في دلتا النيل من 1952 إلى 2016 — 44

4. الحوكمة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المناطق الساحلية

جدول 1.4 ملخص لمشاكل الحوكمة الموجودة في المناطق الثلاث — 54

جدول 2.4 مثال لمجموعاتٍ فاعلة مختلفة لها مصلحة في المياه الجوفية الساحلية — 57

5. الاستراتيجيات والحلول

جدول 1.5 تعرفة المياه في تيانجين — 76

جدول 2.5 المقاييس الرئيسية المختارة لمشاريع حواجز تداخل مياه البحر في لوس أنجلوس — 87

قائمة الخرائط

1. المقدمة

خريطة 1.1 خريطة جنوب شرق آسيا ومنطقة البحر الأبيض المتوسط وجزء من الأميركتين تبين تواجد المياه الجوفية شبه المالحة أو المالحة في طبقات المياه الجوفية الساحلية حيث المراكز الحضرية والمناطق الزراعية ذات الري المكثف للمياه الجوفية، كما تشير الألوان إلى مؤشر الجفاف 21

3. تحديات إدارة المياه في المناطق الساحلية

خريطة 1.3 موقع دار السلام، تنزانيا 40

خريطة 2.3 مجموع الأمـلاح الذائبة (TDS) لموارد الميـاه الجوفية في طبقة المياه الجوفية الضحلة 42

خريطة 3.3 خريطة موقع دلتا النيل، مصر 44

خريطة 4.3 خريطة لموقع مايوركا وحالة المياه الجوفية 47

خريطة 5.3 خريطة موقع ماتارا، سريلانكا. 49

5. الاستراتيجيات والحلول

خريطة 1.5 موقع جنوب داونز إنجلترا، توضح الجيولوجيا وآبار إمداد المياه العامة 69

خريطة 2.5 موقع تاراوا، كيريباس. 72

خريطة 3.5 موقع تيانجين، الصين. 75

خريطة 4.5 موقع كيرالا، الهند. 79

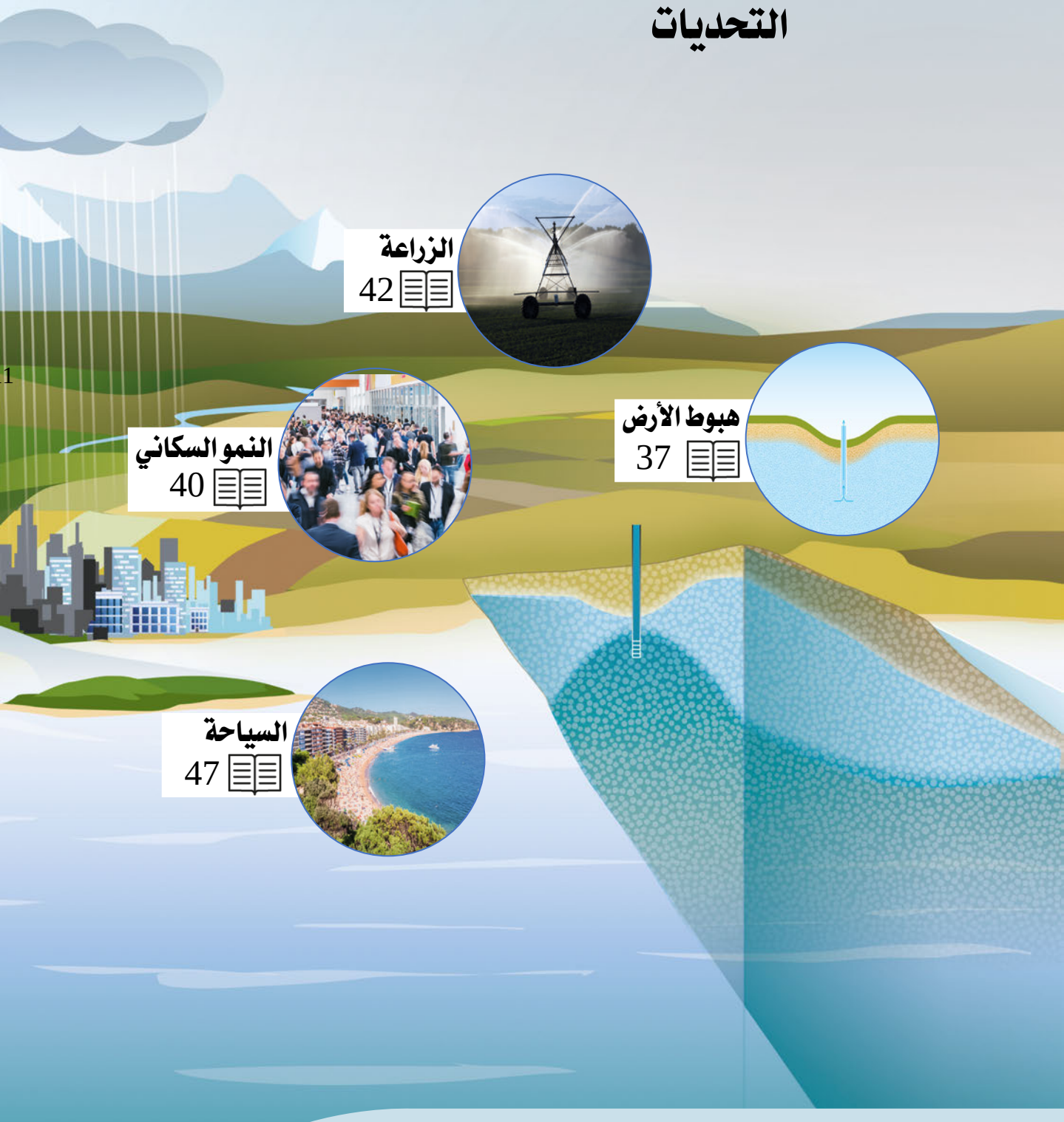
خريطة 5.5 خريطة موقع زيلاند، هولندا. 82

خريطة 6.5 موقع لوس أنجلوس، كاليفورنيا ومواقع الحواجز الهيدروليكية 86

خريطة 7.5 موقع شاندونغ، الصين وموقع سدود المياه الجوفية 89

المياه الجوفية الساحلية

التحديات



الحلول

مقدمة

أ د. رالف واتزل

رئيس المعهد الاتحادي لعلوم الأرض والموارد الطبيعية (BGR)

يعيش جزء كبير من السكان في المناطق الساحلية، وعادة ما يتركزون بالمراكز الحضرية الرئيسية. حيث يؤدي استمرار النمو السكاني والنمو الاقتصادي إلى زيادة الطلب على موارد المياه المجهدة فعلياً، وتُعرِض طبقات المياه الجوفية الساحلية لخطر تداخل مياه البحر. كما ويتسبب استخراج المياه الجوفية بشكل مكثف في تملح المياه الجوفية بالمناطق الساحلية في جميع أنحاء العالم. ومن المتوقع أن يؤدي ارتفاع مستويات سطح البحر وزيادة حالات حدوث العواصف بسبب تغير المناخ وكذلك هبوط الأراضي إلى تفاقم المشكلة على مدى العقود القادمة.

في سياق الطلب المتزايد وتناقص الموارد، تعد كفاءة استخدام المياه وتنويع المصادر من المكونات الرئيسية لإمدادات المياه الآمنة. حيث تلعب المياه الجوفية دورًا حيويا في ذلك، كما ان الكميات المتاحة ومعدلات التجديد تختلف من منطقة ساحلية إلى أخرى. لذلك، فإن الإدارة المستدامة لموارد المياه ستكون ممكنة فقط في حال فهم نظام المياه الجوفية بشكل كامل، الأمر الذي يتطلب شبكة مراقبة جيدة التصميم. وفي حين أن البيانات هي الشرط الأول للإدارة فإن الحوكمة الجيدة هو شرط مسبق آخر لا يقل أهمية. لذا بدون فهم واضح لدور المياه الجوفية في التنمية الاقتصادية للمنطقة، والتنسيق عبر القطاعات والإنفاذ التشريعي، لا يمكن لأي سياسة إدارة أن تكون فعالة.

يقدم هذا الكتيب لمحة عامة عن المخاطر والأخطار على المياه الجوفية الساحلية ويناقش مبادئ الإدارة الجيدة للمياه الجوفية وحوكمتها. كما يقدم مجموعة مختارة من الأمثلة على الاستراتيجيات التي أثبتت جدواها لحماية موارد المياه الجوفية العذبة من خلال إدارة السحب، وخفض الطلب، وإعادة تغذية المياه العذبة المحسنة، والإجراءات الهندسية لمنع تداخل مياه البحر. ونظرًا لأن كل منطقة ساحلية فريدة من نوعها في مزيجها من الظروف الهيدروجيولوجية والاجتماعية الاقتصادية، هناك حاجة إلى مجموعة مختلفة من التدابير لكل منطقة. آمل أن يساعدك هذا الكتيب ويلهمك في تحديد وتنفيذ أفضل الحلول للمنطقة الساحلية التي تعمل فيها.

Ralph Watzel

1.المقدمة

تقع المناطق الساحلية في واجهة تماس بين اليابسة والبحر، وتتأثر بالعمليات البحرية والبرية المتميزة بالديناميكية العالية والاستمرارية في التغير مع الزمن. وتشتمل مكونات المناظر الطبيعية النموذجية – من بين مكونات أخرى – على دلتا الأنهار والأراضي الرطبة والشواطئ والكثبان والشعاب المرجانية، بالإضافة إلى غابات المانغروف والبحيرات (Post and Lundin 1996)؛ حيث توفر المناطق الساحلية موارد طبيعية متنوعة متمثلة في المصائد السمكية والأراضي الزراعية الخصبة وكذلك الممرات التجارية، كما أن جمالها الطبيعي يجعلها وجهات سياحية شهيرة؛ لذلك فإنه مع استمرار التزايد السكاني بالمناطق الساحلية، تتعرض النظم البيئية الطبيعية للضغط أكثر من أي وقت مضى.

1.1 حول هذا الكتيب

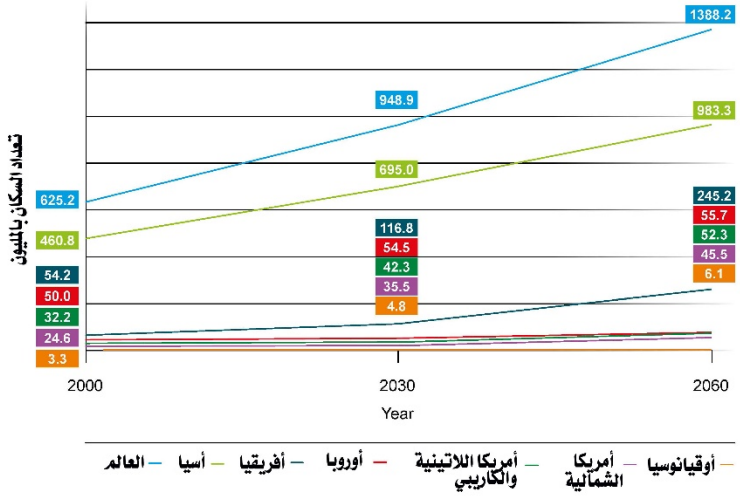
تعتبر إدارة موارد المياه الجوفية في المناطق الساحلية مهمة شاقة؛ نظراً لتعقيد العمليات الهيدرولوجية وكذلك نقص بيانات المراقبة، لذا تصبح عملية الفهم للمورد بالكامل وإدارته بشكل مستدام صعبةً جدا، وحتى وإن وجد الفهم الكافي لنظام المياه الجوفية، فقد تُسبب جوانب الحوكمة في صعوبة تطبيق الاستخدام المستدام لموارد المياه العذبة.

الغرض من هذا الكتيب هو توفير المعلومات الأساسية حول أنظمة المياه الجوفية الساحلية وإدارتها، وليس المقصود منه تقديم مرجع تفصيلي بديل؛ ونظراً لأن كل منطقة تعد فريدة من نوعها في مزيجها من الظروف الفيزيوغرافية والاجتماعية والاقتصادية، لذا فإن الغرض من هذه الوثيقة هو جمع مجموعة أفكارٍ تعد حلولاً لهذه الأنظمة.

بعد هذا الفصل التمهيدي، يقدم الفصل الثاني لمحة عامة عن أهم العمليات الهيدرولوجية في المناطق الساحلية، ويحتوي الفصل الثالث على حالات دراسية مختارة لتدهور موارد المياه الجوفية العذبة الناجم عن الأنشطة البشرية، في حين يتناول الفصل الرابع ممارسات الإدارة ويوضح جوانب الحوكمة الرشيدة، كما ويقدم الفصل الخامس أمثلة على حلول لمشكلات تداخل مياه البحر المسببة للتملح، والتي أثبتت نجاحها في مناطق جغرافية متنوعة حول العالم. وفي الختام، يلخص الفصل السادس النتائج الرئيسية من الفصول السابقة.

2.1 ديناميكية المنطقة الساحلية

لطالما شكلت المناطق الساحلية نقاطاً مركزيةً للاستيطان البشري والنشاط الاقتصادي ؛ فعلى الصعيد العالمي ، يعيش حوالي 37٪ من سكان العالم ضمن حدود 100 كيلومتر من الساحل ، حيث يبلغ متوسط الكثافة السكانية في هذه المناطق ضعف المتوسط العالمي ، كما أن السواحل تقع فيها ثلثي مدن العالم ، وفي الشكل (1.1) يظهر نمو سكاني غير عادي في جميع أنحاء العالم بالمناطق الساحلية ، خصوصاً في المراكز الحضرية ، وتعتبر الصين هي النقطة العالية لهذا التطور ، حيث من المتوقع ان يبلغ عدد السكان في مناطقها الساحلية – ذات الارتفاع المنخفض – إلى حوالي 200 مليون نسمة بحلول عام 2030 ، كما أن المناطق الساحلية في الهند وبنغلاديش وإندونيسيا وفيتنام تشهد أيضًا نموًا سكانيًا قويًا ؛ في حين أن تعداد السكان في أفريقيا أقل عدديًا منه في آسيا ، لكن معدلات النمو به تقدر بأنها الأعلى عالمياً ، خاصة في دول غرب إفريقيا لا سيما نيجيريا وبنين وساحل العاج والسنغال(Neumann et al. 2015) .



شـــكل 1.1: تطور الســكان في المناطق الساحلية المنخفضـة (أقـل من 10 متر فوق متوسط مستوى ســطح البحر). القيم المتوقعة لســيناريو متوســط النمو (بناءاً علـى Neumann et al. 2015،).

بالإضافة إلى تزايد السكان في المناطق الساحلية، كذلك فإن تغير أنماط المعيشة (من ارتفاع مستوى استخدام الفرد من المياه) بسبب التوسع الزراعي والتنمية الاقتصادية يؤديان إلي زيادة الطلب في على المياه، لذا فإن النمو الحضري مسؤول عن ارتفاع الطلب المحلي للمياه. ومن ضمن خصوصية المناطق الساحلية أن موارد المياه العذبة معرضة لخطر التملح (ارتفاع نسبة الملوحة) بسبب قربها من البحر او المحيط؛ في حين أن الأمطار والمياه السطحية تشكلان أجزاء واضحة من الدورة الهيدرولوجية، لكن أكبر موارد المياه العذبة من حيث الحجم توجد تحت الأرض في شكل مياه جوفية في الطبقات الجوفية.

هناك العديد من العمليات التي تحدث لطبقات المياه الجوفية الساحلية (شكل 2.1) ، بعضها : مثل تغير المناخ أو الرفع التكتوني ، حيث يلاحظ تأثيرهما على المدى الطويل فقط ، على عكس الأحداث الكارثية – مثل التسونامي أو الأعاصير والعواصف – التي يمكن أن يكون لها عواقب وخيمة في غضون لحظات ، كما تعتبر المناطق المنخفضة مثل الدلتا النهرية أو الجزر المرجانية بشكل خاص اكثر عرضة للخطر ، خصوصاً عند حدوث هبوط للأرض (قسم 2.6) ، كما انه في هذه المناطق يمكن أن يؤدي ارتفاع معدل حدوث ظواهر الطقس الشديدة إلى حدوث مزيدٍ من العواصف المتكررة وغمر سطح الأرض بمياه البحر ، وبالتالي فإن حماية إمدادات المياه العذبة في المناطق الساحلية ترتبط ارتباطًا وثيقًا بحماية الشواطئ ، وكذلك استخدامات الأراضي والتخطيط الحضري .

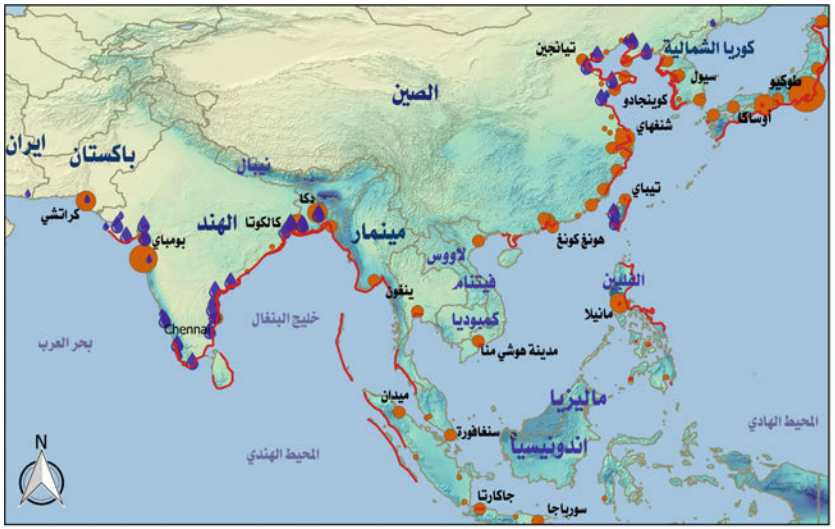
يُعرّف تداخل مياه البحر بأنه إزاحة المياه العذبة في طبقة المياه الجوفية الساحلية بمياه البحر، وقد يكون سبب تداخل مياه البحر طبيعيًا، على سبيل المثال؛ انخفاض التغذية أو ارتفاع مستوى سطح البحر المحلي، ولكن في الغالبية العظمى من الحالات كان الإفراط في استغلال طبقة المياه الجوفية هو الدافع الرئيسي لهذا التداخل.

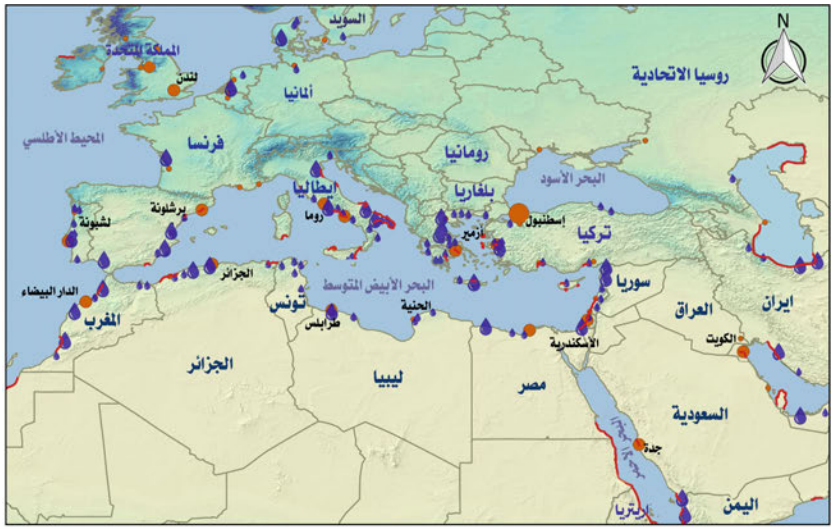
شـكل 2.1: العوامل المؤثرة على طبقـات المـيـاه الـجـوفـيـة الســاحلية وتأثيراتها (معدلة عن *FAO 1997*).

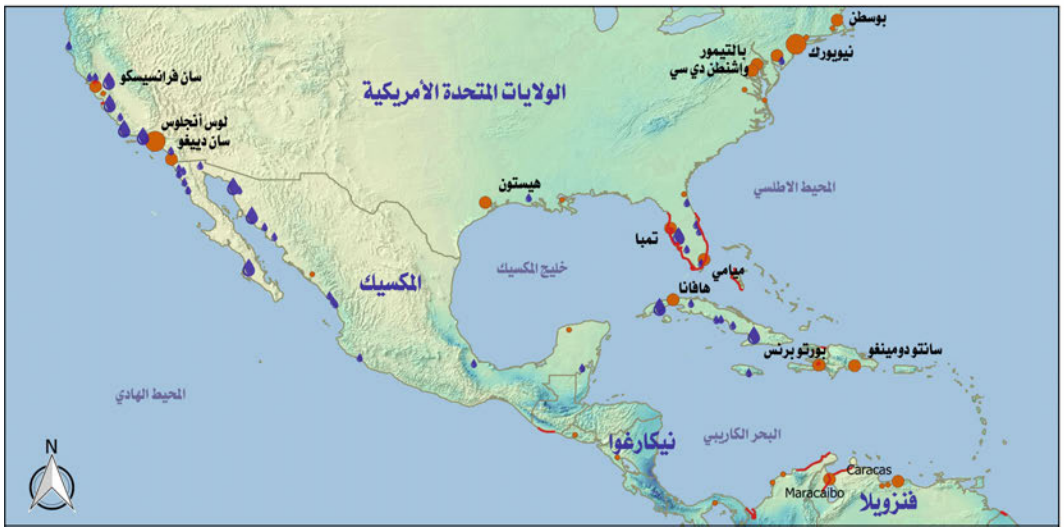
ومثل العمليات الطبيعية تماماً، تسبب الدوافع البشرية المنشأ تداخلاً لمياه البحر على نطاقاتٍ مكانيةٍ وزمنيةٍ مختلفة (White and Kaplan, 2016)، وبما أن ملوحة المياه الجوفية تؤثر أيضًا على جودة التربة المروية، لذا فإن التحكم في الملوحة له أهمية قصوى للقطاع الزراعي والأمن الغذائي للسكان.

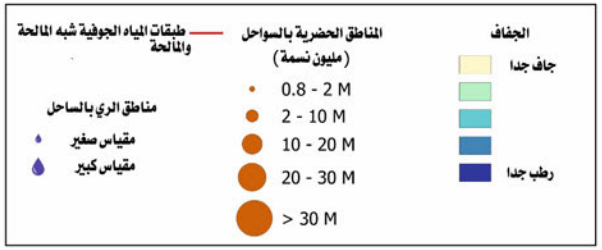
إن إدارة المياه الساحلية تعتبر عملية متخصصة للغاية ، ويتمثل أحد أهدافها الرئيسية في حماية الآبار الإنتاجية من التملح ؛ لذا يجب أن يوازن الطلب المتزايد على المياه مع قدرة طبقة المياه الجوفية على إيصال المياه ذات النوعية الجيدة ، مع التأكد – في الوقت نفسه – من عدم تأثر الوظائف الأخرى للمياه الجوفية ، كمصدرٍ للمياه الجوفية للنظم البيئية ، هذا وقد وضع (Michael et al., 2017) مفهوم "ضغط المياه الجوفية الساحلية" لتوصيف الضغط المتزايد والمستمر على موارد المياه العذبة في طبقات المياه الجوفية الساحلية ، كما أن التهديدات المتعددة وترابط طبقات المياه الجوفية مع أجزاء مختلفة من الدورة الهيدرولوجية الطبيعية والتأثيرات البشرية المنشأ أبرزت الحاجة إلى إدارةٍ متكاملة لموارد المياه (IWRM, Cap–Net 2010) ؛ حيث لا يمكن إدارة المياه الجوفية بشكل منفصل عن موارد المياه الأخرى .

خريطة 1.1 (انظر الصفحة التالية): خريطة جنوب شرق آسيا ومنطقة البحر الأبيض المتوسط وجزء من الأميركتين تبين تواجد المياه الجوفية شبه المالحة أو المالحة في طبقات المياه الجوفية الساحلية حيث المراكز الحضرية والمناطق الزراعية ذات الري المكثف للمياه الجوفية، كما تشير الألوان إلى مؤشر الجفاف.









البيانات

الأراضي المروية أشتقت من بيانات: Siebert et al. 2013 (FAO-University of Bonn)

طبقات المياه الجوفية المالحة: IGRAC 2012

المناطق الحضرية: Nordpil (CC-0), population data are based on the UN World توقعات النمو الحضري لعام 2010 ، ومنها تم استخراج جميع المراكز الحضرية فوق 0.8 مليون نسمة الواقعة ضمن 50 كم من الساحل

الجفاف: توافر المياه يشار إليه بمؤشر الجفاف (New et al.(2002: CRU CL 2.0 data-set

GCS WGS 1984
Cartography: M.Eichholz

BGR

3.1 نظرة عالمية على عوامل الخطر المؤثرة على المياه الجوفية الساحلية

إن التقييم العالمي لتدهور المياه الجوفية الساحلية وتداخل مياه البحر يعتبر مهمة صعبة. حيث يتطلب مراقبة وتحليل محكمين لطبقات المياه الجوفية الساحلية، كما أن هذا النهج غير موجود حاليًا في العديد من المناطق الساحلية بالعالم، ولغرض تحديد المناطق المعرضة لخطر الاستخراج المفرط للمياه الجوفية (أو الإفراط في السحب) وتداخل مياه البحر، يجب الأخذ في الاعتبار الدافعين الرئيسيين للطلب على المياه: (أ) الكثافة السكانية والحضرية؛ (ب) التوسع في الزراعة المروية بالمياه الجوفية بشكلٍ كبير. هذا وأجريت مراجعة عالمية لملوحة المياه الجوفية سنة 2009 من قبل المركز العالمي لتقييم موارد المياه الجوفية(IGRAC) (van Weert et al. 2009; IGRAC, 2012) ؛ حيث حددت الدراسة 103 جسماً من تجمعات المياه الجوفية الساحلية التي ظهر بها تداخل مياه البحر ،وذلك استناداً إلى بيانات المياه الجوفية المنشورة.

تضم الخريطة (1.1) في الصفحة 21 مجموعة بيانات(IGRAC, 2012) المرسومة للمناطق ذات الزراعة المكثفة؛ حيث استخدمت المياه الجوفية للري وكذلك لإمداد المراكز الحضرية بالمناطق الساحلية في ثلاث مناطق كبيرة، وكما هو متوقع لوحظ الري المكثف من المياه الجوفية في المناطق الساحلية ذات الظروف المناخية القاحلة نسبيًا ومواسم الجفاف الطويلة من ناحية، وبالقرب من الأسواق الكبيرة للمنتجات الزراعية من ناحيةٍ أخرى. ومن الأمثلة النموذجية هنا: المناطق الزراعية على طول سواحل كاليفورنيا وباكستان والهند وشمال الصين، وكذلك تلك الموجودة على طول البحر الأبيض المتوسط.

تحتوي أيضًا بعض المناطق الساحلية الرطبة على مياه جوفية مالحة، والتي قد لا ترتبط دائمًا بتداخل مياه البحر فعلى سبيل المثال في جنوب شرق آسيا؛ قد يكون مرتبطًا بعمليات في الماضي الجيولوجي حينما كان الخط الساحلي يقع في داخل اليابسة، كذلك الملوحة العالية الناجمة عن تداخل مياه البحر خلال تسونامي عام 2004 والتي قد تبقى مستمرة على طول بعض السواحل في المحيط الهندي.

2

2. ديناميكية المياه العذبة والمياه المالحة في المناطق الساحلية

تتميز هيدرولوجيا المناطق الساحلية بِسمةٍ فريدةٍ وهي وجود مياهها بخصائص مميزة عن غيرها؛ فهناك مياه البحر من جانب، ومن جانب أخر هنالك مياهٌ عذبة مستمدة من مصادر أخرى داخل اليابسة، ولا تختلف طبقات المياه الجوفية الساحلية اختلافًا كبيرًا عن طبقات المياه الجوفية باليابسة من حيث الخصائص الفيزيائية، ولكن لها ميزتها الخاصة والمتمثلة في الاختلاط والتفاعل بين المياه العذبة ومياه البحر، وهذا الفصل يقدم لمحة موجزة عن أهم الجوانب الهيدرولوجية للمناطق الساحلية.

1.2 الملوحة

يتمثل الاختلاف الرئيسي كيميائيًا بين المياه العذبة ومياه البحر في ملوحتها، والتي يعبر عنها بتركيز مجموع الأملاح الذائبة (TDS)، وغالبًا ما يكون الحد الأعلى لمجموع الأملاح الذائبة بالمياه العذبة حوالي 1000 ملجم/لتر (شكل 1.2). وهناك أقسام أخرى للملوحة بالإمكان تمييزها: هي شبه المالحة والمالحة وشديدة الملوحة؛ وتشير الأخيرة إلى أن تركيز مجموع الأملاح الذائبة بها أعلى من تركيز مياه المحيطات، حيث يحتوي متوسط تركيز مياه المحيطات على 36000 ملجم/لتر وقد تكون هناك اختلافات حول هذه القيمة، فعلى سبيل المثال يمكن أن تكون الملوحة أقل بشكل ملحوظ بالقرب من مصبات الأنهار الكبيرة، أو تكون الملوحة أعلى في المناطق الدافئة ذات التبخر المرتفع.

هذا ويعد المكون الرئيسي لمجموع الأملاح الذائبة في مياه البحر هو أيون الكلوريد الذائب، على الرغم من عدم وجود حد صحي (مسموح به) للكلوريد في مياه الشرب (منظمة الصحة العالمية، 2003)، ولكن الكلوريد يمكن تمييزه بالطعم عند تركيزات تزيد عن 250 ملجم/لتر؛ مما يعني أن مزيجًا من المياه العذبة مع 1٪ فقط من مياه البحر يمكن أن يكون غير مناسبٍ للشرب.

إن الملوحة العالية لمياه البحر تعني أن كثافتها أعلى من المياه العذبة ؛ حيث يكون الفرق نحو 2.5٪ لمياه المحيطات ، في حين أن هذا الاختلاف قد يبدو صغيراً ، إلا أن له آثاراً مهمة على العمليات الفيزيائية التي تحدد جريان مياه البحر إلى طبقات المياه الجوفية المحتوية على مياه عذبة ، وتختلف كثافة مياه البحر اختلافًا كبيرًا بين المواقع ، حيث تكون أقل في البحار الداخلية ذات جريان المياه العذبة ؛ مثل بحر البلطيق ، وقد تكون الكثافة أعلى بسبب التبخر المؤدي إلى فقد رئيسي للمياه ، مثل البحر الميت ، لذلك ينبغي تحديد الملوحة كجزء من أي دراسةٍ في طبقة المياه الجوفية الساحلية .

شكل 1.2: تقسيم المياه الطبيعية إلى فئات ملوحة على أساس مجموع الاملاح الكلية الذائبة في ملجم / لتر (Fetter 1994) .

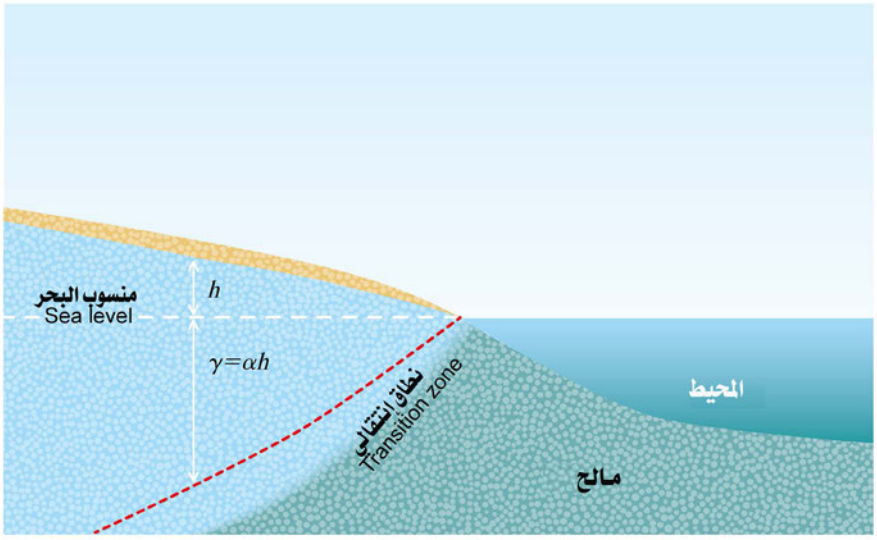
2.2 تفاعل المياه العذبة ومياه البحر في طبقات المياه الجوفية الساحلية

يتم التعبير عن قدرة الوحدة الجيولوجية على توصيل المياه بالتوصيل الهيدروليكي ؛ حيث كلما زادت قيمته زادت سهولة نقل الوحدة الجيولوجية للمياه ، وبناء عليه تنقسم الطبقات الموجودة تحت السطح إلى وحدات تعرف بالطبقات المائية hydrostratigraphic ، حيث تُشكل الطبقات الأكثر نفاذية طبقات المياه الجوفية الحاملة للمياه ، بينما تُشكل الطبقات ذات النفاذية الأقل ما يعرف بالطبقات الصماء ، وتتكون طبقات المياه الجوفية الجيدة من الرمل الخشن أو الحجر الجيري أو الصخور المتشققة ، في حين تشتمل الطبقات الصماء على مواد مثل الطين ، والطفلة أو الحجر الطيني .

وعليه فإنه عند التقاء المياه الجوفية العذبة ومياه البحر المتداخلة في طبقة المياه الجوفية الساحلية ، يتم فصلهما بمنطقة انتقالية (شكل 2.2) ، وفي داخل هذه المنطقة ، تتراوح الملوحة بين المياه العذبة ومياه البحر ، ويعتمد موقع وعرض المنطقة الانتقالية على خصائص نظام المياه الجوفية ؛ فعندما تتصل طبقة المياه الجوفية الساحلية بالبحر هيدروليكياً ، تُشكل مياه البحر المتداخلة وتداً مائياً يخترق اليابسة إلى طبقة المياه الجوفية الساحلية ؛ وهذا الوتد هو نتيجةٌ للكثافة العالية لمياه البحر مقارنةً بالمياه العذبة ؛ حيث يكون ضغط عمود مياه البحر أكبر منه لدى عمود المياه العذبة بنفس العمق . ولهذا السبب، يمكن أن يتم رصد مياه البحر في طبقة المياه الجوفية تحت سطح اليابسة من جهة الشاطئ. ومنها تُشكل المياه الجوفية العذبة بالقرب من الشاطئ جسمًا مائيًا "يطفو" على المياه الجوفية المالحة؛ وعلى درجةٍ من الاتزان لهذا النظام (أي بمعنى ثبات عمود ماء البحر على حاله)؛ ويمكن الحصول على تقدير أولي لسُمك عدسة المياه العذبة باستخدام الصيغة التالية:

$$h\alpha = \gamma$$

حيث γ هو عمق قاع العدسة تحت مستوى سطح البحر و h ارتفاع منسوب المياه فوق مستوى سطح البحر (شكل 2.2). حيث تُعرف هذه العلاقة بمبدأ جيبن هازبيرغ (Ghijben–Herzberg) ، وغالبا ما تكون قيمة العامل α حوالي 40 ، وكنتيجةٍ للاختلاف في الكثافة القياسية بين مياه البحر والمياه العذبة ؛ يجب أن يوضع في الاعتبار استخدام عامل مختلف إذا كان لمياه البحر ملوحةٌ مختلفة عن مياه البحر القياسية ، كما هو موضح في الشكل (2.2) ، فغالبا ما يكون الموقع الفعلي للمنطقة الانتقالية باتجاه البحر من موضع الحد الواضح المقدر باستخدام صيغة جيبن هازبيرغ ؛ كما أن هناك عوامل معقدة يمكن أن تحد بشدة من تطبيق هذه العلاقة مثل الجيولوجيا المحلية أو عمليات المياه الجوفية العابرة ، ورغم ذلك يمكن أن توفر هذه الصيغة مؤشرًا مفيدًا لعمق وتد مياه البحر .



شكل 2.2: رسم تخطيطي لطبقة مياه جوفية ساحلية نموذجية مع وتد من مياه البحر المتداخلة ، توضح الرموز الموجودة بجوار الأسهم البيضاء معنى الرموز في صيغة جيبن هازبيرغ (Ghijben–Herzberg) ، مع ملاحظة أن ارتفاع منسوب المياه الجوفية مبالغ فيه لتحسين إمكانية القراءة ؛ حيث يستند مبدأ جيبن هازبيرغ على افتراض حدود واضحة بين المياه الجوفية العذبة والمالحة (المشار إليها بالخط الأحمر المتقطع) ، وفي الواقع، يكون الانتقال أكثر تدرّجًا ويقع عادةً في اتجاه البحر بشكل أكبر قليلاً مما تنبأت به صيغة جيبن هازبيرغ، كما هو موضح بألوان التعبئة الممثلة للمياه الجوفية العذبة والمالحة .

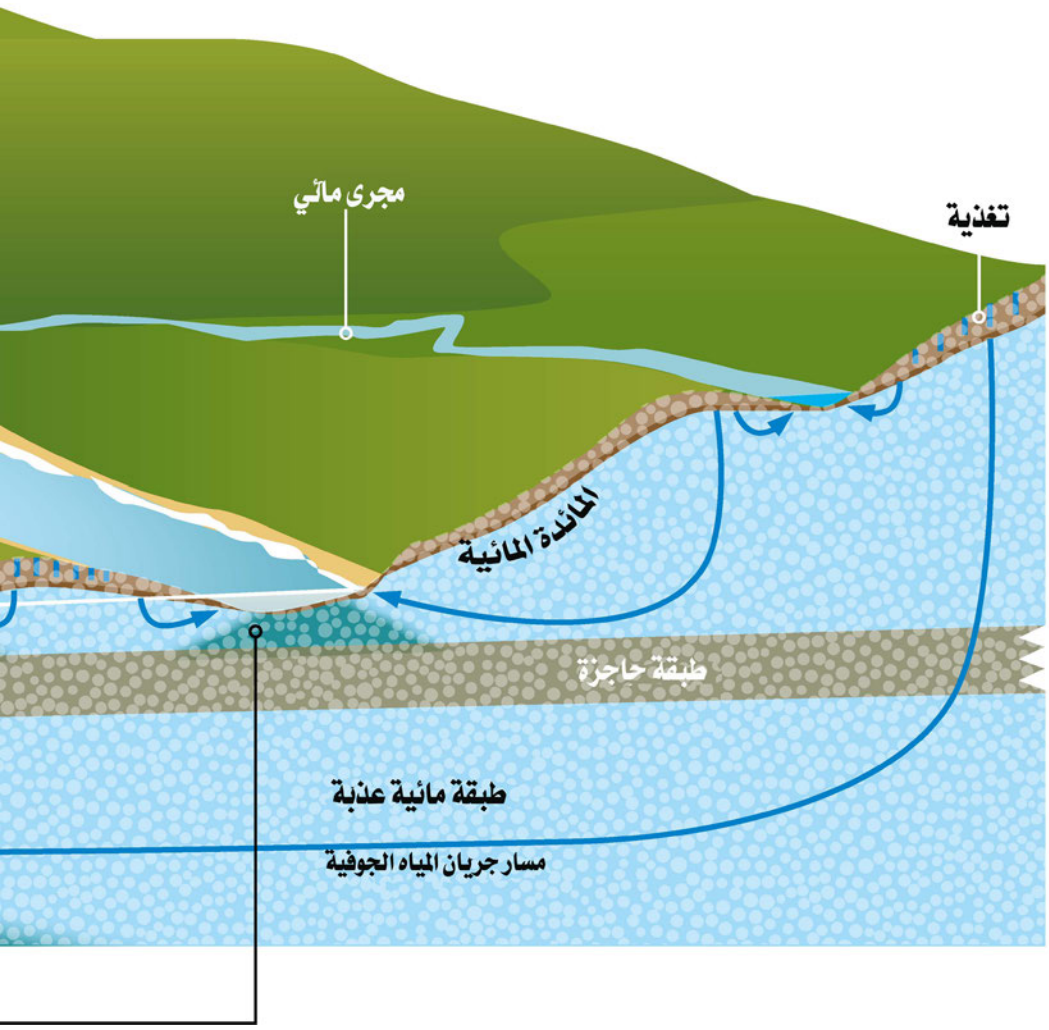
يُشار إلى أن المسافة التي يبرز فيها وتد مياه البحر الي داخل اليابسة هي دلالةٌ لعدد من العوامل:

- *عمليات تغذية وتفريغ المياه الجوفية.*
- *الخصائص الهيدروليكية وهندسة نظام الخزان الجوفي.*
- *فرق الكثافة بين مياه البحر والمياه الجوفية العذبة.*

وبشكلٍ عام، كلما زاد معدل جريان المياه الجوفية العذبة تجاه البحر، كان اختراق وتد مياه البحر في طبقة المياه الجوفية صغيراً، ومع ذلك، بالنسبة لمعدل الجريان نفسه؛ سيؤدي التوصيل الهيدروليكي الأعلى لطبقة المياه الجوفية إلى زيادة المدى الداخلي لعمود المياه المالحة، كذلك فرق الكثافة الأعلى سيكون له نفس التأثير.

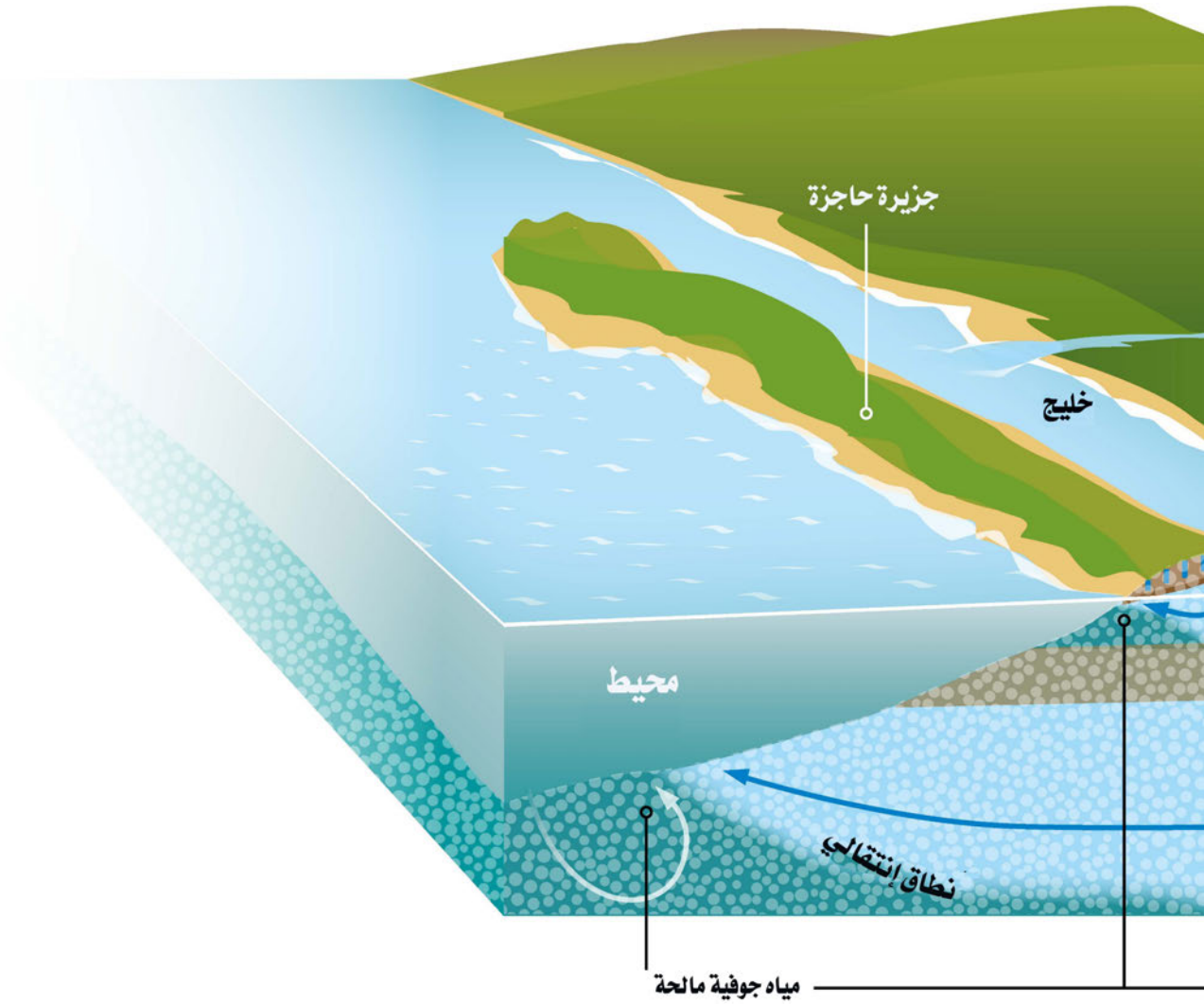
وفي الظروف الطبيعية بدون عملية الضخ، يتوُجه جريان المياه الجوفية العذبة نحو البحر (شكل 2.3)؛ حيث يمكن أن يحدث التصريف في البحر في شكل جريان موضعي من خلال الينابيع البحرية، أو كجريان منتشر، وقبل التصريف تمتزج المياه العذبة مع مياه البحر في طبقة المياه الجوفية، وبالتالي لا يكون الجريان الخارجي عذبًا بحتًا بل شبه مالحاً؛ كما أن المياه الجوفية المالحة داخل الوتد تتحرك رغم ان حركتها

تكون بمعدلٍ أقل من المياه الجوفية العذبة، كذلك تتحرك المنطقة الانتقالية ويتغير شكلها استجابةً للاختلافات الموسمية والسنوية في تغذية المياه الجوفية وتقلبات المد والجزر والتغيرات في مستوى سطح البحر على المدى الطويل.



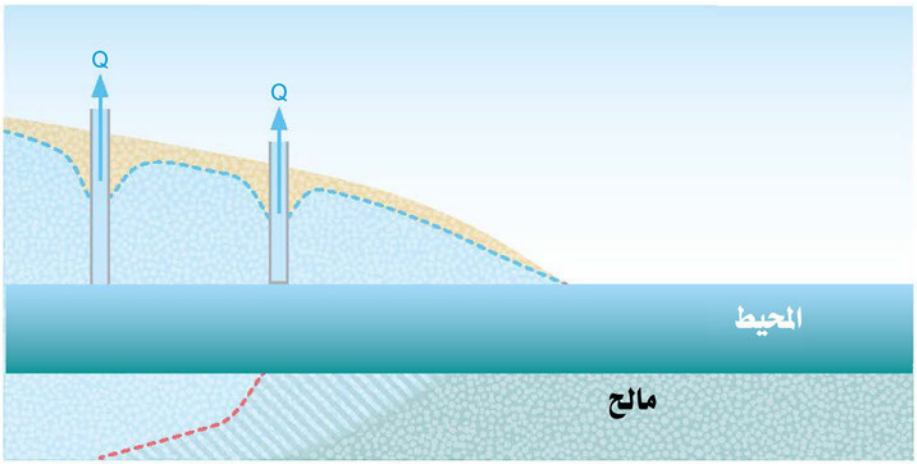
شـــكل 3.2: تفاعل المياه العذبة والمياه المـالحـة في منطقـة ســـاحلية (معدلة من Barlow 2003)؛ يلاحظ تصريف المياه الجوفيـة العـذبـة إلى الـجـداول، وجـداول المد والجزر، والبرك، والمستنقعات المالحة، والخليج والمحيط؛ حيث تشكلت عدسة محليـة من الميـاه العذبـة تحت الجزيرة الحاجزة.

كما يجدر الإشارة إلى أن وضعية وهندسة طبقات المياه الجوفية والطبقات الصماء تتحكم في نمط تداخل مياه البحر؛ حيث من الممكن تواجد مناطقٍ انتقالية متعددة في نظام الطبقات المتعددة للمياه الجوفية (شكل 3.2)، كما وقد تفصل الطبقة الصماء طبقة المياه الجوفية عن مياه البحر المغطية لها، وقد تقع المنطقة الانتقالية في الجزء البحري من طبقة المياه الجوفية.



3.2 تداخل مياه البحر

عندما يتم سحب المياه العذبة بمعدلٍ أكبر من الذي يتم تجديده (التغذية) ، سيتم تعويض الحجم المفقود بالجريان الداخل من مياه البحر ، لذا تتعرض آبار المياه العذبة الموجودة بالقرب بشكل مباشر من المنطقة الانتقالية لخطر التملح (شكل 4.2) ، خصوصاً إذا تم العثور على مياه البحر في طبقة المياه الجوفية بالبئر ، في هذه الحالة يمكن أن تؤدي الحركة الرأسية للمياه الناتجة عن الضخ إلى ما يُعرف بالارتفاع في المياه الجوفية المالحة ، وهو أحد الأسباب الأكثر شيوعًا لتملح الآبار ، و قد تحدث أيضًا الحركة الأفقية لمياه البحر ، ولكن نظرًا لأن المسافات بين آبار الاستخراج وخط الساحل غالبا ما تكون على بعد بضعة كيلومترات ، لذا فإن آثار تداخل مياه البحر بشكل أفقي عادة ما يستغرق ظهورها وقتًا أطول من عملية الحركة الرأسية .



شكل 4.2: تداخل مياه البحر في طبقة المياه الجوفية الساحلية نتيجة للضخ، حيث البئر الأقرب إلى الخط الساحلي يتسبب في دخول مياه البحر بحركةٍ رأسية

هذا وقد قدم Custudio and Bruggeman (1987) بعض القواعد الأولية لتقدير خطر تداخل مياه البحر لأنواع مختلفة من الآبار (شكل 2.5) وفقا للحالات التالية:

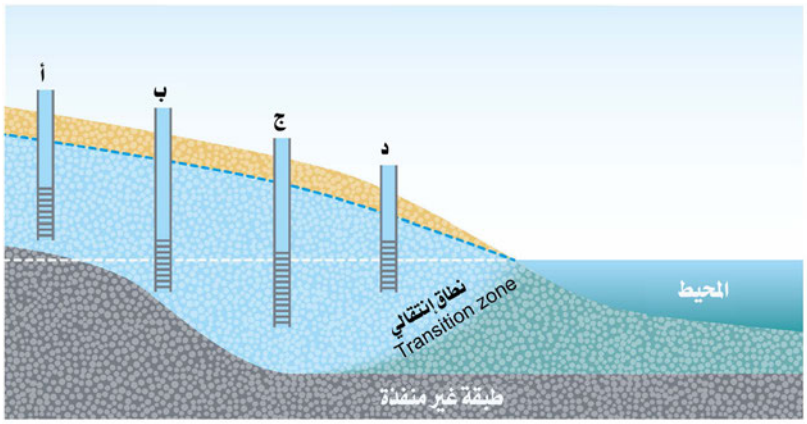
أ- البئر بعيد عن الساحل؛ حيث يكون قاع طبقة المياه الجوفية فوق مستوى سطح البحر، ومن غير المتوقع أن تتداخل مياه البحر بشكل مباشر، ولكن الاستخراج العالي يقلل من السُمك المشبع وإنتاجية الآبار.

ب- البئر بعيد عن الساحل ومن وتد مياه البحر الطبيعي؛ لكن قاع طبقة المياه الجوفية تحت مستوى سطح البحر، لذا من المتوقع أن يصل تداخل مياه البحر إلى البئر عندما يتم استخراج المياه على مدى زمني طويل.

ت- البئر قريب من الساحل؛ ولكنه غير موجود مباشرة فوق وتد مياه البحر، لذلك هناك خطّر ناتج من تداخل مياه البحر في حالة السحب الشديد.

ث- تم حفر البئر فوق وتد مياه البحر؛ لذا يصبح خطر التملح مرتفع جداً حتى مع انخفاض معدلات السحب.

وكما هو الحال تمامًا مع صيغة جيبن هازبيرغ، يمكن أن توفر هذه القواعد الأساسية بعض الإرشادات في غياب بياناتٍ تفصيلية عن المياه الجوفية، ولكن سيتضح لاحقًا بأنه لا يمكن أن تكون إدارة الخزان الجوفي الساحلي ناجحة ما لم يتم الفهم الكامل للتفاعلات المعقدة بين المياه الجوفية العذبة والمالحة.

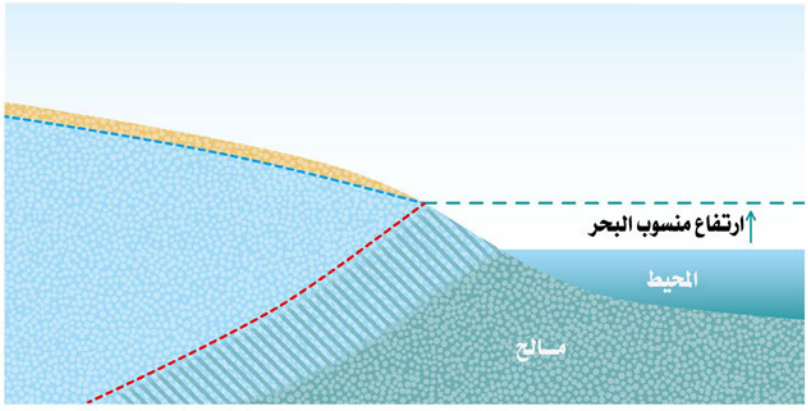


شكل 2.5: خطر تسرب مياه البحر لمواقع الآبار المختلفة. انظر النص لمزيد من المعلومات التفصيلية حول الآبار المعنونة من أ إلى د.

2.4 آثار تغير المناخ وارتفاع مستوى سطح البحر

2.4 آثار تغير المناخ وارتفاع مستوى سطح البحر

حددت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC 2007) مصطلح قابلية (حساسية) نظام طبقة المياه الجوفية الساحلية للتملح على أنه الدرجة "**التي تكون فيها عرضة للتأثيرات الضارة لارتفاع مستوى سطح البحر أو استخراج المياه الجوفية أو غير قادرة على مواجهتها**" ، و لم يتم النظر بشكلٍ صريح في هذا التعريف حقيقة أن التغيرات في درجة الحرارة وهطول الأمطار قد تؤدي إلى تغيير في التغذية للمياه الجوفية ، فعندما تنخفض التغذية، أو يمتد الجفاف لفترات زمنية أطول مما كان عليه في ظل المناخ الحالي ، سيزداد الضغط على موارد المياه الجوفية ، خصوصا عندما تسبب درجات الحرارة المرتفعة إلى ارتفاع معدلات التبخر، وبالتالي زيادة الطلب على المياه للاستهلاك المحلي والري . ومن جهةٍ أخرى، عند زيادة التغذية؛ يمكن أن يؤدي ارتفاع منسوب المياه إلى زيادة تخزين المياه العذبة في طبقات المياه الجوفية، لذا فإن إحدى المشاكل التي يواجهها مديرو المياه تتمثل في التطورات المستقبلية لأنماط الطقس، ومنها الصعوبة البالغة في التنبؤ بالتغذية والطلب، وبالتالي فأمرهما مبهم إلى حد كبير.



شـــكل 6.2: تأثير ارتفـاع منســـوب البحر على طبقـة مياه جوفية ساحلية نموذجية.

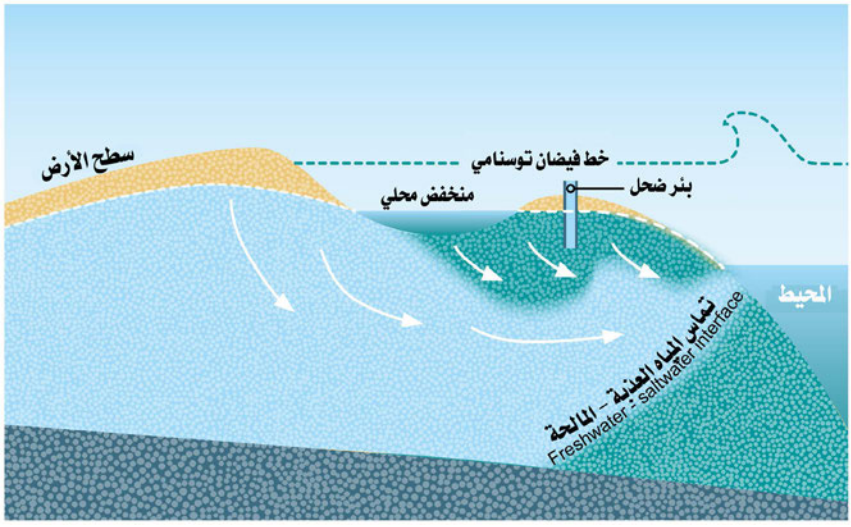
من المتوقع أن ترتفع مستويات البحر بعدة دسميترات على طول معظم سواحل العالم خلال القرن الحادي والعشرين ، كما من الصعب نظريا توقع حجم التأثير الناجم عنه على توافر المياه الجوفية العذبة ، نظرا لاعتماد حجم هذا التأثير بشكلٍ كبير على الظروف الهيدرولوجية المحلية ، و في معظم الحالات من المتوقع أن يؤدي ارتفاع مستوى سطح البحر إلى فقدان المياه الجوفية العذبة بسبب نشوء وتد من مياه البحر (شكل 6.2) ، وارتفاع معدل حدوث الفيضانات (قسم 5.2) ، ولكن في بعض الحالات ، قد يؤدي ارتفاع مستوى سطح البحر إلى زيادة توافر المياه العذبة ، والذي يبدو غير منطقي تمامًا ، ولكن من المتوقع حدوثه ؛ بسبب أن ارتفاع مستوى سطح البحر قد يعزز تخزين المياه العذبة برفع منسوب المياه دون التأثير على موضع واجهة تماس المياه العذبة بالمالحة ، و هذا هو الحال بالنسبة لجزر مرجانية محددة (White and Falkland, 2010) ، ولكن في حال لم يكن هناك ارتفاعٌ لمستوى البحر مصحوبًا بفقدان للأراضي بسبب التعرية الساحلية الزائدة أو بسبب الفيضانات في المناطق المنخفضة ، كما قد أكد Ferguson and Gleeson, (2012) بأن معظم طبقات المياه الجوفية الساحلية تعد أكثر حساسية لاستخراج المياه الجوفية من حساسيتها للارتفاع المتوقع لمستوى سطح البحر ، و هذا ما يعزز حقيقة أن الاستخدام البشري للمياه هو المحرك الرئيسي لتداخل مياه البحر .

على الرغم من أن تغير المناخ في المستقبل يمثل مصدر قلقٍ حقيقي ومستجد، إلا أن توزيع الملوحة في العديد من طبقات المياه الجوفية الساحلية يرجع جزئيًا إلى الظروف الهيدرولوجية التي كانت سائدة في الماضي؛ حيث ان مستويات البحر ومواقع السواحل ومعدلات التغذية كانت متغيرة دائمًا عبر الازمنة الجيولوجية، كما لا يزال أثر مياه البحر موجوداً في نظام طبقة المياه الجوفية بالمناطق الساحلية، حينما كان خط الساحل داخل اليابسة، وهو ما كان عليه الحال في العديد من المناطق الساحلية خلال آلاف السنين الغابرة.

من جهةٍ أخرى، خلال الفترات الجليدية من العصر الرباعي، حدث جفافٌ لمناطقٍ واسعة من قاع البحر ومنها تشكلت احتياطيات المياه العذبة، والتي بقيت محفوظة تحت قاع البحر في مواقع عديدة حول العالم، لذلك تُظهر مثل هذه التعقيدات أن التوقعات المستندة على التمثيلات المبسطة جدا للعمليات الطبيعية والدوافع البشرية في المناطق الساحلية، يمكنها أن تكون مضللة (القسم 3.3).

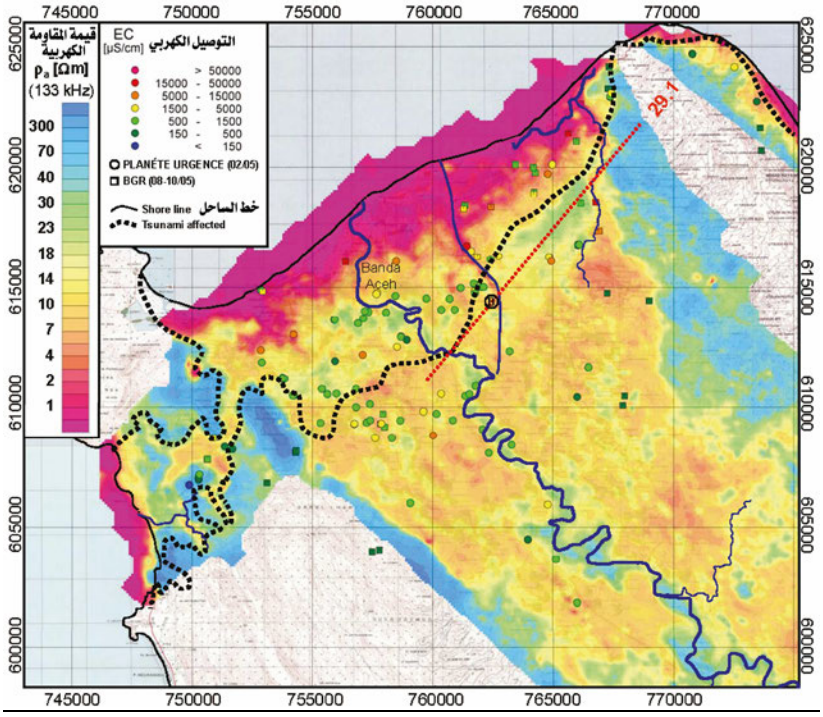
5.2 آثار الكوارث الطبيعية على طبقات المياه الجوفية الساحلية

جدير بالذكر إلى أن المناطق الساحلية المنخفضة مُعرّضةً للعواصف الاعصارية والتسونامي ، فبالإضافة إلى تأثيرها المباشر و المدمر على حياة البشر والبنية التحتية ، فإنها أيضاً تشكل تهديدًا لموارد المياه الجوفية العذبة ، فخلال الفيضانات تتسرب مياه البحر إلى التربة وتلوث المياه الجوفية العذبة (Villholth and Neupane 2011) ، كذلك تعتبر المنخفضات الطبوغرافية والآبار المحفورة ذات القطر الكبير مُعرضةً بشكلٍ خاص لتداخل مياه البحر ؛ نظرا لتجمع مياه البحر بها حيث لا يحدث جريان إلى البحر بعد حدوث الكارثة (شكل 2.7) ، وهذا التأثير هو الأعلى لطبقات المياه الجوفية غير المحصورة ، حيث تتمتع طبقات المياه الجوفية الأعمق و المحصورة بحماية أفضل نسبيًا من المخاطر قصيرة المدى ولكنها قد تعاني أيضًا من عواقب سلبية على المدى الطويل . (Cardenas et al. 2015)



شكل 7.2: رسم نموذجي يوضح غمر مياه البحر بسبب تسونامي. حيث أنه خلال التسونامي، تملأ مياه البحر المنخفضات المحلية وتفتح الآبار المحفورة وتلوث المياه الجوفية، معدلة من قبل. (Villholth and Neupane 2011)

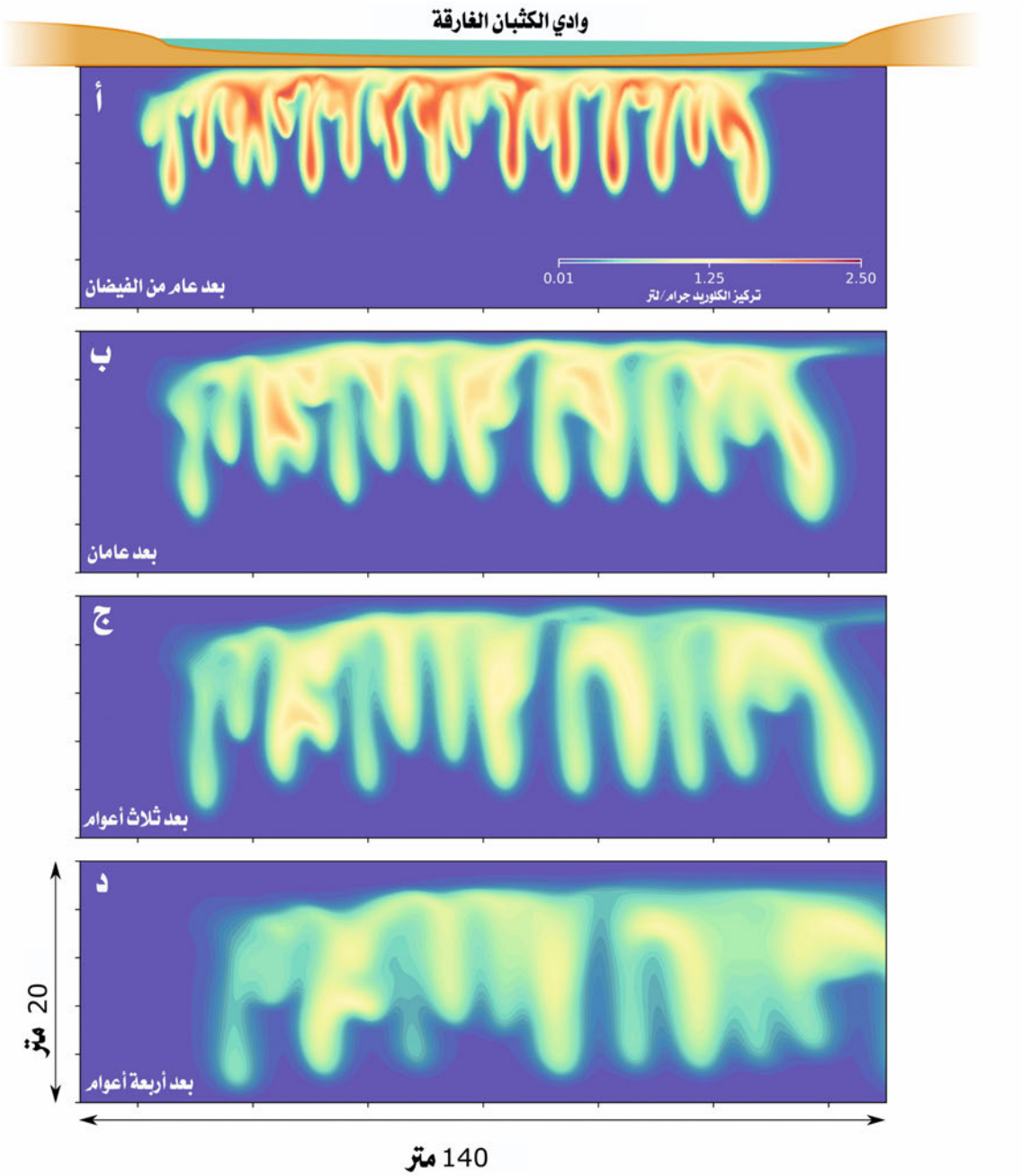
هذا وقد تم رصد تملح المياه الجوفية بعد كارثة تسونامي عام 2004 في الهند وسري لانكا وإندونيسيا.(Villholth and Neupane 2011) ؛ وقد تسبب هذا التسونامي في إندونيسيا في تلوث الآلاف من آبار المياه الضحلة في المنطقة الساحلية من مقاطعة نانغغرو آتشيه دار السلام في شمال سومطرة (Siemon and Steuer 2011) ؛ حيث ألحق الزلزال أضرارًا بنظام شبكة إمدادات المياه ولم تنجح العديد من عمليات الحفر الجديدة في العثور على مياه صالحة للشرب بسبب نقص المعرفة بالظروف الهيدروجيولوجية المحلية ، وبالتالي تعرضت إمدادات المياه لخطرٍ شديد . كما أظهرت الاستقصاءات الجيوفيزيائية الجوية وجود المياه المالحة على بعد عدة كيلومترات داخل اليابسة بعد تسعة أشهر من الكارثة (شكل 8.2).



شـــكل 8.2: المقاومة الكهربـائيـة للمياه الجوفية الضـــحلة في الجزء الشـمالي لمنطقة المسح باندا آتشيه بعد تسعة أشهر من حدوث التسونامي في 2004. تشـــير قيم المقـاومـة المنخفضـــة إلى ارتفاع ملوحة المياه الجوفية، وقد تم رســـم عينات التوصـــيـل الكهربي (النـقـاط والمربـعـات الملونة)، والحد الأقصى لفيضـــان تســـونامي (الخط الأسود المتقطع) والأنهـار الرئيســـيـة (الخطوط الزرقـاء) في أعـلـى الـخـارطـة (Siemon and Steuer, 2011).

يحدث تملح المياه الجوفية الضحلة أيضاً بعد العواصف الاعصارية ؛ مثل ما حدث أثناء إعصار هايان في جزيرة سمر بالفلبين في عام 2013 ؛ حيث وصل ارتفاع مياه البحر إلى 7 أمتار فوق متوسط مستوى سطح البحر ، مما أدى إلى تلوث الخزان الجوفي العلوي عن طريق تسرب مياه البحر من سطح الأرض ، وبالتالي حدث تلوث لطبقة المياه الجوفية العميق والمحصورة بسبب الآبار الأنبوبية الغير محكمة الإغلاق ، مع ان الملوحة انخفضت بشكلٍ ملحوظ بعد 8 أشهر ، ولكن من المتوقع أن تظل الملوحة – في طبقة المياه الجوفية الضحلة غير المحصورة – عاليةً لعدة سنوات ، وعليه يظل خطر تلوث المياه العذبة العميقة قائماً .

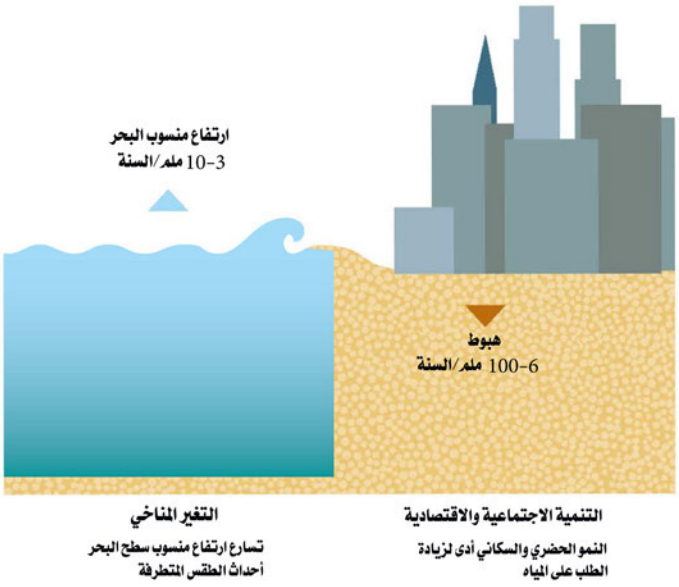
يوضح الشكل (9.2) آثار فيضانٍ عام 1962 على ملوحة المياه الجوفية في جزيرة بالتروم Baltrum شمال ألمانيا. وأحد الجوانب المهمة المُلاحظة هو سرعة تلوث المياه العذبة نظرا لغوص مياه البحر إلى الأسفل على شكل أصابع ملحية بسبب كثافتها الأعلى من المياه العذبة . إلا أن هذا الاختلاف في الكثافة يقل بمرور الزمن بسبب تأثيرات الخلط ، مما يعني أن أصابع الملح لا تغوص الى حدٍ أعمق ويتم دفعها بالجريان الجانبي للمياه الجوفية الطبيعية . بناءً على ذلك. في حين أن تدمير المورد سريع (أسابيع إلى شهور) ، عند المقارنة باستعادة مستويات الملوحة الطبيعية البطيء جدًا (بالسنوات) .



شكل 9.2: مقاطع عرضية تظهر نمذجة تركيزات الكلوريد بعد غرق وادٍ عرضه 100 متر من الكثبان بمياه البحر في جزيرة بالتروم الألمانية خلال عاصفة الفيضان عام 1962، تشير الألوان إلى تراكيز الكلوريد خلال السنوات بعد (أ) 1 و (ب) 2 و (ج) 3 و (د) بعد 4 أعوام من الفيضان

6.2 هبوط الأرض

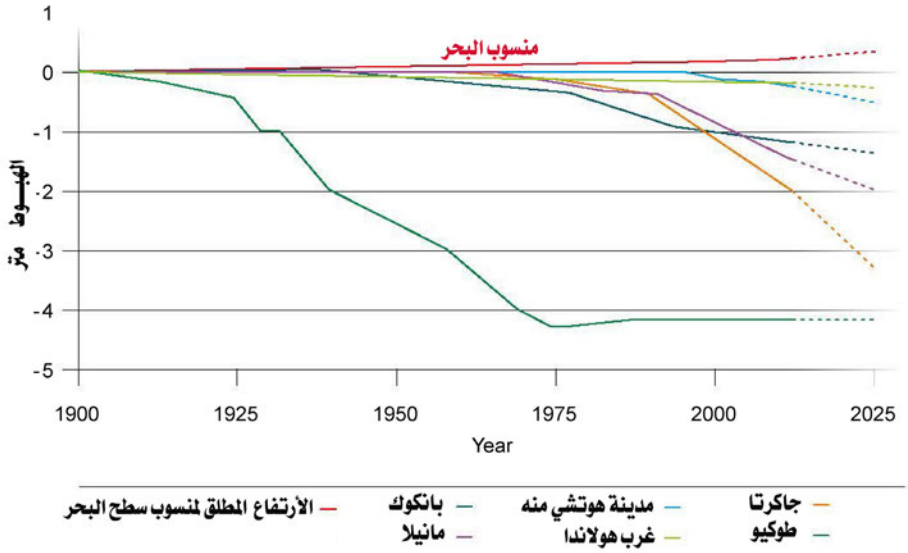
من الممكن أن يكون انخفاض سطح الأرض بالنسبة لمستوى سطح البحر محفزًا آخر لتداخل مياه البحر (شكل 10.2). فالمناطق الساحلية المعرضة لهبوط الأرض هي تلك التي تحتوي على طبقاتٍ واسعة من الطين والخث ، وهناك ما يقرب من نصف مليار شخص يعيشون في مناطق الدلتا المهددة بسبب هبوط الأراضي (Syvitski et al., 2009) ، حيث يكمن السبب الرئيسي في فقدان الدعم الهيكلي لحبيبات الصخر في باطن الأرض ، والذي يرجع أساسًا إلى إزالة المياه الجوفية عن طريق الضخ المفرط (USGS, 2016) ، سبب آخر لهبوط الأرض هو انخفاض منسوب المياه الجوفية عن طريق تصريف الأراضي ، والذي يمكن أن يكون مسؤولًا عن الأكسدة الضخمة للكربون العضوي للتربة في مناطق الخث .



شكل 10.2: الآثار التراكمية لارتفاع مستوى سطح البحر وهبوط الأرض) بناءً على (Deltares, 2015.

يتطلب التوسع الحضري السريع كمياتٍ هائلة من المياه للإمدادات المنزلية والصناعية، مما يؤدي غالبًا إلى الإفراط في استغلال موارد المياه الجوفية، فعلى سبيل المثال؛ في مدينة دكا في بنغلاديش يتسبب استمرار الاستخراج الحالي على نطاقٍ واسع في انخفاض مناسيب المياه الجوفية بمقدار 2–3 متر سنويًا (Deltares 2015) .أيضاً يتسبب استخراج المياه الجوفية في الهبوط الحاد للأراضي ، كما تحدث ظروف مماثلة في مدن ساحلية أخرى مثل جاكارتا (إندونيسيا) ، ومدينة هو تشي منه (فيتنام) ، وبانكوك (تايلاند) ، ويبلغ المتوسط الحالي للارتفاع العالمي لمستوى سطح البحر حوالي 3 مم/ سنة.

ومن المتوقع أن يزداد هذا المعدل في المستقبل (IPCC, 2013). ولكنه لا يزال ضئيلاً إلى حد ما مقارنة بمعدلات هبوط تتراوح من 6–100 ملم / سنة في بعض المدن الكبرى (شكل 11.2)، وهذا يسلط الضوء مرة أخرى على حقيقة أن السلوك البشري هو عامل الخطر الرئيسي لتداخل مياه البحر.



شكل 11.2: الارتفاع المطلق لمستوى سطح البحر ومتوسط انخفاض اليابسة في العديد من المدن الساحلية [ملاحظة: يمكن أن يختلف الهبوط بشـــكل كبير داخل منطقة المدينة، اعتمادًا على مســـتوى المياه الجوفية والخصائص تحت السطحية (Deltares 2015)].

3. تحديات إدارة المياه في المناطق الساحلية

3

تتنوع الأنشطة البشرية المؤثرة على أنظمة المياه الجوفية الساحلية وتعددت أوجهها في سحب المياه من طبقات المياه الجوفية الساحلية، وقد أشير إلى هبوط الأرض فعليا بالفصل السابق، ولكن التغيير في استخدام الأراضي، وتحوير الأنهار والتعدين هي أيضًا دوافع مهمة لتداخل مياه البحر (شكل 2.1).

يقدم هذا الفصل حالاتٍ دراسية من مناطقٍ ساحليةٍ مختلفة لتوضيح الآثار المتنوعة للأنشطة البشرية وما يترتب عليها من تحديات لإدارة المياه في المناطق الساحلية

1.3 النمو السكاني السريع (دار السلام، تنزانيا)

خريطة 1.3: موقع دار السلام، تنزانيا

نبذة

تعد دار السلام (خريطة 1.3) أحد أسرع المراكز الحضرية نمواً في إفريقيا ؛ في حين كان عدد سكان دار السلام 128000 في عام 1957 ، بلغ التعداد الحالي حوالي 4.1 مليون ، وبحلول عام 2030 من المتوقع أن يصل لأكثر من 10 ملايين نسمة ؛ لتصبح هذه المدينة بمنزلة " المدينة العملاقة megacity " في أفريقيا (African Development Bank, 2014) ، ووفقًا لـ Skinner and Walnycki (2016) فقد أُنشئ في عام 2013 خط أنابيب مياه لتزويد 51 ٪ من سكان دار السلام ؛ حيث كان المصدر الرئيسي لهذه المياه نهر روفو القريب من المدينة وطبقة المياه الجوفية المعروفة باسم كيمبيجي ؛ وهي طبقة مياهٍ جوفية يصل عمقها إلى 600 متر ، يحصل بقية السكان – والذي يعيش معظمهم في مستوطناتٍ غير رسمية وذات دخلٍ منخفض وغير مرتبطة بالشبكات العامة – على المياه من طبقة المياه الجوفية الضحلة تحت المدينة ؛ ما سبّب تداخلاً لمياه البحر في وسط المدينة بالقرب من الساحل ، وتجاوزت قيمة تركيزات الكلور الـ 250 ملجم/ لتر ، متخطيةً الحد المسموح به في مياه الشرب من قبل منظمة الصحة العالمية.

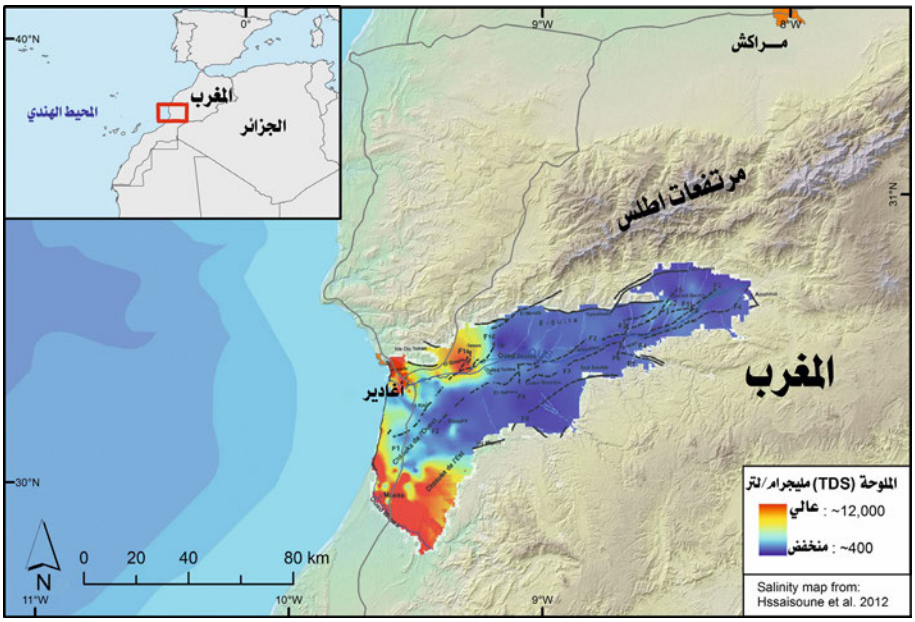
الآثار

أدى النمو الحضري السريع إلى تداخل مياه البحر بطريقتين: فمن جانب؛ قلّلت التغيرات الهائلة في استخدامات الأراضي من تسرب مياه الأمطار بسبب انتشار المستوطنات الجديدة والبنية التحتية الحضرية في السهل الساحلي، وبالتالي تقليل التغذية لطبقة المياه الجوفية الضحلة بالمياه العذبة، ومن جانبٍ آخر؛ يتزايد بسرعة سحب المياه من طبقة المياه الجوفية الضحلة لغرض تلبية الطلب العالي (Sappa and Luciani, 2014)، كما أنه يتواجد حاليًا ما فوق الـ 10,000 بئر غير مرخص تم حفرها بطبقة المياه الجوفية الضحلة.

لمعالجة هذه المشاكل، هناك حاجة إلى العديد من التدخلات المتعلقة بخدمات المياه والتنمية الحضرية والتخطيط البيئي؛ حيث إن مد شبكةِ أنابيب لإمداد المياه يمكن أن يكون بديلاً عن استخراج المياه من طبقة المياه الجوفية الضحلة الغير خاضع للرقابة والغير القانوني، لكن هذا الامر قد يستغرق سنوات لبناء شبكة توفر مياه الشرب لجميع المستوطنين، وحتى لو تم توصيل شبكة المياه إلى الأحياء الفقيرة، كما أنه قد لا يمكن للفقراء تحمل تكاليف التوصيل والتشغيل، وبالتالي قد يختارون مواصلة استخدام المياه الجوفية.

لذا فأن الإصلاح المؤسسي ضروري للسيطرة على جميع موارد المياه المختلفة وإدارتها ؛ حيث تحتاج جميع مصادر المياه المركزية (المياه السطحية والخزانات الجوفية العميقة) واللامركزية (الخزانات الجوفية الضحلة) ، جميعها تحتاج إلى إدارةٍ متكاملة ومترابطة (Sappa and Luciani, 2014) ، وحتى الوقت الحالي ، لاتزال المياه المزودة بالأنابيب ومياه طبقة المياه الجوفية الضحلة تدار من قبل مؤسساتٍ مختلفة ، ولغرض الإدارة المستدامة التي تحول دون حدوث المزيد من تداخل مياه البحر من الضروري وجود مظلة مؤسسية واحدة منسقة ، كما يجب أن تكون الإدارة قائمة على البيانات ، الأمر الذي يتطلب مراقبة منهجية لطبقة المياه الجوفية الضحلة ، وكذلك للتقلبات في إمدادات المياه واستهلاكها(Skinner and Walnycki, 2016) .

2.3 التوسع في الزراعة المروية (حوض سوس ماسة، المغرب)



خريطة 2.3: مجموع الأملاح الذائبة (TDS) لموارد المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية الضحلة (Hssaisoune et al. 2012)

نبذة

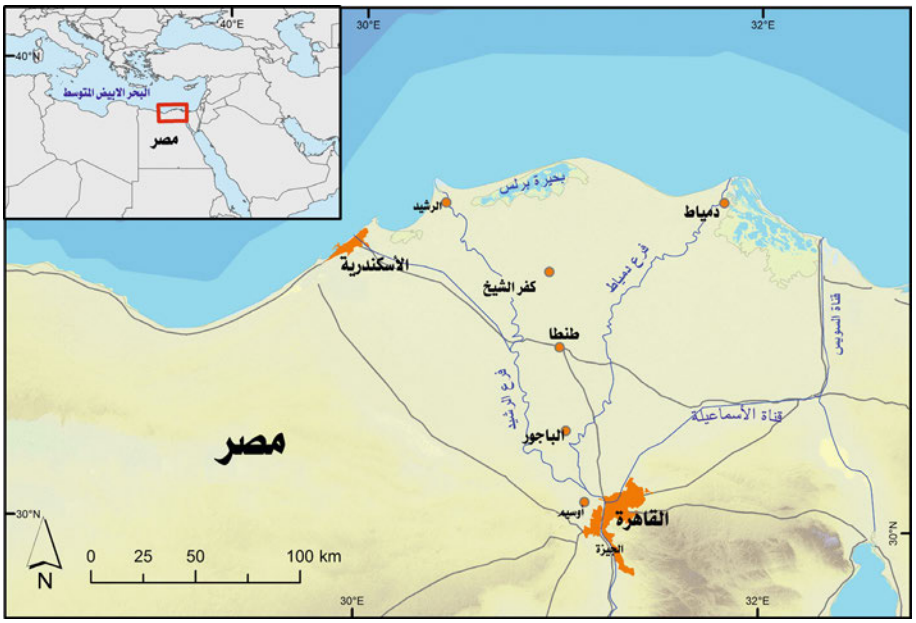
بسبب الزراعة المروية عالية الإنتاجية وصناعة السياحة يعد حوض سوس ماسة الواقع على ساحل المحيط الأطلسي في وسط المغرب منطقة أساسية للتنمية الاقتصادية للبلاد ، حيث ازدادت التنمية الزراعية بشكلٍ ملحوظ منذ الثمانينيات وأصبحت ذات توجه قوي نحو التصدير ، في عام 2008 نفذت الحكومة المغربية خطة المغرب الأخضر ("Plan Maroc Vert") ؛ وهي خطة تنمية قطاعية شاملة للزراعة تتضمن استثمارًا سنويًا بقيمة 1 مليار دولار أمريكي من 2008 إلى 2020 لغرض تحسين الإنتاج وزيادة صادرات المنتجات الزراعية ، وهذا بدوره ما سيضع ضغوطا إضافية على الموارد المائية المحدودة ، كما يعد حوض سوس ماسة حالياً ثاني أكثر المناطق الزراعية إنتاجيةً في المغرب ، خصوصا للخضروات والحمضيات ، وتبلغ المساحة المزروعة 160410 هكتار ، حوالي 50٪ منها زراعات مروية (Choukr-Allah, 2016) ، وتتمتع المنطقة بمناخٍ جاف ؛ حيث يبلغ متوسط هطول الأمطار السنوي حوالي 250 ملم (Bouchaou et al., 2008) ، كما أن هطول الأمطار غير منتظمٍ بشكلٍ متزايد ، ويتم الحصول على المياه في الغالب من المياه الجوفية أو من المياه السطحية المخزنة في خزانات السدود السبعة ، ولكن الطلب على المياه الزراعية يتجاوز بكثير قدرة الإمداد المستدامة .

الآثار

يُظهر الوضع في حوض سوس ماسة تحديات الجمع بين التوسع الزراعي والإدارة المستدامة للمياه الجوفية. حيث سبب استخراج المياه الجوفية في انخفاض مستويات المياه ما بين 0.5 إلى 2.5 متر في السنة، بالإضافة الى زيادة الملوحة، ولا يرتبط التملح فقط بتداخل مياه البحر ولكن أيضًا بالحركة الرأسية لمياه البحر القديمة المحصورة في طبقة المياه الجوفية وكذلك بسبب إذابة معادن المتبخرات، وفي الوقت نفسه؛ ترتفع تركيزات النترات بالمياه الجوفية بسبب استخدام الأسمدة،(Bouchaou et al., 2008) ، كما تظهر طبقات المياه الجوفية الضحلة في الجزء الغربي من الحوض مستوياتٍ عاليةٍ من الملوحة (خريطة 2.3).

من أجل تقليص الطلب؛ يتمثل الهدف الرئيسي أيضًا في زيادة كفاءة الاستخدام لمياه الري، من خلال تعزيز ودعم أنظمة الري بالتنقيط التي تحل محل أنظمة الغمر والرش (Closas and Villholth 2016)، عليه وضعت هيئة إدارة المياه خطة الإدارة المتكاملة للموارد المائية للحوض وطورت تشريعات تهدف إلى تحويل الزراعة نحو زيادة كفاءة المياه والتحكم في استخراج المياه الجوفية، ومع ذلك؛ لا يزال الامتثال للوائح الجديدة وإنفاذها يمثل تحديًا في سياق التطور الطموح للقطاع الزراعي في الحوض (Choukr-Allah et al., 2016).

3.3 الاستخدام غير المنظم للمياه الجوفية والثغرات المعرفية (دلتا النيل ، مصر)



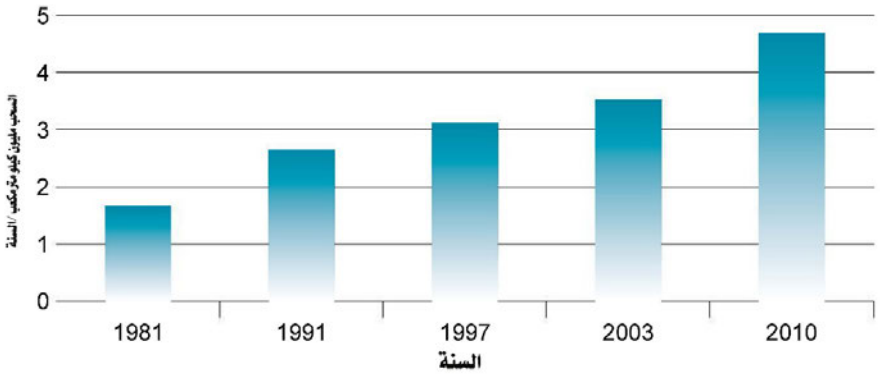
خـريـطـة 3.3: خريطة موقع دلتا النيل، مصر

نبذة

تعد الزراعة المروية في دلتا النيل (خريطة 3.3) ذات أهميةٍ حيويةٍ بالنسبة للاقتصاد المصري ؛ حيث توفر فرص عملٍ لأكثر من 2 مليون شخص ، كما ويتركز بدلتا النيل حوالي 65٪ من المساحة المروية بالدولة (Molle et al., 2016) ، على الرغم من أن مياه الري مصدرها في المقام الأول نهر النيل ، إلا أن استخدام المياه الجوفية آخذ في الارتفاع (شكل 1.3) ؛ حيث زاد عدد الآبار المسجلة زيادة حادة خلال السنوات الأخيرة (جدول 1.3) ، وفي حين تم تسجيل ما يزيد قليلاً عن 32000 بئر رسميًا في عام 2016 ، ولكن قُدر العدد الحقيقي بأعلى من 73000 بئر (Molle et al., 2016) ؛ خصوصا عندما تنخفض إمدادات المياه السطحية يستخدم عدد متزايد من المزارعين المياه الجوفية للتغلب على الندرة (El-Agha et al., 2017) ، كما تُظهر السجلات التاريخية زيادةً مستمرة في معدلات السحب بين عامي 1981 و 2010.

جدول 1.3: تطور عدد الآبار في دلتا النيل من 1952 إلى 2016 (Molle et al. 2016).

السنة	عدد الآبار
1952	5,600
1991	13,000
2011	22,905
2016	32,054



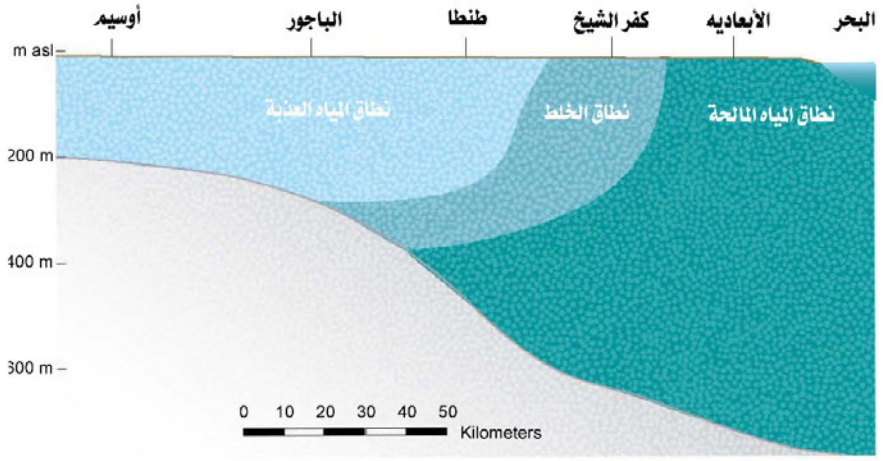
شكل 1.3: معدلات السحب مقابل الزمن في دلتا النيل، مقتبس من Mabrouk et al.2013)

تحت سطح دلتا النيل يتواجد نظام طبقة مياه جوفية كبيرة تتكون من رواسب غير متصلبة (Leaven, 1991)، ويحد خطر تداخل مياه البحر واحتمال واحتمالية تملح المياه الجوفية العميقة من حجم المياه العذبة التي يمكن سحبها، كما إن استخدام المياه الجوفية في دلتا النيل غير منظم إلى حدٍ كبير، على الرغم من وجود إجراءات لتصاريح حفر للآبار، إلا أن العديد من المزارعين ليسوا على دراية بهذه الإجراءات ولا تزال عملية تسجيل الآبار الزراعية استثناءً (El-Agha et al., 2017).

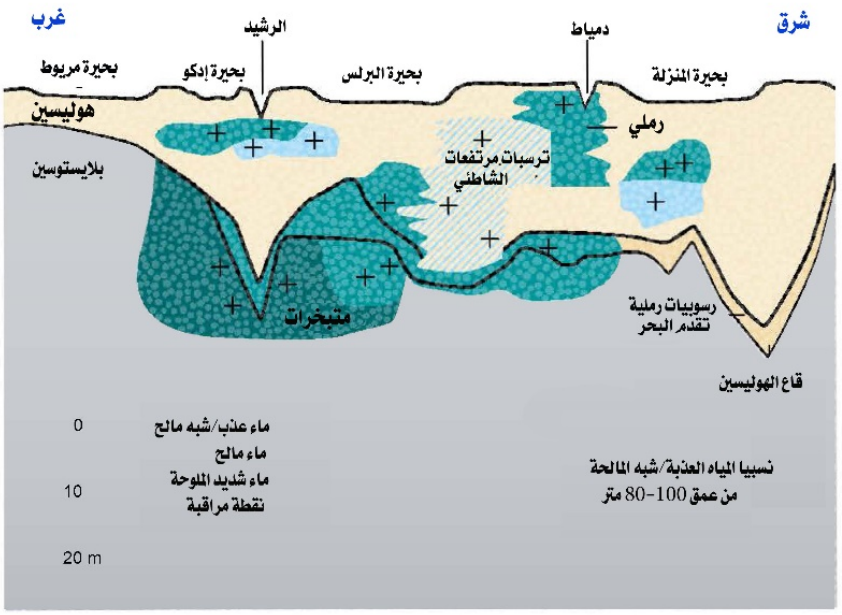
الآثار

بسبب الافتقار إلى بيانات رصد المياه الجوفية وهو ما يمنع تطوير مفهوم الإدارة المستدامة للمياه الجوفية، لذلك اقترحت نماذج مفاهيمية مختلفة لطبقة المياه الجوفية، ففي حين يرى البعض أن هناك جسمًا واحدًا من مياه البحر المتداخلة يمتد نحو 100 كيلومتر داخليًا من ساحل البحر الأبيض المتوسط مثل (Sherif et al., (2012، يرى البعض الآخر أن هناك العديد من الأجسام المنفصلة من المياه الجوفية المالحة التي لها أصول مختلفة (Kooi and Groen, 2003). ويتجلى ذلك من خلال المقطعين العرضيين في الشكلين (2.3) و(3.3) اللذان يصوران نموذجين مفاهيميين متناقضين للنظام نفسه؛ على الرغم من اختلاف اتجاه المقطعين (الشمال والجنوب مقابل الشرق والغرب)، وهذا ما يُظهر بوضوح الرؤى المختلفة حول نفس النظام من خلال المستقصيين المختلفين.

من الواضح أن هذا التناقض يمثل مشكلة، نظراً لان المفهوم النظري المناسب لنظام طبقة المياه الجوفية شرطًا مسبقًا للإدارة الفعالة، علاوةً على ذلك لا يمكن بدونه الاعتماد على تنبؤات التطورات المستقبلية من خلال النماذج الرياضية؛ كما إن هناك خطر حدوث تدهور كبير في موارد المياه العذبة إذا استمر استخراج المياه الجوفية في الزيادة دون رادع (Dawoud 2004).

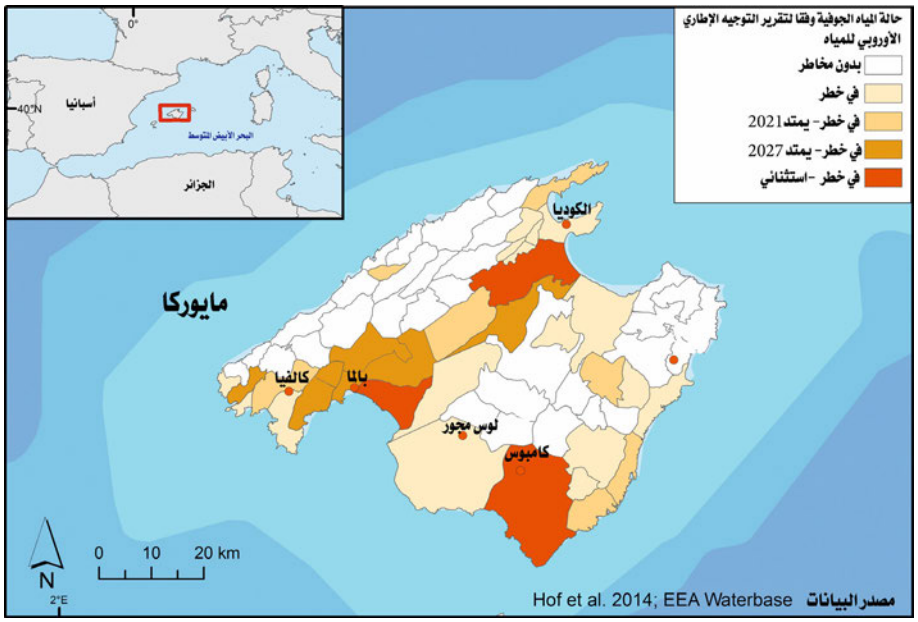


شكل 2.3: مقطع عرضي هيدروجيولوجي يبين الشمال والجنوب عبر دلتا النيل وفقًا لـ (Farid ,1985). حيث يعتبِر هذا النموذج المفاهيمي أن تداخل مياه البحر فقط هو مصدر المياه المالحة.



شكل 3.3: نموذج مفاهيمي هيدروجيولوجي لدلتا النيل حسب Kooi and Groen, (2003)، بدلاً من وجود جسم واحد منتشر من المياه الجوفية المالحة كما هو موضح في الشكل (2.3)، يفترض هذا التصور لنظام المياه الجوفية أن توزيع ملوحة المياه الجوفية من الناحية الجغرافية محلياً أكثر، وأن أصل الأملاح الذائبة قد يكون له أصول متعددة إلى جانب تداخل مياه البحر؛ مع مراعاة استخدام التظليل الرمادي للتأكيد على ندرة البيانات.

4.3 المياه الجوفية للمناطق السياحية الساخنة (مايوركا، إسبانيا)



خـريـطـة 4.3: خـريـطـة لـمـوقـع مايوركا وحالة المياه الجوفية وفقا لتقرير التوجيـه الإطـاري الأوروبي لـلـمـيـاه (WFD)

نبذة

تعتبر طبقات المياه الجوفية الساحلية في منطقة البحر الأبيض المتوسط عُرضةً بشكلٍ كبير لتداخل مياه البحر؛ نتيجةً لعوامل عدة أهمها ارتفاع الطلب على المياه خلال أشهر الصيف الجافة والنفاذية العالية لطبقات المياه الجوفية، وبشكل خاص تعاني الجُزر من مشاكلٍ كبيرة بسبب حجمها المُقيد لتواجد ووفرة المياه الجوفية.

وعليه تجسّد المشاكل المتعلقة بالمياه في جزر البليار بإسبانيا مشاكل العديد من مناطق البحر الأبيض المتوسط التي شهدت تنميةً اقتصاديةً كبيرة خلال العقود الأخيرة ؛ ففي جزيرة مايوركا نمت صناعة السياحة على نطاقٍ واسع سنة 2015 ؛حيث استقبلت الجزيرة ما يقرب من 10 مليون زائر (Agència de Turisme de les Illes Balears 2016) ، وهو ما يزيد عن 10 أضعاف عدد سكانها (Deyà-Tortella et al. 2016) ، و تعد السياحة محركًا هامًا للنمو الحضري على الساحل ، حيث يشكل استخدامها للمياه ما يصل إلى نصف استخدام المياه في المناطق الحضرية ، و في حين كانت الزراعة هي المستخدم الأكبر للمياه في الجزيرة ، فإن استخدام المياه في المناطق الحضرية يمثل الآن معظم الاستهلاك .

تتوزع الأمطار في مايوركا بشكلٍ غير متساوٍ على مدارِ العام ، حيث ما يقرب من نصف كمية الهطول السنوي تحدث في سبتمبر وأكتوبر ، بينما لا تتساقط الأمطار تقريبًا في الفترة من يونيو حتى أغسطس (Garing et al. 2013) ، ويبلغ إجمالي

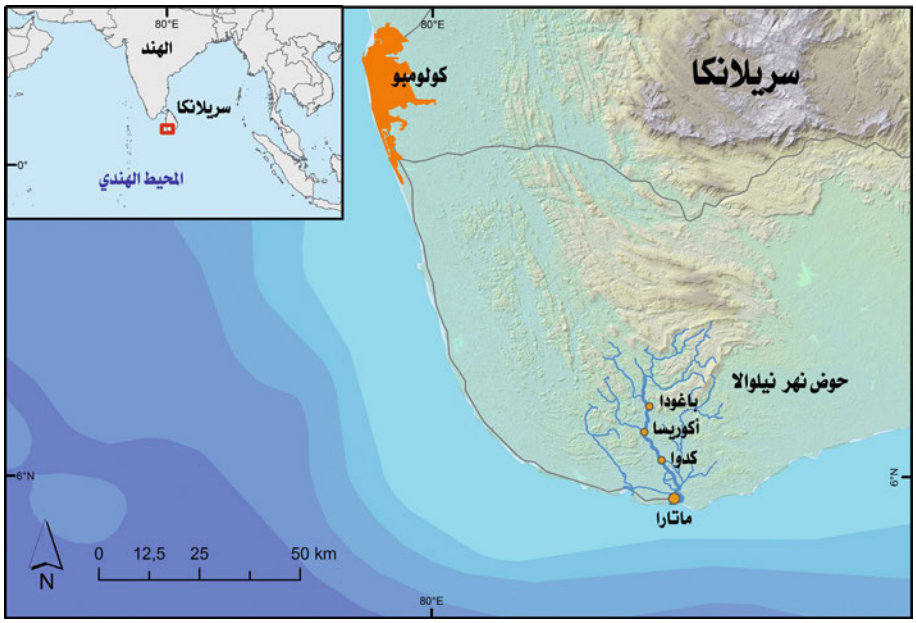
احتياطيات المياه الجوفية والسطحية القابلة للاستغلال 227 مليون متر مكعب بالسنة ، وهو ما يكفي فقط لتلبية الطلب البالغ 210 مليون متر مكعب سنويًا للجزيرة ككل (Hof et al. 2014)؛ حيث توفر المياه الجوفية ثلاثة أرباع الطلب ، بينما يُغطى الطلب المتبقي من خلال إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة ومياه البحر المحلاة والمياه السطحية .

الآثار

أدى الاعتماد الكبير على المياه الجوفية لتلبية الطلب المحلي بالقرب من الساحل إلى تداخل مياه البحر على نطاقٍ واسع (López-García and Mateos Ruíz, 2003) ، وقد ظهرت الصراعات حول استخدام موارد المياه الجوفية وحمايتها وإدارتها(Karim et al., 2008) ، ووفقًا لتوجيهات المياه الجوفية للاتحاد الأوروبي (Hof et al., 2013) تم تصنيف خُمس متجمعات المياه الجوفية على أنها مُفرَطةُ الاستخدام بشكلٍ كبير، وبناءً عليه تنبأت الخطة الهيدرولوجية لجزر البليار (PHIB) والمعتمدة في عام 2013 بحدود السحب ، ولكن بعد تغيير الحكومة تم تخفيف هذه القيود بسبب الآثار المالية السلبية لهذه الإجراءات على قطاعي السياحة والزراعة .

إلى حدٍ ما ، ساعد تبني تدابيرٍ لتوفير المياه على تقليل استخدام المياه في المناطق الحضرية بين عامي 2005 و 2012 ، ولكن هذه الكميات المدخرة قد يتم استهلاكها بسبب السياحة المتزايدة حسب السجلات منذ عام 2016 (Reuters World News May 30, 2016) ، بسبب المخاوف من الإرهاب في الوجهات السياحية الأخرى من البحر المتوسط ؛ لذلك بدون اتخاذ تدابير إضافية تظل موارد المياه العذبة معرضة للخطر ، وقد يصبح الإجهاد المائي المستقبلي أكثر حدةً فمن المتوقع أن تؤدي آثار تغير المناخ إلى قلة هطول الأمطار وارتفاع درجات الحرارة عبر منطقة البحر الأبيض المتوسط (Milano et al. 2013) .

5.3. تأثير استخراج الرمال (حوض نهر نيلوالا، سريلانكا)



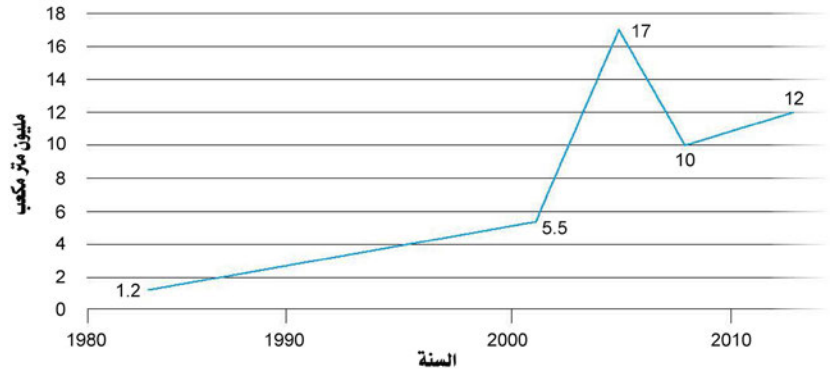
خريطة 5.3: خريطة موقع ماتارا، سريلانكا.

نبذة

يعتبر تصريف النهر والمورفولوجيا عوامل مهمة للتحكم في ملوحة المياه بأنهار المنطقة الساحلية ، فكلاهما يتأثر بالعمليات الطبيعية ، مثل هطول الأمطار وكذلك الترسيب والتعرية ، والأنشطة البشرية ، مثل بناء السدود والتجريف ؛ حيث تزايد تعدين الرمال في جنوب سريلانكا بشكلٍ سريع في قاع النهر على مدى السنوات الـ 25 الماضية (شكل 4.3) ، وقد كان النمو الاقتصادي وإعادة الأعمار لأضرار تسونامي سنة 2004 ، كلها كانت المحركات الرئيسية لارتفاع الطلب على الرمال (Pereira and Ratnayake, 2013) ؛ حيث تأثر المسقط المائي لنهر نيلوالا بشكل كبير من تعدين الرمال (خريطة 5.3) ، كما أدى الاستخراج المتزايد للرمال منذ عام 1997 إلى انخفاض قاع النهر ، ففي عام 2008 كان قاع نهر نيلوالا على ارتفاع 4.5 متر تحت مستوى سطح البحر بالقرب من ماتارا عند المصب (أسفل النهر) ، ومنذ ذلك الحين لا يصل إلى مستوى سطح البحر إلا إلى ما بعد 28 كيلومترًا بالقرب من أكوريسا عند المنبع (أعلى النهر) ، وكنتيجةٍ لذلك يمكن أن تتحرك مياه البحر نحو المنبع خلال موسم الجفاف عندما يكون تصريف النهر منخفضًا .

الآثار

تعتمد إمدادات مياه الشرب في ماتارا على طبقات المياه الجوفية الواقعة تحت السهل الساحلي ، و خلال السنوات العشرين الماضية أظهرت آبار إمدادات المياه التي تقع بجوار نهر نيلوالا زيادة في تراكيز الأملاح ، لذا توجب نقل الآبار إلى أعلى النهر ؛ ففي حين كان بئر الإنتاج الرئيسي على بعد 8 كم من الشاطئ ، إلا أنه حاليًا موجود في كادوا (خريطة 5.3) ؛ أي حوالي أكثر من 18 كم إلى الداخل (Piyadasa and Naverathna, 2008) ، كذلك تتأثر الزراعة والنظم البيئية في المنطقة بزيادة ملوحة مياه النهر ؛ فعلى سبيل المثال هناك تقارير تفيد بأنه يجب التخلي عن 5,000 هكتار من حقول الأرز (Weerasekera 2014) .



شكل 4.3: استخراج الرمال في سري لانكا، المقدر بملايين الأمتار المكعبة.

حالياً تبذل جهودٌ للحد من تعدين الرمال من قبل شراكة المياه السريلانكية مع شركاء من الأوساط الأكاديمية والمجتمع المدني والمنظمات الدولية، وعلى الرغم من وجود تشريع للسيطرة على تعدين الرمال ولكن الامتثال للتشريع منخفضٌ إلى حدٍ ما، لذا ينصب التركيز على رفع مستوى الوعي بوكالات إنفاذ القانون مثل الشرطة والسلطات التنظيمية لقطاع البيئة والتعدين(Pereira and Ratnayake, 2013) .

4. الحوكمة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المناطق الساحلية

4

أظهرت الأمثلة في الحالات الدراسية السابقة إن تداخل مياه البحر يمثل تحديًا رئيسيًا لإدارة المياه الجوفية في المناطق الساحلية، كما إنه مشكلة لا يمكن معالجتها فقط بالتدخلات التقنية؛ ولذا سيشرح الفصل التالي سبب أهمية إدارة المياه الجوفية عند تصميم حلول فعالة لمشاكل تداخل مياه البحر ، كما سيتم مناقشة دور المراقبة لغرض إدارة المياه الجوفية.

1.4 مشاكل المياه الجوفية والحوكمة

موارد المياه الجوفية – بغض النظر عما إذا كانت قريبة من الساحل أو في اليابسة – تضع بعض التحديات العامة للحوكمة لارتباطها بـ "خفاء" المياه الجوفية، وتعد إدارة المياه الجوفية قضيةً ملحة لأن انخفاض القدرة على التنبؤ بأنماط الأمطار والجريان السطحي يزيد تقريبًا من اعتماد الاقتصادات وسبل العيش على المياه الجوفية في جميع أنحاء العالم، وغالبًا ما يؤدي هذا إلى تزايد الضغط على المياه الجوفية بسبب الإفراط في الاستخراج والتلوث.

هذا وقد حددت ستة أوجه قصور رئيسية في الحوكمة من قبل إطار العمل العالمي لحوكمة المياه الجوفية (FAO, 2015)، وهو مبادرةٌ دوليةٌ مشتركة بقيادة منظمة الأغذية والزراعة لغرض التشخيص العالمي لحوكمة المياه الجوفية:

- *عدم وجود قيادة بالمؤسسات الحكومية.*
- *الوعي المحدود بمخاطر المياه الجوفية على المدى الطويل.*
- *لا يوجد قياس لحالة موارد المياه الجوفية.*
- *الأنظمة القانونية الغير عاملة على المياه الجوفية.*
- *عدم المشاركة الكافية لأصحاب المصلحة في إدارة المياه الجوفية.*
- *دمج محدود للمياه الجوفية في السياسات الوطنية ذات العلاقة.*

على مدار عقود ، يعتبر حفر الآبار وضخها في العديد من المناطق شأناً يتعلق بمؤسسات القطاع الخاص ، ويتم استغلال الموارد من قبل الأفراد دون النظر والتنسيق مع المستخدمين الآخرين (van Steenbergen et al., 2015) ، لذا تتطلب الإدارة المشتركة للمورد إجراء تغييرات ليس فقط على الإجراءات الإدارية ولكن أيضًا على تصور الناس للمورد ، وكذلك على عكس المياه السطحية فإن عمليات المياه الجوفية أكثر صعوبة في المراقبة والقياس ، كما أنه ليس من السهل لغير الخبراء تصور العمليات الهيدروجيولوجية للمناطق الساحلية المعقدة في واجهة التماس بين المياه المالحة والمياه العذبة .

تعريفات الحوكمة [1]:

من منظورٍ أكاديمي، تُوصف حوكمة المياه الجوفية كمجموعةٍ من القواعد والمعايير والمؤسسات الرسمية وغير الرسمية التي تحكم تطوير واستخدام المياه الجوفية.

[1] بناءً على التعريف من OECD (http://www.oecd.org/governance/oecd-principles-onwater-governance.htm) and GWP (https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/About_IWRM_ToolBox/)

المشتمل على جميع هياكل وعمليات صنع القرار والتخطيط وتنفيذ تطوير وإدارة المياه الجوفية الموجودة في منطقة معينة، وهكذا؛ يتم التفاوض على إدارة المياه الجوفية (بشكلٍ رسمي أو غير رسمي) بين مختلف الجهات الفاعلة وبالتالي فهي جزء لا يتجزأ من علاقات القوة الإقليمية والمحلية. وتعتبر الحوكمة الرشيدة مفهوماً معيارياً يشير بشكلٍ عام إلى أنظمة الحوكمة التي تركز على الاستدامة الاقتصادية والبيئية والاجتماعية القائمة على عمليات صنع القرار والإدارة الشفافة والمنصفة والمشاركة.

كما يرتبط الإفراط في استغلال المياه الجوفية في المناطق الساحلية بمجموعةٍ من العمليات الطبيعية والاجتماعية الاقتصادية التي تشمل جانبي العرض والطلب ، وبشكلٍ عام تعتمد المناطق ذات الوفرة المحدودة من المياه السطحية والمناخات الجافة وشبه الجافة على المياه الجوفية ، وكثيرا ما يتفاقم توافر المياه بسبب تقلبية المناخ وتلوث المياه الجوفية على المدى الطويل أو تغيرات استخدام الأراضي ، كما إن التغير في أنظمة الهطول والجريان السطحي يجعل من المياه الجوفية مفضلة كمورد ؛ حيث يُنظر إليها على أنها أكثر قدرة على التكيف مع تغيّر (تقلُّب) المناخ .

تعتبر الزراعة المروية محركاً رئيسياً للاستغلال المفرط للمياه الجوفية، إلى جانب النمو السكاني السريع والنمو الحضري، والأنشطة الاقتصادية ذات الاستخدام الكثيف للمياه مثل السياحة واسعة النطاق، علاوةً على ذلك؛ تعد حماية النظم البيئية المعتمدة على المياه الجوفية مصدر قلقٍ متزايد ليس فقط للحفاظ على التنوع الأحيائي ولكن أيضًا للاقتصادات المحلية، خاصة عندما يكون للنظم البيئية قيمة مضافة (على سبيل المثال كوجهة سياحية).

إن الاستغلال المفرط للمياه الجوفية وما نتج عنه من تداخل لمياه البحر في طبقات المياه الجوفية الساحلية ليست مسألةً حديثة النشوء ؛ حيث تم تطوير العديد من مناهج الإدارة واختبارها في جميع أنحاء العالم (فصل 5) ، والتي تشمل التحكم في استخراج المياه الجوفية ، بالإضافة إلى الإجراءات الفنية مثل الحواجز وإدارة التغذية ، كما كشفت التقييمات لطرق الإدارة على أن فعاليتها "تعتمد على درجة الامتثال للتشريعات وأدوات السياسة ، رغم شيوع التضارب بين المنظمين ومستخدمي المياه الجوفية (Werner et al. 2011: 1838) ، وهذا يسلط الضوء على أهمية هياكل وعمليات الحوكمة الرشيدة التي تُمكن من تنفيذ ممارسات وسياسات الإدارة المستدامة لطبقات المياه الجوفية الساحلية ؛ حيث أحرزت العديد من المناطق الساحلية تقدماً هاماً من خلال إصلاح قوانين المياه وإدارتها ، بينما في مناطق أخرى إجراءات مشتركة وفعالة في إدارة طبقة المياه الجوفية لا يزال يجري تشكيلها .

2.4 المشكلات المرصودة في إدارة المياه الجوفية الساحلية

حددت العديد من الدراسات مشاكل حوكمة طبقات المياه الجوفية الساحلية في مختلف المناطق وسياقات التنمية (جدول 1.4). في جنوب شرق إسبانيا ؛ تعتبر طبقات المياه الجوفية الساحلية جزءاً هاماً لدعم الزراعة المكثفة للأسواق الأوروبية ، وأدى تزايد الطلب وتقلب المناخ إلى الإفراط في الاستغلال والتسبب في تداخل المياه المالحة في العديد من طبقات المياه الجوفية بالمنطقة ، ومن بين الجهود المبذولة للحد من استخراج المياه الجوفية كان تطوير مصادر بديلة للمياه عن طريق تحلية المياه ونقل المياه عبر الأحواض ، إلا أن المزارعين لا يزالون يفضلون المياه الجوفية لقلة التكاليف النهائية الإجمالية لها ، ولأن التغيير إلى مصدر مياهٍ بديل يتطلب غالبًا استثماراتٍ كبيرة في شبكة توزيع المياه بالمزرعة (Custodio et al., 2016) .

جـــــدول 1.4: ملخص لمشـــــاكل الحوكمـــة الموجودة في المنـاطق الثلاث التي نوقشت في هذا الفصل

جنوب شرق أسبانيا (Custodio et al. 2016)	– عدم كفاية المراقبة والرقابة والوسائل الإدارية – قلة الدراسات التفصيلية – عدم مرونة الادوات القانونية لحقوق تخصيص المياه وصعوبة مواءمتها مع المصالح الاجتماعية والقيم المشتركة – عدم النظر بشكل كاف في مشاركة مستخدمي المياه وتعزيزها – زيادة الهيمنة بالمؤسسات الحكومية – إرادة سياسية نادرة
شرق أفريقيا (Comte et al. 2016)	– ضعف مشاركة أصحاب المصلحة وضعف المعرفة المحلية – عدم وجود معلومات مركزية عن المياه الجوفية – لا تؤخذ الظروف المحلية في الاعتبار بالمشاريع التنموية – عدم تطابق معايير الإدارة والمعايير الفنية
شاطئ كاليفورنيا (Brown et al. 2016,Nelson 2012)	– انخفاض مُشاركة المجموعات الأضعف والمحرومة من صنع القرار بشأن المياه الجوفية بسبب انعدام الثقة والمعرفة و/ أو الموارد – اتخاذ قرارات غير عادلة بشأن المياه الجوفية – مؤسسات المياه نفسها تعتبر موردةً للمياه، وليس مديرين للمياه أو مشرفين – الاعتماد الكبير على الطرق الغير ملزمة في التحكم بالاستخراج

كشفت دراسة عن طبقات المياه الجوفية الساحلية في ثلاث دول شرق أفريقية هي جزر القمر وكينيا وتنزانيا (Comte et al. 2016)، عن التحدي المتمثل في مطابقة الإدارة الفعالة للمياه الجوفية مع تطوير آبار السحب التي يتم تعديلها بدقة لتناسب ظروف الهيدروجيولوجية معينة في طبقات المياه الجوفية الساحلية ذات العلاقة ، ودعمت وكالات التنمية الدولية مشاريع تنمية المياه الجوفية في المناطق الثلاث ، وتبين في جميع الحالات بانه كان من المفضل حفر آبار عميقة وعالية الإنتاجية ، ومن المفترض إدارة هذه الآبار بكفاءة أكبر عن طريق اقتصاد الإنتاج الحجمي من الآبار التقليدية الضحلة ذات القطر الكبير ، ومع ذلك ؛ أظهرت الآبار العميقة على المدى الطويل مستويات ملوحةٍ أعلى من الآبار الضحلة ، كما تشير النتائج إلى أن تنمية المياه الجوفية الساحلية تحتاج إلى مراعاة الظروف الهيدروجيولوجية المحلية وتتطلب خطط إدارة تعاونية معينة قادرة على تنسيق وتنظيم العديد من الآبار .

في المنطقة الساحلية من كاليفورنيا ، يعد إدراج أصحاب المصلحة المتعددين في عملية صنع القرار عنصرًا رئيسيًا في الإدارة المستدامة للمياه الجوفية على النحو الذي يقتضيه قانون الإدارة المستدامة للمياه الجوفية لعام 2014 (Brown et al. 2016) ، ومع ذلك ؛ في الواقع تحدّ الحواجز الاقتصادية والاجتماعية والثقافية من مشاركة أصحاب المصلحة المختلفين ، هذه الحواجز حددها (Nelson, 2012) كما يلي : (أ) المعرفة المحدودة بالخلفية التقنية ، (ب) الثقة المحدودة بالجهات الفاعلة القوية الموجودة في منصات أصحاب المصلحة المتعددين ، وكذلك (ج) الموارد المحدودة (مثل الوقت والمال) . كما كانت المشاركة في الاجتماع عقبةً أمام المشاركة النشطة للمجموعات الأضعف من أصحاب المصلحة في المياه (مثل أصحاب الحيازات الصغيرة والعمال الزراعيين) .

العنصر المشترك في جميع الدراسات هو وجود ثغرةٍ كبيرة بين الإطار القانوني والمتطلبات التنظيمية وتنفيذها، كما إن المزيد من الفهم حول حقيقة من ينظم اتخاذ القرارات بشأن المياه الجوفية الساحلية ضروريٌ لسد هذه الثغرة.

3.4 فهم الجهات الفاعلة في إدارة المياه الجوفية الساحلية

لكل منطقةٍ ساحلية تكوينها الخاص بها من الجهات الفاعلة ذات العلاقة والتي لها مصلحة في إدارة طبقات المياه الجوفية الساحلية ، ويقدم الجدول (2.4) لمحةً عامة عن الجهات الفاعلة التي تشارك بشكلٍ متكرر في إدارة المياه الجوفية الساحلية ، تضاف هذه المجموعة الواسعة من الجهات الفاعلة إلى تحديات إدارة العمليات البيئية والاجتماعية والاقتصادية والسياسية للمنطقة ، بالإضافة إلى ذلك ؛ أصبحت العديد من الاقتصاديات الساحلية جزءاً متزايداً من نظام عولمةٍ يحدد الفرص والقيود تتخطى تأثير صنع القرار الإقليمي ، فعلى سبيل المثال استخدام المياه الجوفية للزراعة الموجهة نحو التصدير المُعتمد على الأسواق العالمية ؛ كما هو الحال في منطقة سوس ماسة في المغرب (قسم 2.3) ، وغالبًا ما تكون الأسعار والطلب على هذه الأسواق متغيرات مركزية في عملية صنع القرار لدى المزارعين ، والتي لها عواقب على إدارة المياه .

جدول 2.4: مثال لمجموعاتٍ فاعلة مختلفة لها مصلحة في المياه الجوفية الساحلية

إمدادات المياه واستخداماتها	**مزودات مياه الشرب** – مرافق كبيرة – إمدادات منزلية (لامركزية) معالجة / إعادة استخدام المياه – مرافق معالجة مياه الصرف الصحي – محطات تحلية المياه – مرافق التغذية **مجموعات مستخدمي المياه** – مجموعات مستخدمي المياه المنزلية – المستهلكين التجاريين الكبار (مثل السياحة) – مستخدمي المياه الصناعية **الزراعة** – مزارع كبيرة – أصحاب الحيازات الصغيرة
الادارة العامة	**البلدية** – الخدمات العامة – حماية البيئة – السلطات الصحية – إدارة استخدام الأراضي **السلطات الإقليمية** – إدارة القضاء – سلطات المياه – الخدمات الزراعية **السلطات الوطنية** – مجلس المياه الوطني – السلطات التنظيمية – قطاع الوزارات
السياسيين ومجموعات المصالح	**السياسيين** – المجالس والبرلمانات (الهيئات التشريعية) – الأحزاب السياسية والسياسيين **مجموعات المصالح** – جمعيات رجال الأعمال – الجمعيات الزراعية – الاتحادات – منظمات حماية البيئة
مؤسسات تمويلية	**– الصناديق العامة والتمويلات** **– وكالات التنمية والبنوك** **– المستثمرين من القطاع الخاص ومؤسسات التمويل**
مؤسسات أخرى	**– جامعات** **– مراكز استشارات الأعمال** **– شركات حفر وإنشاء الآبار** **– منظمات دولية**

4.4 نحو نظام حوكمة للتنمية المستدامة للمياه الجوفية الساحلية

لخّص إطار العمل العالمي لحوكمة المياه الجوفية (FAO 2015) المبادئ الأساسية الخمسة التالية للإدارة المستدامة للمياه الجوفية:

1. الإدارة المشتركة للمياه الجوفية والموارد المائية الأخرى من أجل تحقيق الأمن المائي وصحة النظام البيئي.

2. الإدارة المتزامنة للمياه الجوفية والموارد الأرضية.

3. الحوكمة المشتركة للمجالات تحت السطحية (مثل التعدين والبنية التحتية).

4. التكامل الرأسي بين المستوى المحلي والوطني.

5. التنسيق مع السياسات الكلية من القطاعات الأخرى.

كما يضمن نظام الحوكمة إمكانية تنفيذ جميع هذه المبادئ، ليس بين عشية وضحاها؛ ولكن كعملية دائمة تحتاج إلى التكيف المستمر مع الظروف المحددة لكل منطقة ساحلية، هذا ويكمن الفن في عملية الجمع بين الجهات الفاعلة ذات المصالح المختلفة والمتضاربة في بعض الأحيان، كما طورت مؤسسات مختلفة مبادئ توجيهية ودروس مستفادة تساعد على حدوث المشاركة في محلها المشاركة مثل البنك الدولي (World Bank, 2003)، كما نوقشت أدناه الأساليب المساعدة على وضع القطار على المسار الصحيح وأفضل ممارسات للتعلم.

اعتبار المياه الجوفية مورداً عاماً مشتركاً

إن تعريف المياه الجوفية كموردٍ عام هو مبدأ أساسي للحوكمة المستدامة للمياه الجوفية ، وهو مهم من ناحيتين في الممارسة القانونية وفي التصور العام ، كما تمثل الملكية الخاصة للمياه الجوفية عقبةً رئيسيةً في سبيل حوكمة المياه الجوفية بشكلٍ مستدام كموردٍ مشترك (Mechlem 2016) ، على الرغم من أن بعض الدول لا تزال تعتبر المياه الجوفية موردًا خاصًا مرتبطًا بملكية الأرض ، إلا أن التنازل عن حقوق استخدام المياه الجوفية أصبح ممارسة قانونية سائدة أكثر فأكثر ، كما ان التغييرات في التشريعات تحتاج إلى الكثير من الوقت والمثابرة ، علاوةً على ذلك ؛ حتى عند حدوث تغييراتٍ قانونية ، فإن عملية تكييف التصور العام للجمهور حول المياه الجوفية الساحلية كموردٍ حساس يظل أمراً حيوياً للتنفيذ على المدى الطويل من أجل الإدارة والاستخدام المستدام للمياه الجوفية ، على الرغم من أنها محاولةٌ معقدة لتغيير "نموذج المياه" في المنطقة ، لكن يمكن العثور على بعض الأمثلة الناجحة (انظر المربع في اليمين) .

4

الميريا، إسبانيا: رفع مستوى الوعي لحماية المياه الجوفية

كان برنامج (Acuiferos del Poniente) (طبقات المياه الجوفية في بونينتي) موجودًا في المنطقة الساحلية الجنوبية الشرقية من الميريا بإسبانيا بين عامي 2008 و2012، والذي جمع بين المجلس الإقليمي للمياه الأندلسية والشركة العامة ACUAMED المسؤولة عن البنية التحتية الهيدروليكية الإسبانية والمعهد الوطني للجيولوجيا وجمعية مستخدمي التعدين والمياه الجوفية في المنطقة.

وكان الغرض من البرنامج دعم الإدارة المستدامة لطبقات المياه الجوفية والذي شجع على الحد من استخراج المياه الجوفية من طبقات المياه الجوفية الساحلية العميقة، واستبدال النقص بمصادر مياهٍ بديلة، وزيادة الضخ من طبقات المياه الجوفية الضحلة بالمنطقة.

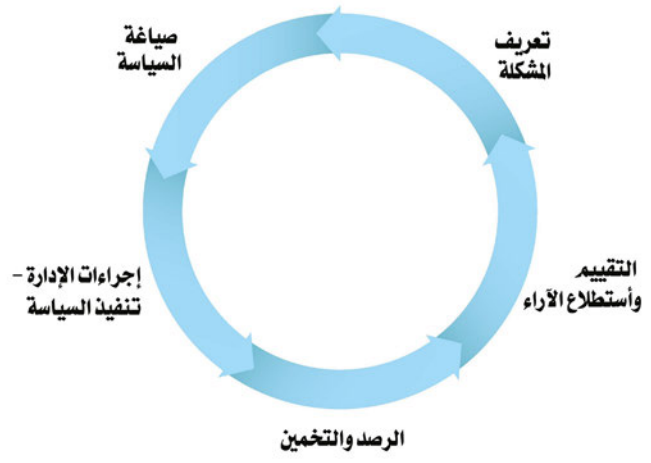
وكان نشر معلوماتٍ عن المياه الجوفية على مستوياتٍ مختلفة جزءاً من البرنامج لزيادة الوعي بالحالة المائية الحرجة في المنطقة، كما ركزت الحملة على ثلاث مجموعات: بالنسبة للمهنيين وصانعي القرار في القطاع الزراعي، تم عرض مشاكل وتأثيرات الإفراط في استغلال المياه الجوفية في المعارض التجارية الإقليمية، وادخل الموضوع أيضاً في مناهج مؤسسات التدريب الزراعي. وكانت مجموعة التركيز الثانية هي قطاع التعليم؛ حيث قام البرنامج – بالتعاون مع السلطة التعليمية الإقليمية – بتطوير موادٍ تعليمية لاستخدامها في المدارس الابتدائية والثانوية وتدريب المعلمين على دمج الموضوع في مناهجهم الدراسية. أما الجزء الثالث من الحملة كان موجه للجمهور العام، وذلك بشكل معرضٍ يوضح حالة المياه الجوفية وتحدياتها عبر مدن مختلفة في المنطقة، كما تم الترويج للمعارض في وسائل الإعلام ورافقها افتتاح محادثات مع أصحاب المصلحة المحليين، وشارك حوالي 20 ألف شخص في أنشطة التوعية الخاصة بالبرنامج، وهذا ما جعل البرنامج خطوة مهمة لإحداث تغييرٍ في موقف مستخدمي المياه تجاه الإدارة المستدامة للمياه الجوفية.

المصدر: Agencia Andaluza del Agua (2009)

الحوكمة والمشاركة التكيفية

أحد الدروس الرئيسية المستفادة من المناقشة حول الإدارة المناسبة للمياه الجوفية هو أن مناهج القيادة والتحكم التقليدية التي وضعها الخبراء الفنيون الخارجيون تفشل عمومًا في حل قضايا المياه الجوفية المعقدة ؛ مثل الإفراط في الاستخراج وتداخل مياه البحر ، خاصةً تلك التدابير التي تتطلب من الجهات الفاعلة تغيير ممارساتها – مثل المزارعين للحد من الضخ – ستعمل بجد إذا لم يكن لدى أصحاب المصلحة المعنيين القاعدة المحددة في حد ذاتها ، لذا فإن المناهج المتكاملة والتشاركية تشكل أحدث ما توصلت إليه إدارة المياه الجوفية على النحو المنصوص عليه في الإرشادات والمبادئ التوجيهية الدولية ، مثل إطار التوجيه الأوروبي للمياه أو مبادئ منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (OECD) بشأن حوكمة المياه .

ويُقصد بالإدارة التكيفية أن تكون دورةً تكرارية (شكل 1.4) ، يتم فيها مراجعة السياسات وتدابير الإدارة وتعديلها باستمرار مع الظروف المتغيرة وعدم اليقين (Pahl–Wostl et al., 2007) ، كما إن تعريف المشكلة وتصميم ومراجعة السياسات والقرارات للعمل على حل المشكلة هي جزءٌ من عمليةٍ مشتركة بمشاركة جميع أصحاب المصلحة المعنيين ، وحيث ان الهدف الرئيسي من هذه العملية ليس زيادة جودة القرارات بل أيضا قبولها وتنفيذها ، وهناك ايضا جانب آخر من مشاركة أصحاب المصلحة وهو عملية التعلم الاجتماعي التي ييسرها تبادل وجهات النظر المختلفة بين الجهات الفاعلة ؛ حيث يبني التعلم الاجتماعي على فكرة أن المجموعة الكاملة من وجهات نظر من زوايا مختلفة أكبر من مجموع أجزائها .



شـــكل 1.4: الدورة التكرارية في عملية الإدارة التكيفية (Pahl–Wostl et al., 2007).

4

عُمان: إدارة الطلب على المياه الجوفية من خلال إمدادات الطاقة المدفوعة مسبقًا

تستضيف منطقة الباطنة الساحلية في عُمان حوالي 53٪ (74,000 هكتار) من الأراضي الزراعية المروية بالمياه الجوفية بالبلاد؛ حيث يتم ضخ مياه الري من حوالي 100,000 بئر، 74٪ منها تعمل بالكهرباء، تتعرض طبقات المياه الجوفية في المنطقة حاليًا لضغوط شديدة حيث يتجاوز الاستخراج العائد الآمن ويحدث تداخل المياه المالحة في مناطق مختلفة.

أصدرت حكومة عُمان مرسومًا بعدة تدابير لحماية طبقة المياه الجوفية وتنظيم استخدام المياه الجوفية ، بما في ذلك تحديد مناطق الحماية وقيود الحفر والضخ ، كما حدد التشريع العقوبات والرسوم وذلك للحد من معدلات استخراج الآبار الموجودة ، وخصصت السلطات حصة من المياه لكل مزرعة على أساس مساحة الأرض المروية ، ونظرًا لأن قياس التدفق المباشر للمياه التي يتم ضخها يعد مكلفًا للغاية ، فقد تم تصميم نظام للتحكم في ضخ استهلاك الطاقة من خلال نظام إمداد طاقة مسبوق الدفع لهذا الغرض ؛ حيث يتم تحويل حصص المياه إلى ما يعادلها من طاقة الضخ ، مع مراعاة عمق البئر وسعة المضخات ، يتوقف عداد الدفع المسبق عن إمداد الطاقة بمجرد تجاوز استخراج المياه الجوفية للتخصيص .يحذر العداد من انخفاض الائتمان والائتمان الطارئ ؛ لتجنب الإجهاد المائي الحرج ، كما يسمح النهج القائم على الحصص للمزارع ببيع أو شراء الحصص ، ومكافأة الري الموفر للمياه ، وإعطاء المزارع الأكبر مرونة ، كما تقوم قاعدة البيانات المركزية للنظام بتخزين حصص المياه والطاقة بالإضافة إلى معلومات حول حجم المزرعة وأنواع المحاصيل ، وقبل ري حقولهم ؛ يتعين على المزارعين تحصيل رصيد الطاقة من أجل تنشيط عداد الطاقة الذكي المتصل بمضختهم ، ويمكن شراء أرصدة الطاقة باستخدام أداة عبر الإنترنت أو الهاتف محمول وخلال عملية الشراء يتحقق النظام من حساب الطاقة للمزارع بحثًا عن أي حصة طاقة متبقية بالإضافة إلى حسابه المصرفي للتأكد من وجود رصيد كافي ، كما يمكن للنظام أيضًا إنشاء تحذيرات في حالة معدلات الاستهلاك المفرطة المرتفعة أو المنخفضة . تم اختبار هذا النهج في دراسة ميدانية لـ 40 مستخدم للمياه، كان لإشراك أصحاب المصلحة ومشاركتهم النشطة – ولا سيما المزارعين – أهميةً حاسمة في نجاح وقبول حصص المياه والطاقة، كما شمل ذلك شرح صيغة تخصيص الحصص والتفاصيل الفنية لإجراءات الفوترة.

المصدر: (Zekri, 2009)

تتناسب الإدارة التكيفية بشكل خاص مع سياق طبقات المياه الجوفية الساحلية حيث أن عمليات تداخل مياه البحر بطيئة ويصعب التنبؤ بها، وتؤثر على العديد من الجهات الفاعلة في المناطق الساحلية، ومع ذلك؛ من أجل النجاح يجب قبول النهج التشاركي من قبل الجهات الفاعلة ذات العلاقة وإدماجها في السياسات المؤسسية للسلطات المسؤولة، كما تسلط مفاهيم إدارة المياه الجوفية الضوء أيضًا على أهمية "التنشئة الاجتماعية" للمياه الجوفية بين أصحاب المصلحة(Moench et al. 2015) .

تعمل هذه العملية في اتجاهين: في الاتجاه الاول؛ يحاول مديرو المياه التوصل إلى تفاهم مشترك مع مستخدمي المياه حول الآثار طويلة المدى للاستغلال المفرط لطبقة المياه الجوفية وخطر تسرب مياه البحر، وهو ما يهدف إلى رفع مستوى الوعي حول ضعف موارد المياه الجوفية وتعزيز مفهوم أن الامتثال لخطط ومبادئ الإدارة المستدامة للمياه الجوفية هو في مصلحة مستخدمي المياه الجوفية.

وفي الاتجاه الآخر، يمكن لمديري المياه الجوفية الاستفادة من فهم أفضل لوسائل المياه الجوفية ذات الصلة للأنشطة الاقتصادية وسبل العيش لمستخدمي المياه الجوفية ، وذلك من خلال التركيز أكثر على أهداف استخدامات المياه الجوفية من حيث النتائج المثمرة (Moench et al., 2015) ، ومنها تصبح الطرق الجديدة وغير التقليدية لإدارة الاستغلال المفرط للمياه الجوفية أمرًا يمكن التفكير فيه ، على سبيل المثال ؛ يمكن أن يدعم النهج الشامل لإدارة المياه المزارعين في إيجاد طريقة للتعامل مع خسائر المحاصيل التي قد يعانون منها من خلال عدم ضخ مياه الري من الخزان الجوفي أثناء الجفاف ، وتشمل الأمثلة الأخرى لآليات دعم أسواق المياه الرسمية وغير الرسمية، وبرامج تأمين المحاصيل والجفاف ، أو برامج الغذاء مقابل العمل (Moench et al., 2015) .

5.4 مراقبة طبقات المياه الجوفية الساحلية - حجر الزاوية لدى الإدارة والحوكمة

تشكل الحوكمة الرشيدة البيئة التمكينية لإدارة سليمة ودقيقة للمياه الجوفية الساحلية، وأساس هذه الإدارة هو معرفة ما يتم إدارته، وهذا يشمل البيانات الثابتة، مثل خصائص طبقة المياه الجوفية، كما يشمل أيضًا البيانات الديناميكية مثل تغذية المياه الجوفية ومعدلات السحب؛ نظام مراقبة وقاعدة بيانات مُصممة بشكلٍ جيد من الشروط الأساسية الأخرى لإنفاذ الأدوات التنظيمية مثل تراخيص الآبار وتصاريح السحب.

تشمل البيانات التي تشير إلى حالة موارد المياه الجوفية قياسات مناسيب المياه وكذلك ملوحة المياه الجوفية والتركيب الكيميائي، وتتطلب قياسات مستوى المياه وعينات المياه للتحليل الكيميائي شبكة من آبار المراقبة، ولأنها توفر الوصول المباشر إلى المياه الجوفية، تسمى جهود المراقبة هذه بالطرق المباشرة، ويمكن أيضًا استنتاج بيانات الملوحة من

القياسات الجيوفيزيائية التي تتم على سطح الأرض أو من الجو، وتسمى هذه بالطرق الغير المباشرة.

تعتمد الطريقة أو مجموعة الطرق التي يمكن تطبيقها على منطقة ما على الظروف المحلية مثل الجيولوجيا ، وديناميكيات عمليات جريان المياه الجوفية (مثل اختلافات التغذية ، وتقلبات المد والجزر ، والضخ) ، وحجم النظام (العمق والمدى الجغرافي) وتوزيع الملوحة ، وبالنسبة لطبقات المياه الجوفية السطحية التي تتلقى التغذية من الأمطار ، توفر سجلات الأرصاد الجوية لهطول الأمطار والبخر المعلومات الأساسية لاستنتاج معدلات التغذية ، كما يمكن أن يكون الجريان في المناطق الساحلية معقدًا ويمكن أن تكون تغذية طبقة المياه الجوفية من مصادر أخرى غير الأمطار ، مثل الأنهار ، أو الجريان التصاعدي من طبقة مياه جوفية أعمق .

وبالتالي؛ فإن التقييم المتكامل لمكونات الجريان هي الشرط الأول لإجراء تقييم سليم لعمليات التملح. وفي المناطق التي يتم فيها سحب المياه الجوفية تعتبر مناسيب المياه المنخفضة إشارة أولية على خطر تداخل مياه البحر، وقد تبدأ مياه البحر فعليا بالتدفق نحو الآبار قبل أن تنخفض مناسيب المياه تحت مستوى سطح البحر، لأن مياه البحر لديها كثافة أعلى من المياه الجوفية العذبة، وبالتالي فإن مناسيب المياه وحدها ليست كافية لتقييم خطر التملح، وعلى الدوام يجب أيضًا مراقبة الملوحة بالقرب من آبار الضخ.

1.5.4 الملوحة

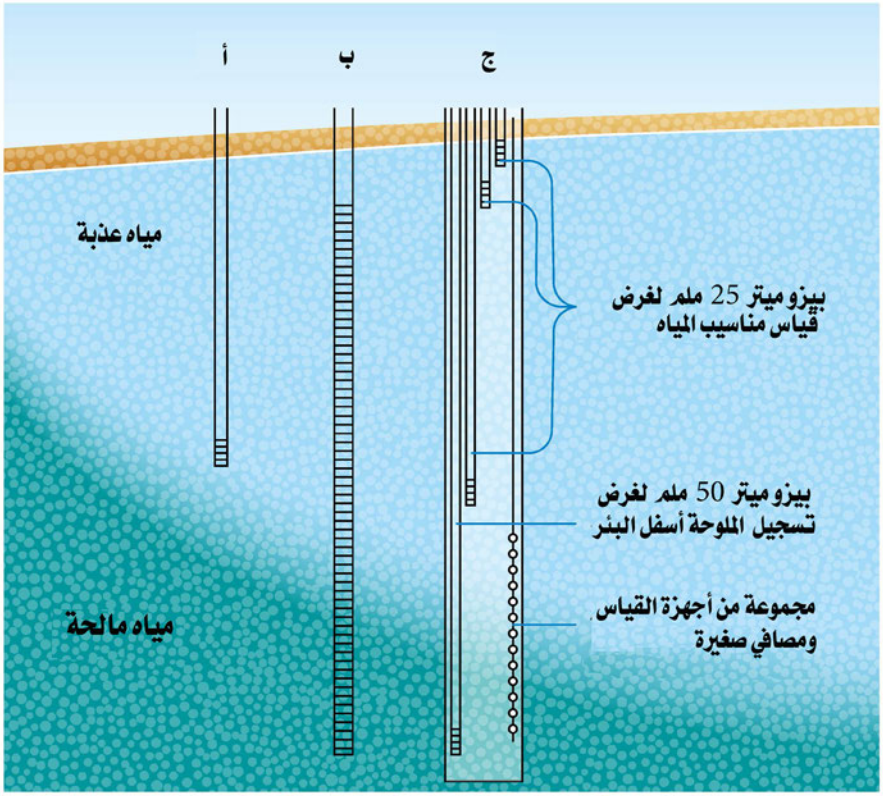
يمكن استنتاج الملوحة من قياسات التوصيل الكهربائي للمياه الجوفية ، وذلك لأنه كلما زادت ملوحة المياه ؛ زادت الكهربية التي يمكن توصيلها نظرًا لأن التوصيل الكهربائي يمكن قياسه بسهولةٍ نسبية ، على سبيل المثال باستخدام الأجهزة المحمولة باليد ، وهي طريقةٌ سريعة وفعالة من حيث التكلفة لتحديد التغيرات في الملوحة عبر المسافة والوقت ، تعد الموصلية الكهربائية لمياه البحر أعلى بكثير من المياه الجوفية العذبة ، لذا يمكن التعرف على تداخل مياه البحر من خلال الزيادة الكبيرة في قيم التوصيل الكهربائي ، كما إن تركيز الكلوريد المُذاب (Cl^-) هو أيضًا مؤشر قوي على تداخل مياه البحر لأنه أعلى بكثير في مياه البحر منه في المياه العذبة ، ولكن على عكس التوصيل الكهربائي لا يمكن قياسهُ بسهولة في الحقل ويجب إحضار عينات إلى المختبر لقياس تركيزه .

تعتبر الطرق الجيوفيزيائية مناسبة جداً لتقديم نظرة عامة على التنوع المكاني لملوحة المياه الجوفية. حيث توجد تقنيات مختلفة ويمكن تشغيل المعدات من على سطح الأرض أو في البحر أو من الجو (شكل 8.2). الطريقة بشكلٍ مبدئي هي أن المجال الكهربائي أو المغناطيسي الذي يتم قياسه يتأثر بالخواص الكهربائية للسطح، وهو دالة قوية لملوحة المياه الجوفية. ومع ذلك، يتم تحديده جزئيًا أيضًا حسب طبيعة الصخور، وبالتالي؛ لا يتم

تحويل الموصلية الكهربائية (أو العكس، بمعنى المقاومة) بسهولة إلى قيمة ملوحة المياه الجوفية، ومع ذلك؛ يتم تحديده جزئيًا أيضًا حسب طبيعة الصخور، وبالتالي؛ لا يتم تحويل التوصيل الكهربائي (أو العكس، المقاومة) بسهولة إلى قيمة ملوحة المياه الجوفية، على الرغم من هذا القيد، يتم استخدام الطرق الجيوفيزيائية بشكلٍ متكرر لاستكشاف طبقات المياه الجوفية الساحلية.

2.5.4 المراقبة "المثالية" بشكل جيد

يمكن أن يتغير توزيع الملوحة عبر مسافاتٍ قصيرة؛ أفقياً ورأسياً، ومن المتوقع أن تتميز طبقات المياه الجوفية القريبة من الساحل بتغيير واضح للملوحة مع العمق (شكل 2.4)، كما أن بئرٌ واحد لوصف توزيع الملوحة يعتبر غير كاف، وبدلاً من ذلك؛



شكل 2.4: مقطع عرضي تخطيطي لطبقة مياه جوفية ساحلية بثلاثة تصميمات مختلفة لآبار المراقبة: (أ) بئر واحد مع مصافي للبئر قصيرة في منطقة المياه العذبة، (ب) بئر واحد مع مصافي للبئر طويلة في المنطقة الانتقالية؛ (ج) بئر مراقبة متطورة متعددة المستويات مع نظام قطب كهربائي (Kamps et al. 2016).

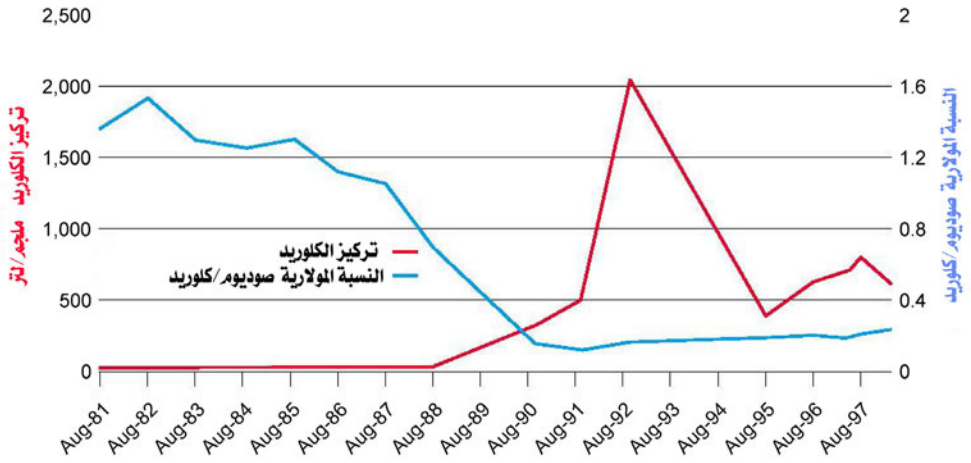
هنالك حاجةٌ إلى العديد من آبار المراقبة لتوفير معلوماتٍ تعتمد على العمق لملوحة المياه الجوفية ، وهذا ما قد يزيد من تكلفة الاستقصاء ، كما أن هذه المعلومات

لا غنى عنها ؛ حيث أن المراقبة في العمق الخاطئ قد تؤدي إلى تداخل مياه البحر دون أن تلاحظ ، كما تستخدم الآبار ذات المصافي الطويلة (عدة أمتار أو أكثر) في بعض الأحيان للتحقق من خصائص منطقة خلط مياه البحر – المياه العذبة ، ولكن يجب تجنب استخدامها لأن تدفق المياه عبر البئر يعطل الظروف الطبيعية في الخزان الجوفي وقد يؤدي إلى التملح المحلي لعدسة المياه العذبة .

بدلاً من ذلك ؛ يفضل استخدام مصافي قصيرة للآبار ، ويمكن تثبيتها في نفس حفرة البئر ، بشرط استخدام التغليف الفعال لمنع التلوث عبر البئر ، أو في آبار منفصلة ، ويوضح تصميم البئر (ج) في الشكل (2.4) مثالًا على أحد أنظمة المراقبة المتقدمة والذي تستخدمه شركة أمستردام لتزويد المياه (Waternet) في هولندا ؛ حيث يحتوي على 3 آبار مراقبة (بيزومترية) وسلسلة من 13 مصفاة صغيرة وأقطاب كهربائية متقاربة المسافات والتي منها يمكن تحديد موقع المنطقة الانتقالية بدقةٍ كبيرة ، مع اعتبار ان التصميمات المتطورة للآبار كما بهذا المثال قد لا تكون متاحة في كل مكان ، ومع ذلك ؛ فإنه يظهر أهمية مراعاة التبعية الرأسية للملوحة ، كما وقد قدمت منظمة الأغذية والزراعة (1997) توجيهات جيدة لتطوير خطة رصد طبقة المياه الجوفية الساحلية

3.5.4. كيمياء المياه .

يمكن للتحليل الشامل للتركيب الكيميائي للمياه أن يكشف عن معلومات مهمة حول تقدم تداخل مياه البحر ، فعلى سبيل المثال ؛ عندما تحل مياه البحر محل المياه العذبة في طبقة المياه الجوفية ، سيتم تبادل الكاتيونات بين الجسيمات الصلبة والمياه ، ولا يتأثر الكلوريد (أنيون) في خليط مياه البحر والمياه العذبة ، وحتى إن اختلط جزء صغير (أقل من 1٪) من مياه البحر مع المياه العذبة ، سيتم لاحقا استبدال الصوديوم (Na^+) بأيونات أخرى مثل الكالسيوم (Ca^{2+}) ، ما يعني أنه قبل أن يصبح تداخل مياه البحر واضحاً ، ومع ازدياد الملوحة بشكل كبير ستبدأ نسبة Na/Cl فعلياً بالانخفاض بشكل ملحوظ (شكل 3.4) ، وبالتالي يمكن استخدام هذه النسبة كمؤشرٍ للإنذار المبكر عن تداخل مياه البحر ، ورغم ذلك يجب الانتباه لأنه قد تتسبب العمليات الهيدروكيميائية الأخرى أيضًا في تغيير النسب الأيونية .



شكل 3.4: رسم بياني يوضح تغير تركيز الكلوريد ونسبة Na/Cl للبئر المتأثرة بالتملح في كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية (HydroMetrics 2008).

يساعد أيضًا التحليل الكيميائي الشامل في تحديد أصل المياه الجوفية المالحة، كذلك قد لا تكون مياه البحر دائمًا هي مصدر الملح الذائب في المياه الجوفية، كما قد يكون التفسير مبهماً في حال وجود مصادر أخرى قد تشمل التالي:

- *مياه البحر القديمة المحصورة في أجزاء راكدة من نظام المياه الجوفية*
- *الغبار الجوي ورذاذ البحر*
- *صخور المتبخرات*
- *الجريان العائد من مياه الري*
- *المصادر البشرية*

يمكن استخدام مجموعةٍ كبيرةٍ ومتنوعة من المواد الكيميائية في المياه الجوفية لتحديد مصادر الملوحة؛ حيث يمكن ان تساهم أيضًا نظائر المياه ومحاليلها والتي يمكن أن توفر معلومات أيضًا عن عمر المياه الجوفية، كما يمكن أن يمثل فهم العمليات التي تسبب التملح تحديًا في المناطق التي شهدت تاريخًا جيولوجياً معقداً.

5. الاستراتيجيات والحلول

5

يقدم هذا الفصل أمثلةً لاستراتيجيات إدارة المياه الجوفية التي أثبتت فعاليتها في المنع والسيطرة على تداخل مياه البحر؛ حيث يجب أن تركز هذه الاستراتيجيات والحلول على طبقة المياه الجوفية نفسها، وتعتبر أيضًا أن المياه الجوفية جزءًا لا يتجزأ من إدارة موارد المياه الساحلية، ونظرًا لاختلاف الظروف في كل منطقةٍ ساحلية، يستوجب أن تكون هناك حلول خاصة بكل موقع.

عليه، يمكن تصنيف نُهُج الإدارة الموصوفة في هذا الفصل إلى أربع فئات مختلفة:

- *نُهج الاستخراج الأمثل للمياه الجوفية (القسم 5.1)*
- *نُهج السيطرة على الطلب (القسم 5.2)*
- *نُهج محسنة لتغذية طبقة المياه الجوفية (القسم 5.3)*
- *الأساليب الهندسية (القسم 5.4)*

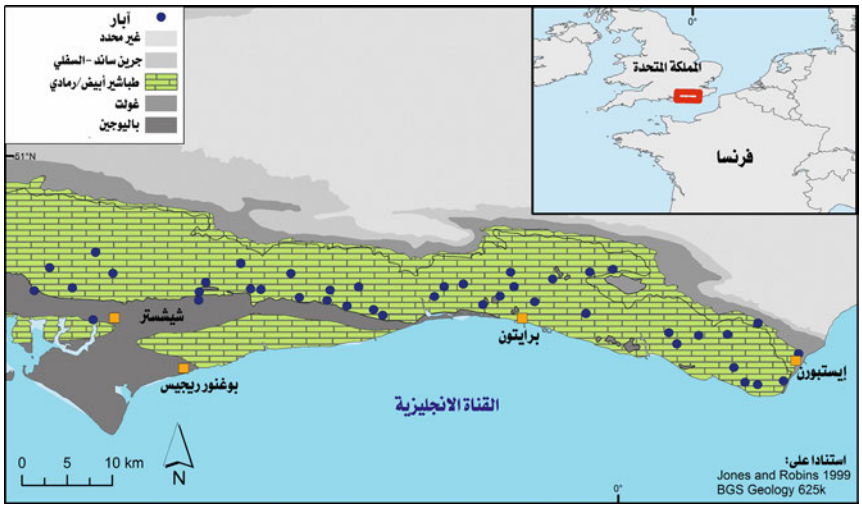
وقد تم توضيح جميع الاستراتيجيات في هذا الفصل بحالات مختارة من مناطق ساحلية مختلفة بالعالم، ولكل حالة تم وصف طبيعة المشكلة والتكنولوجيا وتنفيذ تدابير السيطرة.

1.5 نُهُج الاستخراج الأمثل للمياه الجوفية

يعرض هذا القسم حالتين توضحان دور استراتيجيات إدارة السحب في منع تداخل مياه البحر، وهاتان الحالتان تتطلبان المعرفة التفصيلية لنظام المياه الجوفية وفهم ديناميكيات المنطقة الانتقالية بين مياه البحر والمياه العذبة، تؤكد الأمثلة على أهمية شبكات المراقبة جيدة التصميم التي توفر البيانات اللازمة لتحديد العلاقات بين معدلات تغذية المياه الجوفية وعمليات السحب والتملح.

وتعتبر حالة جنوب داونز South Downs في إنجلترا هي مثال على استراتيجية إدارة طويلة المدى والتي يتم تقييمها وتعديلها من حين لآخر، كما وتتجلى أهمية النمذجة العددية في دراسة حالة كيريباتي Kiribati، وذلك يعني أن الإدارة الناجحة للمياه الجوفية هي مهمةٌ عالية التخصص تتطلب تعاوناً وثيقاً بين خبراء الهيدروجيولوجيا وغيرهم من المتخصصين مثل المهندسين والمؤسسات المسؤولة وصناع القرار.

الحالة 1 : آبار الضخ المتناوبة (جنوب داونز، إنجلترا)



خريطة 1.5: موقع جنوب داونز إنجلترا، توضح الجيولوجيا وآبار إمداد المياه العامة (Jones and Robins 1999).

المقدمة

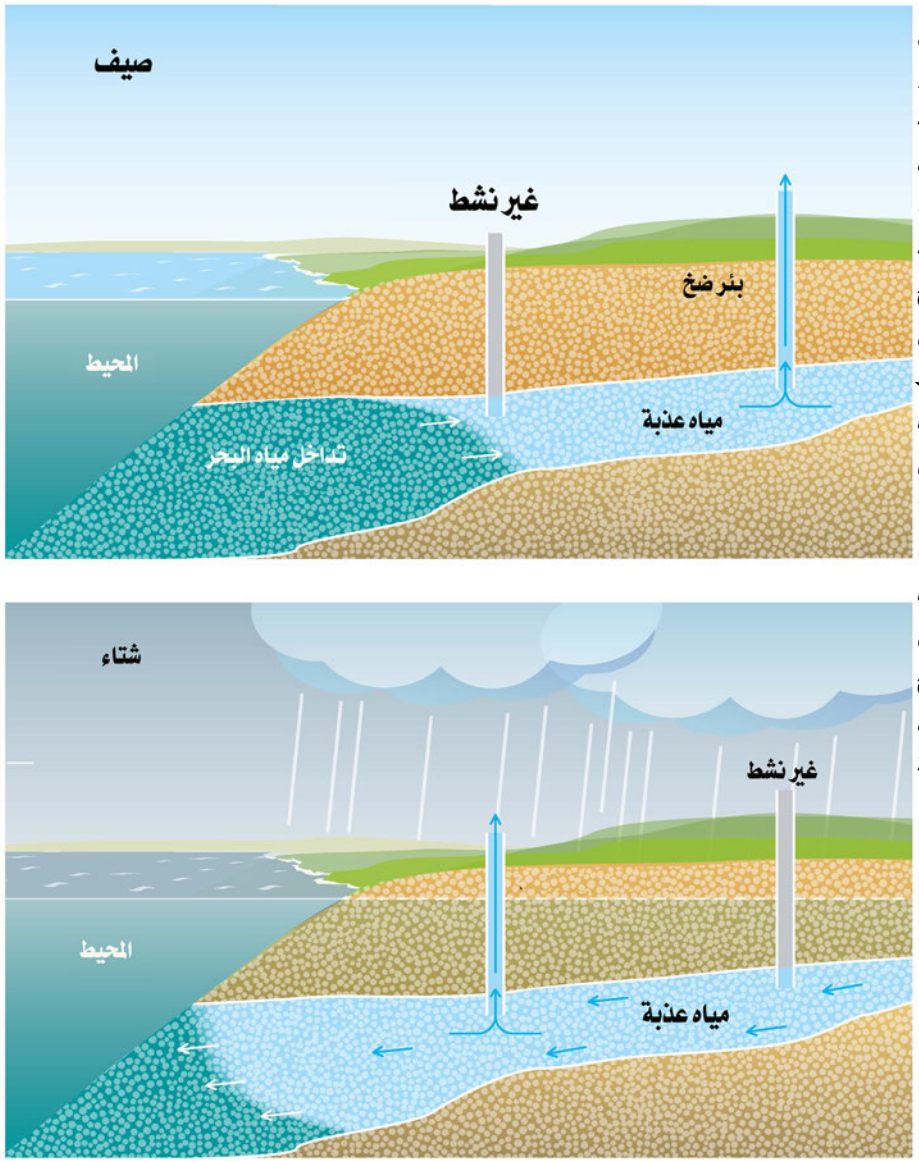
توفر طبقة الحجر الجيري، الحاملة للمياه في المنطقة الساحلية في جنوب داونز في إنجلترا (خريطة 5.1)، حوالي 70٪ من الطلب على المياه بالمنطقة وهي عرضة لتداخل مياه البحر، ونظراً للطبيعة المتشققة للحجر الجيري؛ لم يتشكل وتد مياه البحر المتداخلة بشكلٍ جليّ المعالم، وكذلك فإن توزيع ملوحة المياه الجوفية غير منتظم للغاية، وقد تكون ملوحة الآبار الداخلية أعلى من تلك القريبة من الساحل، وتختلف الملوحة أيضًا مع الزمن، وتستجيب للتغيرات في مستوى المياه والمد والجزر والسحب.

نهج الإدارة

يتم استخراج المياه الجوفية من إجمالي 46 بئراً؛ حيث يبلغ الإجمالي المسحوب 25٪ من متوسط التغذية، ولكن يمكن أن تتجاوز هذه النسبة 60٪ خلال سنوات الجفاف (Robins et al. 1999). كما تم إدخال سياسة سحبٍ متطورة بسبب مشاكل التملح الناجمة مبكراً في عام 1957، وقد تم ضخ الآبار الساحلية بشكلٍ تفضيليٍ خلال أشهر الشتاء، مؤديةً إلى اعتراض الجريان الخارج للمياه العذبة، ما يسمح بالرجوع لمناسيب المياه في الآبار الداخلية (شكل 1.5)، كما يتم خلال الصيف عكس الوضع حيث تضخ الآبار الداخلية للاستفادة من المياه الجوفية المخزونة خلال أشهر الشتاء. (Robins et al. 1999)

وكانت الناتج الصافي لهذه السياسة ارتفاعًا فعالًا في مناسيب المياه حول الآبار الداخلية ، وبالتالي زيادة كبيرة في التخزين المتاح وإمكانات السحب ، عليه يمكن تحقيق زيادة بنسبة 33٪ في عمليات السحب مع ارتفاعٍ متزامنٍ في متوسط مناسيب المياه

الجوفية يصل إلى 1.6 متر ، وهذا ما حقق زيادةً كافيةً في مستوياتِ المياه للحد من تداخل مياه البحر وأدى إلى انخفاض واسع النطاق في تركيزات الكلوريد بالمياه الجوفية ، و خلال الجفاف من بالأعلام من 1988إلى 1992 عندما كانت الأمطار الشتوية أقل بنسبة 20 ٪ من المتوسط على المدى الطويل ، لم يكن مسموحًا ببعض استخدامات المياه وانخفضت مناسيب المياه ، ولكن الإمدادات بقت على حالها .



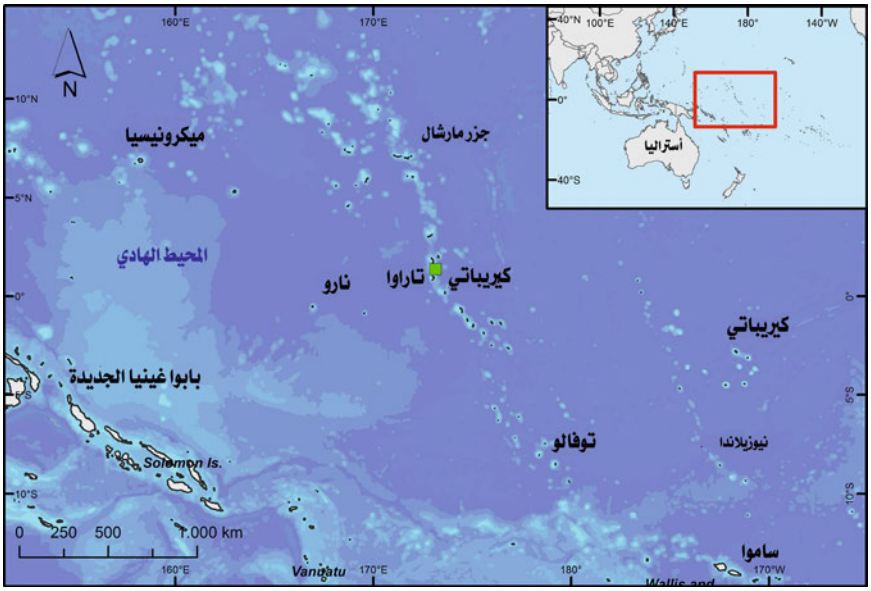
شكل 1.5: رسم تخطيطي لمبدأ آبار السحب المتناوبة لمنع تداخل مياه البحر. في الصيف، عندما تكون التغذية منخفضة، يتم ضخ المياه الجوفية بشكل أكبر داخليًا فقط لمنع تداخل مياه البحر. في فصل الشتاء، عندما تحدث التغذية ، يمكن ضخ المياه بالقرب من الساحل ، مما يسمح لمستويات المياه الجوفية باليابسة بالرجوع.

النتائج

بشكلٍ رئيسي كانت المشاكل المتعلقة بتنفيذ خطط الإدارة ذات طبيعةٍ تشغيلية ، فعلى سبيل المثال ، شكلت الروابط بين المصادر بعض الصعوبات ، وكانت هناك تكاليف مالية وتكاليف طاقة عالية مرتبطة بنقل المياه عبر مسافات كبيرة ؛ وهذا ما يعني بأنه لا يمكن اتباع جميع التوصيات المتعلقة بالسياسات ، كما أن الافتقار إلى آراء واردة من الجانب التشغيلي جعل تقييم درجة تنفيذ التوصيات صعباً ، ورغم هذه المشاكل ؛ كان مخطط الإدارة ناجحًا بشكل واضح في الحفاظ على إمدادات المياه العذبة ، ويمكن اعتبار العوامل التي ساهمت في هذا النجاح عواملٍ رئيسية للتنفيذ الناجح لاستراتيجيات الإدارة في المناطق الساحلية الأخرى أيضًا والتي تشتمل على :

- *تصورٍ نموذجيٍ سليم لنظام طبقة المياه الجوفية ببياناتٍ هيدروجيولوجيةٍ كافية تم تحديثها عند إتاحة بياناتٍ جديدة (Robins and Dance 2003) .*
- *رصدت تأثيرات عمليات السحب عن كثب، من خلال تحديد تركيزات الكلوريد ومناسيب المياه في آبار المراقبة.*
- *السحب كان محكوما بسياسة واضحة ونظام ترخيص.*

الحالة 2 : نظام إدارة المياه لنظام هيدروجيولوجي (جنوب تاراوا، كيريباتي)



خريطة 2.5: موقع تاراوا، كيريباس.

المقدمة

في الجزر المرجانية ، يعتمد إمداد المياه إلى حدٍ كبير على عدسة المياه الجوفية العذبة "العائمة" على جسم من المياه شبه المالحة ، جمهورية كيريباتي هي دولة تقع في منطقة وسط المحيط الهادئ (خريطة 5.2) ، وتتكون من 33 جزيرة مرجانية منتشرة عبر مساحة تبلغ حوالي 5 ملايين كيلومتر مربع ، في عام 2015 بلغ عدد سكان الجزيرة حوالي 60,000 نسمة ، وتقع المنطقة الحضرية الرئيسية في كيريباتي بالجزء الجنوبي من جزيرة تاراوا، ويتم تزويد السكان بالمياه من مصادر المياه العذبة في بونريكي Bonriki وجزر بوتا ، وقد تم الإعلان عن عدسة بونريكي كاحتياطي للمياه في عام 1977 ؛ حيث بدأ استخراج المياه الجوفية في السبعينيات والذي تم التوسع به في العقود التالية ، وللحد من مخاطر ارتفاع المياه المالحة ، كان يتم السحب عن طريق نظام الآبار الأفقية المسماة بأروقة (أو دهاليز) الرشح ، حيث في البداية ارتفع عدد أروقة (أو دهاليز) الرشح من 4 إلى 22 خلال عام 2003 ، ومعدل السحب الحالي والذي يعتبر مستدامًا يقدر بـ 1,660متر مكعب / يوم .

بالنظر إلى وضع العدسة كاحتياطي للمياه، جدير أن يحظر الاستيطان وتعدين الرمال والحصى والزراعة؛ حيث كان تطبيق هذه اللوائح أمراً صعباً، ونتيجة لذلك هناك خطر كبير لتلوث المياه العذبة، كما أن الضخ المستمر يجعل العدسة أكثر عرضة للتملح

أثناء فترات الجفاف، وبالتالي يتم إعادة تقييم ممارسة الإدارة الحالية لمعدل السحب المستمر (Galvis-Rodriguez et al. 2017).

نهج الإدارة

تتم مراقبة حالة العدسة عن طريق نظام آبار المراقبة ، والتي يتم قياس الملوحة بها كل ثلاثة أشهر كما يتم قياس هطول الأمطار يومياً ، ومع هذه البيانات ؛ يمكن تحديد استجابة العدسة لهطول الأمطار والسحب ، وتظهر البيانات أنه منذ الثمانينيات أصبحت العدسة أكثر رقة ، كما أن ملوحة المياه المستخرجة في الوقت الحاضر تظهر استجابة أقوى لهطول الأمطار مما كانت عليه في الماضي ، وينطوي أحد أساليب الإدارة المستقبلية المنظور لها حاليًا على نظام ضخ ديناميكي ، والذي يتم فيه تشغيل وإيقاف الآبار اعتمادًا على هطول الأمطار وملوحة المياه الجوفية المستخرجة ، فاستنادًا إلى المعايير المرجعية المحددة مسبقًا للملوحة قد يتم إيقاف البئر أثناء فترة الجفاف وتشغيله مرةً أخرى إذا ظلت ملوحة المياه الجوفية أقل من مستوىً معين لفترةٍ معينةٍ من الزمن ، ونتيجة لذلك ؛ يمكن التزود بكميةٍ قليلةٍ من احتياطي المياه العذبة ، ولكن لصالح الاستدامة طويلة الأجل للعدسة .

يعد انخفاض توافر المياه الجوفية – أثناء مواسم الجفاف – إشارةً إلى الحاجة لخيارات إمدادات المياه أخرى مثل مياه البحر المحلاة أو مياه الأمطار، لذلك وفي المستقبل، لغرض تقييم الآثار الاجتماعية والاقتصادية يجب معرفة مدى توفر المياه الجوفية، ويمكن تقدير ذلك بناءً على النمذجة الرقمية.

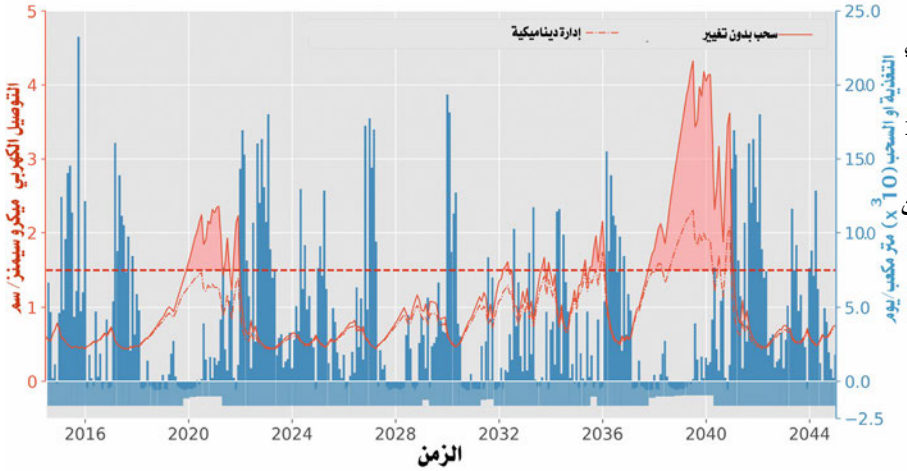
وفي إطار مشروع الـ (CAIA Galvis-Rodriguez et al., 2017) تم تطوير نموذجٍ رقمي لجزيرة بونريكي ومعايرته بمجموعة بيانات لقياسات الملوحة الحالية، بعد ذلك تم تشغيل النموذج المُعاير لثلاثين عاماً في المستقبل، وذلك بناءً على افتراضات معينة حول أنماط هطول الأمطار المستقبلية واستخدام الأراضي والسحب.

باستخدام هذا النموذج ؛ تم اختبار سيناريوهات الإدارة المختلفة ، ومقارنتها بسيناريو لحالة أساسية مفترضة لتوزيع هطول الأمطار بالمستقبل ؛ حيث يحدث الجفاف لمدة 3 سنوات ويبقى استخدام الأراضي دون تغييرٍ في الحالة الأساسية ، كما تمت مقارنته بسيناريو لقواعد الإدارة حين يتم إيقاف تشغيل الآبار التي تتجاوز معيار التوصيل الكهربي البالغ 1000ميكرو سيمنس/سم (مقياس ملوحة المياه الجوفية (، وتبقى مغلقة حتى تنخفض إلى أقل من 900 ميكرو سيمنس/سم ، ويوضح الشكل (2.5) التطور مع الزمن ؛ حيث يمكن ملاحظة أنه بدون إدارةٍ إضافية يمكن أن تؤدي معدلات السحب الحالية إلى تجاوزٍ منتظم لحد المعيار المرجعي المقدّر بـ 1500ميكرو سيمنس/سم ، وهو المستوى

الذي يظل مقبولًا لمياه الشرب لدى المجتمع ، لذا فإن سيناريو الإدارة التكيفية يقلل بالفعل من تأثير الجفاف على ملوحة المياه التي يتم ضخها .

النتائج

بناءً على المحاكاة الرياضية، تمت التوصية بمجموعةٍ من خيارات الإدارة المستقبلية لحكومة كيريباتي، وفي وقت كتابة هذا الكتيب؛ كانت عملية صنع القرار لا تزال جارية، كما أوضحت الدراسة أن التطورات الأخرى يمكن أن يكون لها تأثيرات كبيرة على عدسة المياه العذبة، فعلى سبيل المثال؛ إزالة أشجار جوز الهند لإفساح المجال لمحطة طاقة شمسية في سبتمبر 2015، أدى إلى زيادة تغذية المياه الجوفية، وبالتالي كان أمراً مفيداً للعدسة (Galvis-Rodriguez et al. 2017).

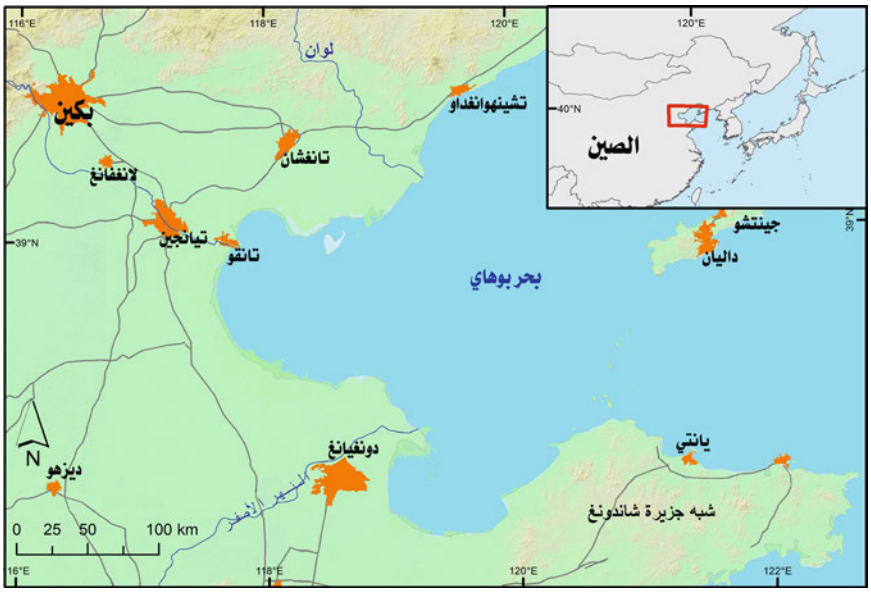


شكل 2.5: تجربة محاكاة لخيارات إدارة المياه المختلفة؛ إذ غالبًا ما يؤدي معدل السحب الثابت والبالغ1,660 m^3/d (متر مكعب/ يوم) إلى توصيلٍ كهربي مرتفع يزيد عن 1500 µS/cm (ميكرو سيمنس/سم) ، في حين أن تقليل السحب أثناء فترات الجفاف يخفف من التملح ولكن على حساب انخفاض توافر المياه .

2.5 نُهُج إدارة الطلب

تحتاج الحوكمة الجيدة لموارد المياه إلى التأكيد على أن الطلب يتناسب مع سعة النظام الطبيعي لتقديم المياه للاحتياجات البشرية ، وبصرف النظر عن التقليل من مخاطر الإفراط في الاستغلال ، فإن الحفاظ على الطلب عند أدنى مستوىً له مزايا عديدة أخرى ، مثل انخفاض الطاقة والتكاليف النقدية لإمدادات المياه ، وقلة الحاجة إلى معالجة مياه الصرف الصحي وزيادة توافر المياه للأنظمة البيئية المعتمدة على المياه ، كما يمكن تقليل الطلب على المياه الجوفية من خلال إدخال تسعيرات المياه ، وترخيص الآبار وتحديد التخصيص أو عن طريق وضع حوافز مثل الدعم لتكنولوجيا الري الفعالة أو غيرها من التقنيات الموفرة للمياه ؛ قدمت بعض الأمثلة في وقت سابق في الفصل (4) ، وما سيتضح من خلال الحالة الدراسية المقدمة في هذا القسم لمنطقة ساحلية سريعة النمو في الصين .

الحالة 3: الطلب المائي على المياه الجوفية (تيانجين، الصين)



خريطة 3.5: موقع تيانجين، الصين.

المقدمة

تقع المنطقة الساحلية لبحر بوهاي على بعد أكثر من 100 كم جنوب شرق العاصمة بكين (خريطة 5.3) وهي واحدة من أسرع المناطق نمواً في الصين ، والتي يبلغ عدد سكانها حوالي 15 مليون نسمة (2013) وذات موارد مياه محدودة فهي واحدة من مناطق الصين الأكثر ندرة للمياه ، وتمتلك مدينة تيانجين موارد مائية متجددة سنوية تبلغ 160 متر مكعب للفرد (Zhang et al., 2008) ، كما كثفت التنمية الاقتصادية والنمو السكاني في العقود الأخيرة من استغلال موارد المياه الجوفية (Hu et al. 2009) ، والذي أدى إلى معدلات ضخ تجاوزت التغذية إلى حد بعيد وتسببت في تداخل مياه البحر إلى بعض طبقات المياه الجوفية الساحلية (Shi and Jiao 2014) ، كما أثرت مشاكل الملوحة على إمدادات المياه لحوالي 400000 شخص وتم إغلاق حوالي 8000 بئر ري (Shi and Jiao, 2014) ، رغم ذلك واصل بعض المزارعين استخدام المياه الجوفية للري مما أدى إلى تملح التربة وخفض انتاج المزارع بنسبةٍ تصل إلى 60٪ (Chunmei 2000) ، وبغض النظر عن تداخل مياه البحر كذلك أدى استخراج المياه الجوفية إلى هبوط الأرض ، وقد كانت المنطقة الحضرية في تيانجين هي الأكثر تأثرًا بمتوسط هبوط سنوي يزيد عن 10 سم في عام 1981 ، ونتيجةً للتدابير المتخذة في الثمانينيات انخفض معدل الهبوط إلى 20 مم / سنة (He et al. 2006) ، ولكن مع ذلك بحلول عام 2000 بلغ معدل الهبوط التراكمي منذ عام 1960 حوالي 3 أمتار في مدينة تيانجين (Xu et

al. 2009) ، وإجمالاً ؛ يُعتبر توفر المياه والمشكلات المتعلقة بالاستخراج المائي (الزائد) معوقًا رئيسيًا للتنمية (Song et al. 2011) .

تدابير تخفيض الطلب على المياه الجوفية

نفذّت الحكومة عدة إجراءات للسيطرة على استخراج المياه الجوفية، منها:

- *قيودٌ على استخراج المياه الجوفية وحفر الآبار.*
- *تحديد تسعيرات المياه.*
- *تقليل الطلب على المياه للهكتار الواحد لغرض الري.*
- *استبدال المياه الجوفية بمصادر بديلة مثل نقل المياه من الأحواض الأخرى وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي وتحلية مياه البحر.*

هذا وقد كان ضخ المياه الجوفية محظورًا تمامًا في منطقة تيانجين الحضرية في عام 1987 ، حيث كان على مستخدمي المياه التقدم بطلب للحصول على إذن من السلطات البلدية ، وفي الوقت نفسه ؛ تم إدخال نظام التعريفات الذي تم تعديله في عامي 1998 و 2002 (جدول 1.5) لتحقيق أهداف السياسة وتعزيز جهود الحفاظ على المياه ، ففي البداية ؛ ظل القطاع الزراعي – أكبر مستخدمٍ للمياه – معفيًا من الرسوم الجمركية ولوائح السحب (Kataoka 2010) مع الالتزام بإدخال تقنيات الري الفعالة ، وفي عام 2006 تم إدخال عدادات المياه للمزارعين في بعض المناطق ، لذلك يمثل تنظيم الطلب على المياه الزراعية تحدياً كبيراً .

جـــدول 5.1: تعرفة المياه في تيـانجين (Xu and Zhang (2006

السنة	لمشاريع البلدات يوان /متر مكعب	لشركات الكيماويات والبترول يوان /متر مكعب	مشاريع أخرى يوان /متر مكعب
1987	0.05	0.12	0.0968
1998	0.5	0.5	0.5
2002	1.30 (في المناطق التي تتوفر فيها مياه الصنبور: 1.90)		

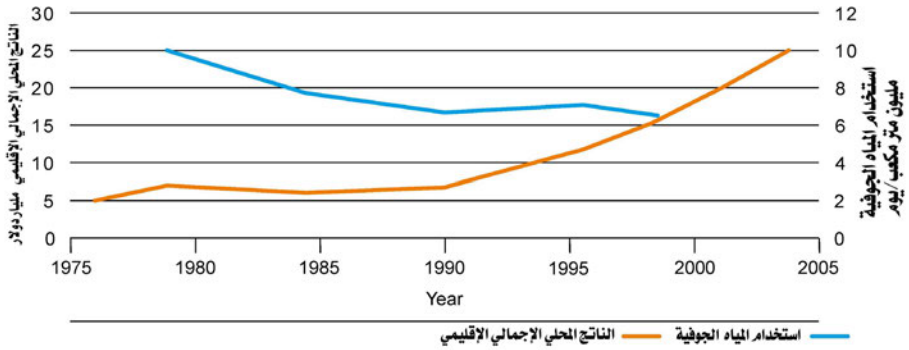
وعليه تمت تلبية الطلب المتزايد في تيانجين عن طريق إعادة استخدام مياه الصرف الصحي، ونقل المياه من الأحواض الأخرى وتحلية مياه البحر؛ كما زادت نسبة إعادة استخدام المياه العادمة في الصناعة من 40٪ في الثمانينيات إلى 74٪ في التسعينات.

كما تم الانتهاء من مشروع كبير لنقل المياه يحول المياه من نهر لوان إلى مدينة تيانجين خلال عام 1983، وبسبب ندرة المياه في حوض لوان، تم تحويل المياه من النهر الأصفر بدلاً من ذلك منذ عام 2004 (Kataoka, 2010)، كذلك المشروع الضخم لنقل المياه من الجنوب إلى الشمال الذي يحول المياه العذبة من نهر اليانغتسي في جنوب

الصين إلى السهول الشمالية حيث توجد مدن مثل بكين وتيانجين ذات الجفاف الأكثر والنشاط الصناعي الكبير (Shi and Jiao, 2014).

النتائج

منذ ثمانينيات القرن العشرين ، كانت مشاريع نقل المياه الكبيرة ذات أهميةٍ خاصة في فصل النمو الاقتصادي الضخم لتيانجين عن سحب المياه الجوفية (شكل 5.3) ، في المناطق الحضرية ؛ تباطأ انخفاض المياه الجوفية وآثاره الجانبية الضارة كهبوط الأراضي وتداخل المياه المالحة ، بل وانعكس اتجاهه هذه الآثار أيضاً(IGES 2007) ، في الوقت الحالي ، ينظم استخراج المياه الجوفية بشكل صارم و في المناطق الأكثر أهمية يمنع مطلقاً ، كذلك ازداد تنفيذ تكنولوجيات توفير المياه في الزراعة والإنتاج الصناعي (Zhang et al., 2016) ، ومع ذلك لا تزال فترات الجفاف تتحدى موارد المياه في المنطقة مما قد يزيد من الاعتماد على المياه الجوفية .



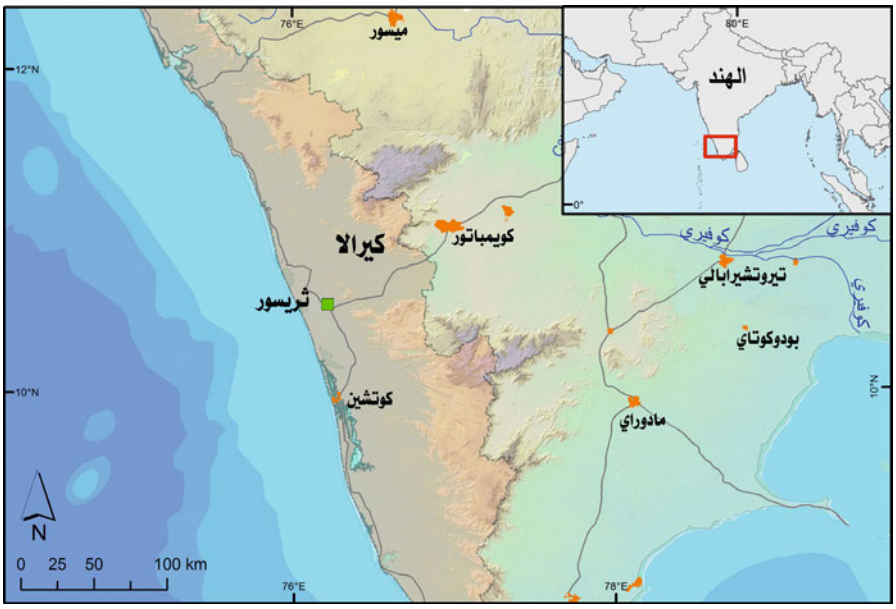
شكل 3.5: الناتج المحلي الإجمالي الإقليمي (RGDP) واستخدام المياه الجوفية (IGES 2007).

3.5 نُهُج معززة لتغذية الخزان الجوفي

هنالك العديد من التدابير التي يمكن اتخاذها لتعزيز تغذية المياه الجوفية، ويرتبط بعضها بالتخطيط الحضري وتخطيط استخدام الأراضي؛ مثل تخطيط المساحات المفتوحة أو التسرب اللامركزي لمياه الأمطار المركزية، كذلك؛ قد يكون للتغيرات في الغطاء الأرضي آثار جانبية مفيدة لتغذية المياه الجوفية، على سبيل المثال إزالة النباتات ذات الاستخدام المرتفع للمياه، إذا ما تم قبولها اجتماعيًا وبيئيًا (انظر أيضًا للحالة 2، قسم 1.5). كذلك التخزين تحت سطح الأرض للمياه الزائدة عند وفرتها يعتبر نهجا آخر والذي ينطبق بشكل خاص على البيئات المناخية المتميزة بمواسم رطبة وجافة، فخلال الموسم الرطب؛ يمكن حقن فائض المياه في طبقة المياه الجوفية ويتم تخزينه بها للاستخدام في موسم الجفاف، ومن أجل التنفيذ الناجح؛ من المهم أن تكون هناك معرفةٌ جيدة حول سعة التخزين والاسترادادية لطبقة المياه الجوفية المستهدفة، والتغيرات المحتملة في نوعية المياه، وإمكانية الحصاد بناءً على بيانات هطول الأمطار.

يقدم هذا القسم حالتين دراسيتين للتغذية الاصطناعية: الأولى بمنطقة كيرالا بالهند، وهي منخفضة التكلفة ويمكن تنفيذها على مستوى الأسرة بوسائل تكنولوجية بسيطة، والثانية في جنوب غرب هولندا؛ والتي تهدف إلى زيادة توافر مياه الري في المزارع لكنها تتطلب تكنولوجيا أكثر تعقيداً واستثماراتٍ أعلى.

الحالة 4: حصاد مياه الأمطار من الأسطح للآبار المحفورة (كيرالا، الهند)



خريطة 4.5: موقع كيرالا، الهند.

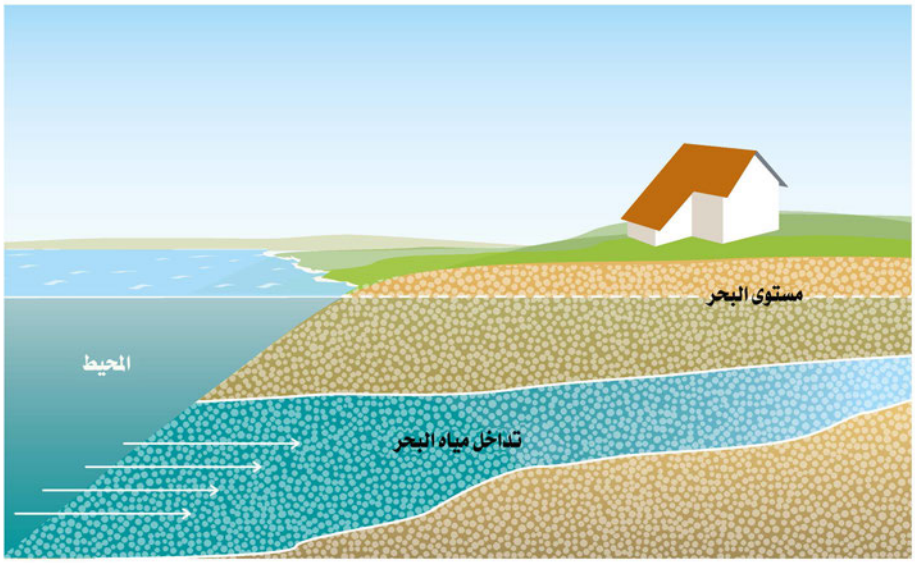
المقدمة

في كيرالا، على الساحل الجنوبي الغربي للهند (خريطة 4.5)، تعتمد حوالي 80٪ من العائلات على المياه الجوفية ؛ حيث يتم الحصول على المياه من الآبار الضحلة التي تتواجد بكثافة وتصل إلى 400 بئر لكل كيلومتر مربع بالمنطقة الساحلية من الولاية ، على الرغم من هطول الأمطار السنوي المرتفع الذي يبلغ حوالي 3000 مم ، والذي يتركز في موسم الرياح ، إلا أن كمية المياه الجوفية محدودة نظرا للقدرة المنخفضة لتسرب التربة ، لذلك ؛ خلال أشهر الصيف الجافة ينخفض منسوب المياه الجوفية ، وتنضب 70٪ من المياه بالآبار الضحلة (Planning Commission–Government of India 2008) . وقد أدى ذلك أيضًا إلى تداخل المياه المالحة على طول البحيرات وأنهار المد والجزر، كما أدى استخراج الرمال الغير القانوني من قاع الأنهار الساحلية إلى تفاقم المشكلة.

الناحية التقنية

تمثل كمية الأمطار المرتفعة – خلال أشهر الرياح الموسمية – إمكانياتٍ واعدةٍ لتخزين المياه، لذلك في عام 2008، قام مشروع (www.mazhapolima.org) Mazhapolima بتطوير البنية التحتية لحصاد المياه من أسطح المنازل وتحويلها إلى آبار مفتوحة بهدف تخزينها في طبقة المياه الجوفية (الشكل 4.5). قبل الحقن؛ يتم تمرير المياه خلال مرشحٍ مصنوع من الرمل والفحم، أو من خلال مرشحٍ نسيجيٍ مصنوع من

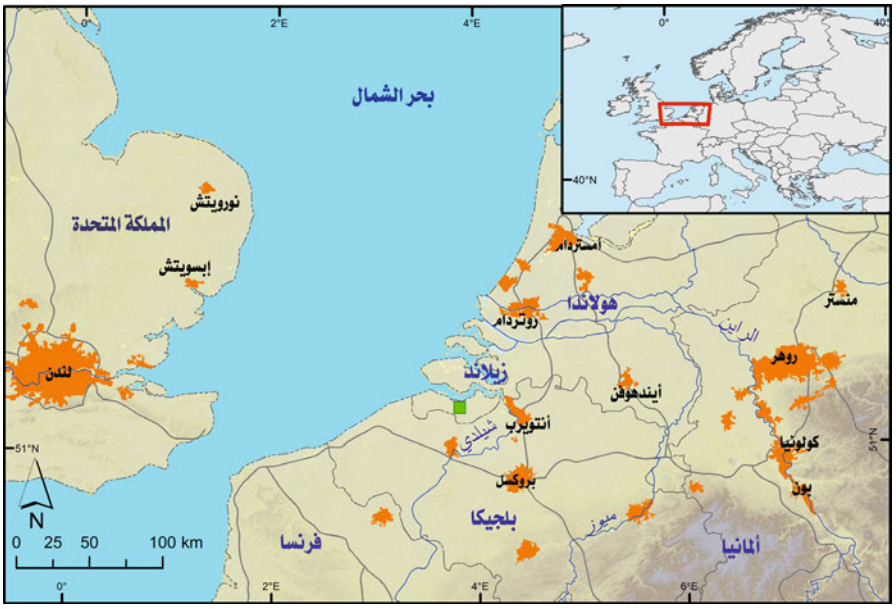
النايلون أو القماش، وبمجرد امتلاء البئر بالمياه، تتسرب إلى طبقة المياه الجوفية المحيط بها؛ حيث تم تركيب 20,000 وحدة حصاد منذ بدء مشروع Mazhapolima في عام 2008.



شكل 4.5: حصاد المياه على سطح الأرض وتسربها إلى الآبار المحفورة: عندما تكون ملوحة المياه المتسربة أقل ملوحةً من طبقة المياه الجوفية؛ يمكن تحقيق تحسنٍ محلي في جودة المياه الجوفية

هذا وتتراوح تكاليف كل وحدة – اعتمادًا على نوع المرشح – بين 75 (سعر المرشح النسيجي) إلى 100 دولار أمريكي (لمرشح الرمل والفحم) (Raphael 2014)، وفي المناطق الساحلية؛ تكون ملوحة المياه المتسربة أقل من المياه الجوفية المحيطة مما يؤدي إلى تحسين جودة المياه الجوفية بالقرب من الآبار (NITI and UNDP, 2015) .، وفي حين أن الآبار المحفورة تسهل من عملية تسرب مياه الأمطار إلى طبقة المياه الجوفية ربما أيضًا تصبح مسارات لتلوث الخزان الجوفي ؛ حيث كانت هنالك تقارير عن الآبار التي تم استخدامها كمكبات لمياه الصرف الصحي متأثرةً بتلوث بكتيري بسبب المياه المعاد تغذيتها (NITI and UNDP, 2015) . ، لذلك يعد بناء القدرات السليمة ومراقبة المياه على طول العملية (المياه الجوفية المحيطة ، ومصدر المياه المتسربة ، والمياه المستعادة) والبنية التحتية التقنية (المرشحات والآبار) في المنازل أمرًا حيويا لنجاح هذا النهج واستدامته يشتمل على سجلات الآبار ومواقعها الجغرافية ومرافق التسرب ، بالإضافة إلى توفير موارد المعرفة للتعامل مع الآبار المحفورة ، وكذلك عندما لا يتم استخدام آبار التسريب ، كما يجب التنسيق لتعزيز هذا النهج مع سلطات المياه المختصة ، أو أن يصاحبه برامج لتعزيز مجموعات مستخدمي المياه الجوفية القادرين على رعاية حماية طبقة المياه الجوفية (فصل 4).

الحالة 5: إدارة مبتكرة لعدسات المياه العذبة (زيلاند، هولندا)



خريطة 5.5: خريطة موقع زيلاند، هولندا.

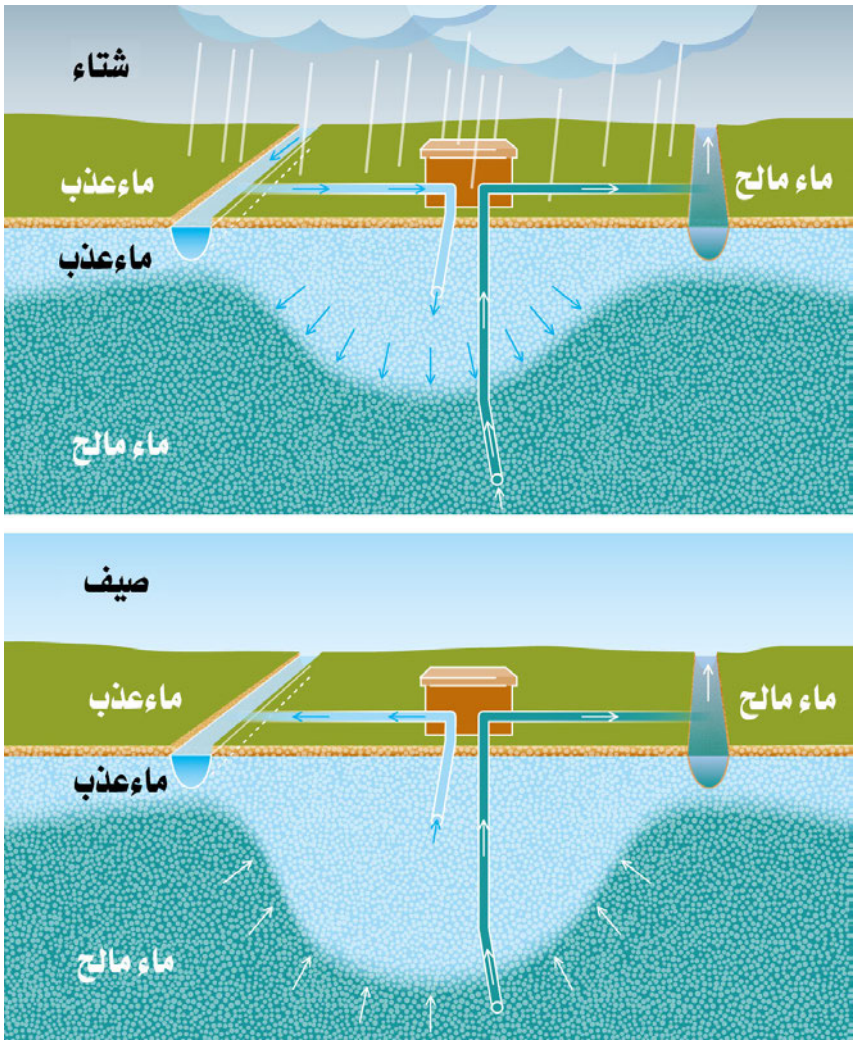
المقدمة

يقع جزء كبير من هولندا عند أو تحت مستوى سطح البحر ؛ لذلك تتأثر موارد المياه الجوفية في المناطق الساحلية للبلاد بالتملح (Oude Essink et al., 2012) ، مما يشكل تحديًا رئيسيًا لإدارة إمدادات الزراعة ومياه الشرب ، كذلك يوضع ضغطًا إضافيًا على المياه العذبة خصوصا خلال فصل الصيف نتيجة لتغير المناخ وارتفاع مستوى سطح البحر وهبوط اليابسة ، وغالبًا ما توجد المياه الجوفية شبه المالحة والمالحة في الأعماق الضحلة ، كما انه في هذه المناطق يعتمد توفر المياه للأنشطة الزراعية على عدسات المياه العذبة التي تتشكل بسبب هطول الأمطار المتسربة في طبقات المياه الجوفية شبه المالحة أو المالحة (Oude Essink et al., 2012) ، وتختلف سماكة العدسات فتكون أكبر من 50 متر في مناطق الكثبان الرملية ، ومن 5 إلى 20 متر في الجداول الرملية الأحفورية ، ومن 1 إلى 2 متر في المناطق الأكثر برودة ، ويمكن لتخزين واسترداد الخزان الجوفي ASR تكبير عدسات المياه العذبة المحلية ؛ حيث تكمن المزايا الرئيسية للـ ASR مقارنةً بتخزين المياه السطحية في أنه يتطلب مساحة سطحية أصغر بكثير وأن المياه لا تتعرض للبخر (Zuurbier et al., 2013a) ، وفي المناطق الساحلية ذات المياه الجوفية شبه المالحة أو المالحة خاصة يتطلب تطبيق الـ ASR خبرةً هيدروجيولوجيةً عالية ومعرفةً دقيقةً بخصائص طبقة المياه الجوفية وكذلك الاستثمارات في التكنولوجيا والبنية التحتية ، كما يمكن أن يتأثر استرداد المياه العذبة المخزنة بشكلٍ

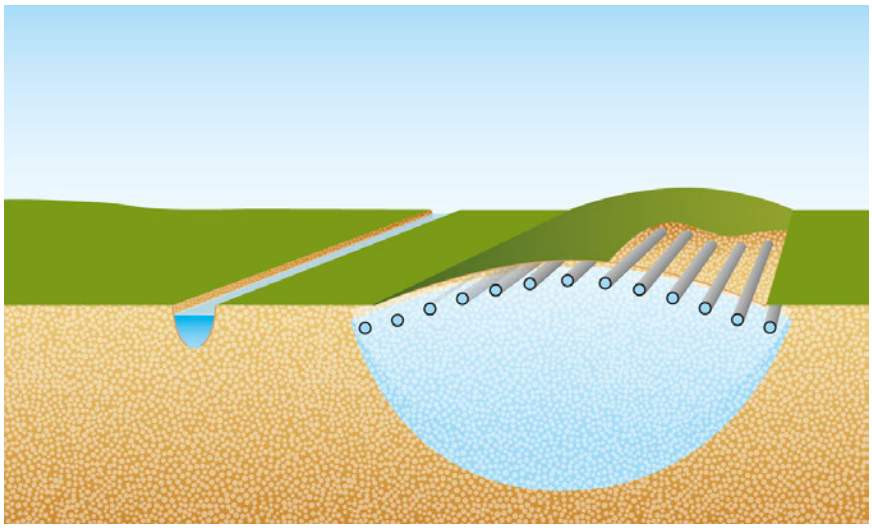
سلبيٍ بالجريان الجانبي وتأثيرات الكثافة والخلط المنتشر ؛ حيث يسبب ذلك في تقليل كمية المياه المحقونة التي يمكن استردادها ، عليه فقد تم تطوير تقنيات التغذية المبتكرة في منطقة الدفيئة داخل جنوب غرب دلتا هولندا (خريطة 5.5) (Veraart et al.2017)

الناحية التقنية

يقوم نظام فريش مايكر Freshmaker بتوسيع عدسة المياه العذبة خلال فصل الشتاء؛ عن طريق حقن المياه العذبة من خندق قريب إلى المياه عبر بئرٍ أفقيٍ ضحل بطول 70 مترًا (شكل 5.5)، بالإضافة إلى بئرٍ أفقيٍ ثانٍ أعمق يعترض باستمرار المياه الجوفية المالحة التحتية ويصبها في حفرة أخرى، وبالتالي عند نقص مياه الري في فصل الصيف يمكن استخدام عدسة المياه العذبة المُكبرة للري (Zuurbier et al., 2013b).



شكل 5.5: عدسة اصطناعية للمياه العذبة داخل المياه الجوفية المالحة مع تسرب المياه العذبة المتاحة خلال أشهر الشتاء واستخدامها للري خلال أشهر الصيف..



شـــكل 6.5: نظـام رشـح التلال الخورية (ذات الـــجـــداول المـائيـة)؛ حيـث يتم تســريب المياه العذبة إليها من خلال نظام تصـــريف على عمق 1.20 متـر تـحـت مســـتوى ســـطح الأرض، مع توســـعة عدســـة المياه العذبة التي تستخدم للري في فترات الجفاف.

وخلال التجربة الحقلية؛ أزيحت واجهة المياه العذبة – مالحة إلى الأسفل من عمقٍ مبدئي يبلغ حوالي 5 أمتار إلى عمق البئر العميق، ومنها تم توليد كميةٍ إضافيةٍ من المياه العذبة تبلغ 4200 متر مكعب، وخلال مرحلة السحب انتقلت واجهة المياه العذبة – مالحة إلى الأعلى دون ان تصل أعلى البئر(Zuurbier et al., 2014) ، كما وقدرت تكلفة المياه المنتجة باستخدام هذا النظام بـ 0.35 يورو/ متر مكعب (Vink et al., 2010)، في حين يتقاضى مزود خدمة المياه الزراعية المحلية 0.60 يورو / متر مكعب

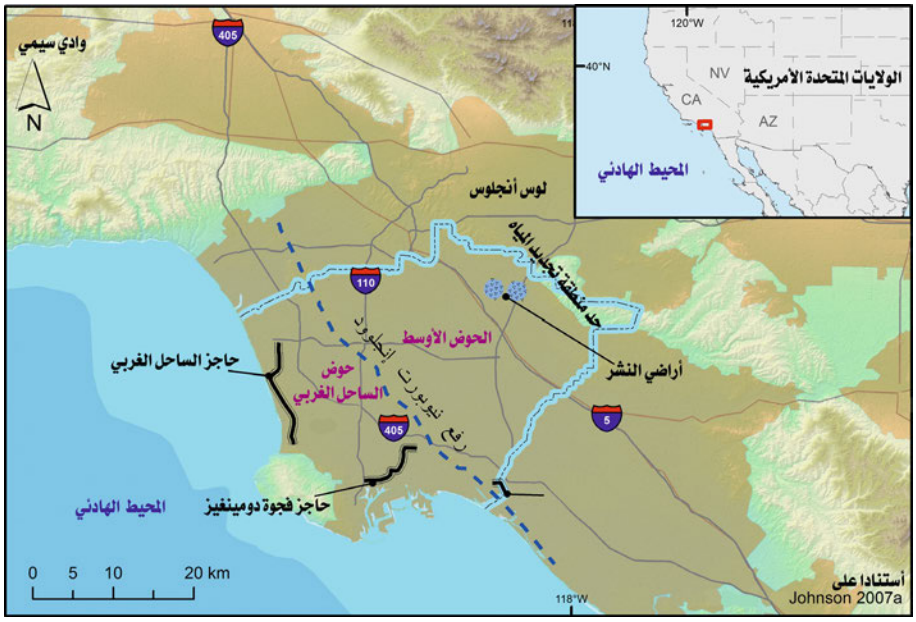
من الممكن أن تكون جداول المد والجزر السابقة مرتفعة قليلاً فوق الأرض المحيطة بالمناطق الساحلية المسطحة والمنخفضة؛ لأنها مملوءة بالرواسب الرملية الأقل عرضة للهبوط من الترسبات الطينية في المنطقة المجاورة، تحتوي بعض هذه التلال الخورية (ذات الجداول المائية) على عدسة مياهٍ عذبة يتراوح سمكها بين 10 و15 مترًا؛ بسبب ارتفاعها العالي ونفاذيتها الأكبر من التربة الطينية المجاورة.

خلال تجربةٍ عام 2013؛ تم حقن المياه في عدسةٍ واحدة من المياه العذبة في الجزء الجنوبي الغربي من هولندا (مقاطعة زيلاند) لتوسيع حجمها، وحدث التسرب عن طريق بلاطة المصارف المتعددة عند 1.2 متر تحت السطح مغطية عرض العدسة بالكامل (شكل 6.5)، كما تم تصميم شبكة مراقبة شاملة لفهم عمليات المياه الجوفية وتحسين أداء النظام، ما نتج عنه خلال الشهر الأول من المشروع ارتفاع منسوب المياه الجوفية بمقدار 0.5 متر وتحركت واجهة المياه العذبة – المالحة إلى أسفل بمقدار 15 سم.

4.5. نُهُج الهندسة تحت السطحية

تعتبر الحلول الهندسية التحت السطحية المانعة لتداخل مياه البحر عالية التكلفة في الغالب وتتطلب بنية تحتية تقنية معقدة، وبالتالي فقد استوعبت بشكلٍ محدود، حيث لا يوجد إلا القليل من توصيفها التفصيلي في الأدبيات، اثنان منها معروضان هنا: الحواجز الهيدروليكية (لوس أنجلوس، الولايات المتحدة الأمريكية) والسدود التحت سطحية (شاندونغ، الصين).

الحالة 6 : آبار الحقن والحواجز الهيدروليكية (لوس أنجلوس، كاليفورنيا).



خريطة 6.5: موقع لوس أنجلوس، كاليفورنيا ومواقع الحواجز الهيدروليكية (Johnson 2007a).

المقدمة

في جنوب غرب مقاطعة لوس أنجلوس، يوجد نظامين للمياه الجوفية (الحوض الأوسط وحوض الساحل الغربي، خريطة 6.5) بجوار المحيط الهادئ. وتسبب استخراج المياه الجوفية من أوائل القرن العشرين إلى الخمسينيات في انخفاض مناسيب المياه إلى ما دون مستوى سطح البحر، مما سمح للمياه المالحة بالتداخل والذي أدى إلى خروج العديد من الآبار من الخدمة؛ مما هدد إمكانية استخدام هذا المورد الرئيسي للمياه.

في الفترة من منتصف الخمسينيات إلى منتصف الستينيات ، اتخذت وكالات إدارة المياه الجوفية إجراءاتٍ تنظيميةٍ وتكنولوجيةٍ لوقف التداخل والسيطرة على الإفراط في السحب ، وبالنظر إلى أن معدلات الطلب وحقوق استخراج المياه الجوفية الحالية تجاوزت معدلات التغذية الطبيعية ، عليه تم إنشاء مخططات التغذية الاصطناعية وآبار حقن المياه العذبة (Johnson and Whitaker, 2004) ؛ حيث يؤمن البرنامج المتطور للرصد والإدارة للمورد المائي كمياً ونوعياً ، لذلك فإن التنفيذ الناجح لهذه المخططات يحقق استمرارية استخدام المياه الجوفية بشكلٍ مكثف من الحوضين .

الناحية التقنية

تتواجد المياه الجوفية في المنطقة في طبقات المياه الجوفية المحصورة تخلق خطوط آبار الحقن على طول الساحل حاجزًا هيدروليكيًا يمنع تداخل مياه البحر (شكل 7.5)؛

حيث تم بناء ثلاثة خطوط من آبار الحقن بين عامي 1953 و1971 (جدول 2.5)؛ حيث يصل عمق الآبار إلى 213 متر، بالإضافة إلى حواجز الحقن، تعمل منطقة تجديد المياه (WRD) أيضًا على تعزيز تغذية المياه الجوفية بشكلٍ مصطنع من خلال حقول الرش الواقعة في الجزء الشرقي من طبقة المياه الجوفية (خريطة 6.5).

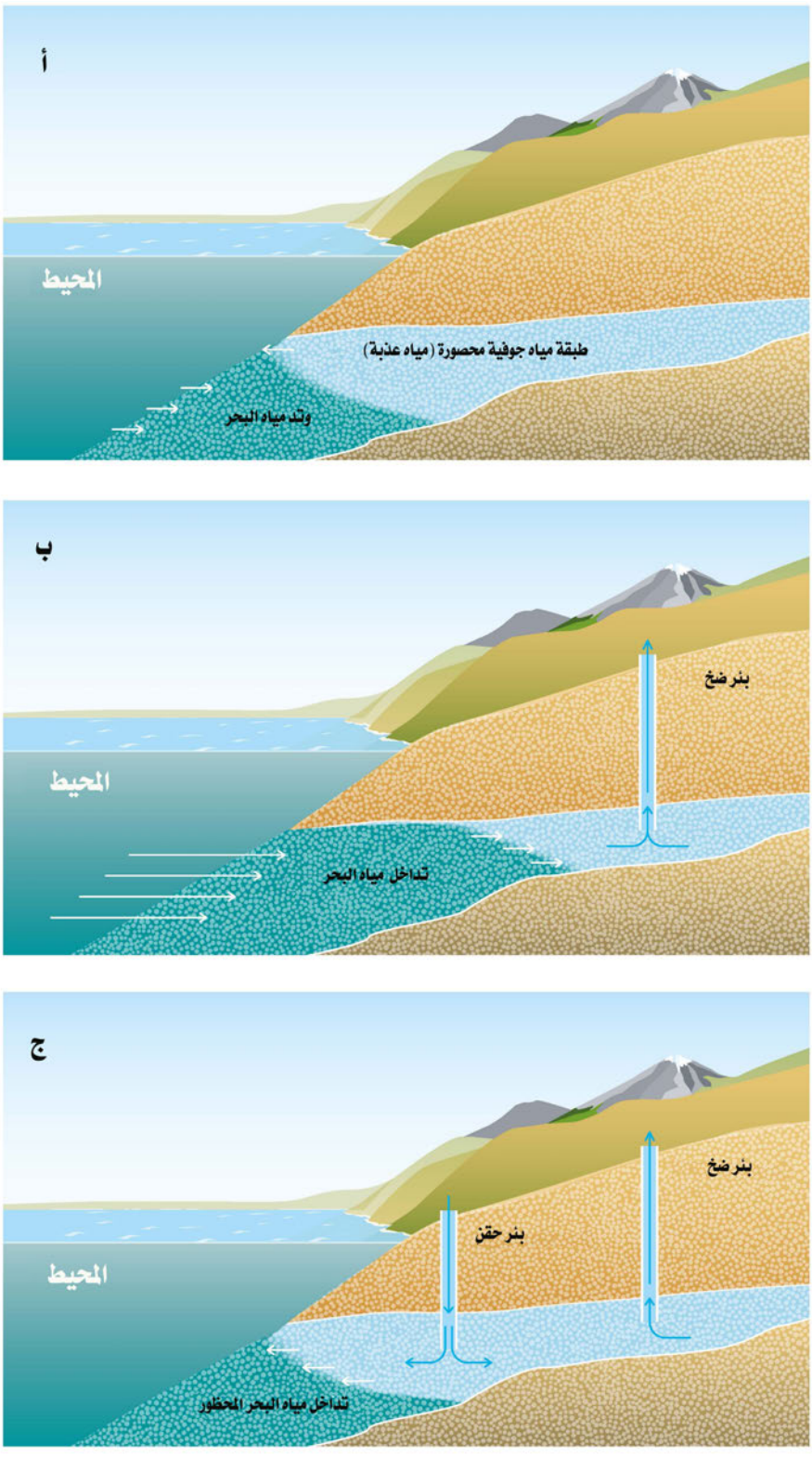
في البدء فقط حُقنت المياه المعالجة العذبة والصالحة للشرب، ولكن منذ عام 1995 تم استبدالها تدريجياً بمياه الصرف الصحي المعالجة(Chang 2013) ، وللسنوات 2018/2017، من المتوقع أن تتطلب الحواجز الثلاثة لمياه البحر ما مجموعهُ 37.744 مليون مترٍ مكعب من المياه، ومن المقرر أن يتم تغطية 86 ٪ من كمية المياه المعاد تدويرها (WRD, 2017)، كما تم أيضاً استخدام نماذج المحاكاة لتحسين أحجام المياه المحقونة وتحديد المواقع المُثلى لآبار الحقن الجديدة (Bray and Yeh 2008).

جـــدول 2.5: المقاييس الرئيســية المختارة لمشـــاريع حواجز تداخل مياه البحر في لوس أنجلوس (Chang 2013).

مشروع الحاجز	الساحل الغربي	ثغر دومينغيز	ثغر ألاموتيس
تاريخ البدء	1953	1971	1961
الطول الكلي كيلومتر	14.5	9.5	3.2
عدد آبار الحقن	153	94	43
عدد آبار المراقبة	220	257	300
الكمية المحقونة (مليون متر مكعب)	6.415	5.347	14.618

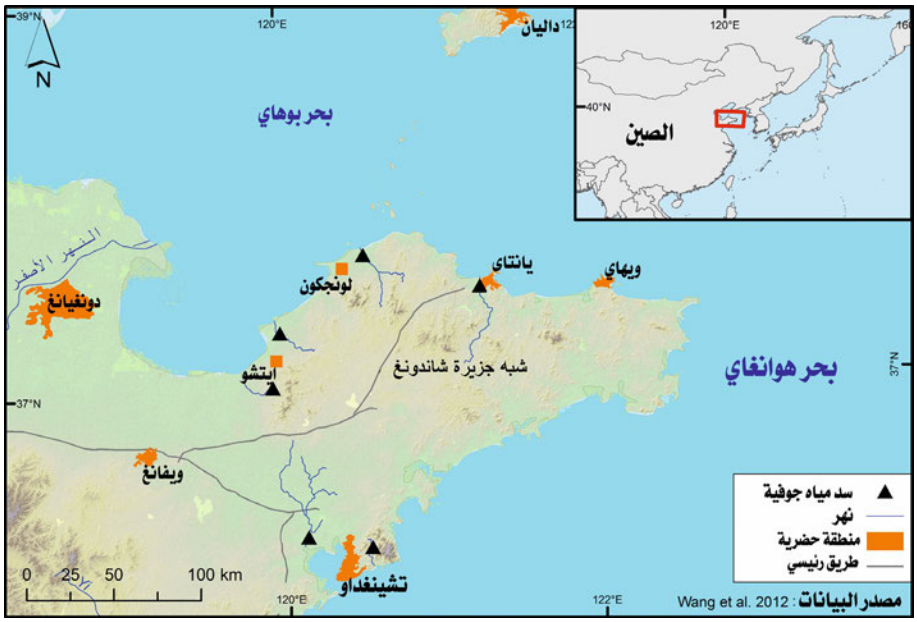
النتائج

مُنعت زيادة ملوحة المياه الجوفية من خلال حواجز الحقن ، كذلك ؛ وبسبب المعالجة المتقدمة لمياه الصرف الصحي البلدية ، فإن مشاريع الحواجز تقترب من التشغيل الكامل بالمياه المعاد تدويرها وبالتالي فهي مستقلة عن المياه العذبة المنقولة ، وبذلك تستمر المياه الجوفية في المساهمة بحوالي 40٪ من إمدادات المياه في المنطقة (Johnson and Kirk, 2012) ، ومع ذلك هناك حاجة إلى جهود فنية ومالية كبيرة ، فضلاً عن التنسيق المستمر بين مختلف المؤسسات للحفاظ على ما تم تخطيطه ، بالنسبة لعام 2018 ، كما توقعت تكاليف تجديد المياه بقيمة 25.6 مليون دولار أمريكي (WRD, 2017) للحواجز الثلاثة. كما قد تؤدي التحديات المستقبلية، مثل الطلب المتزايد وحماية جودة المياه وتجديد البنية التحتية القديمة إلى زيادة التكاليف.(Johnson, 2007b)



شـــكل 7.5: تداخل مياه البحر والآبار الحاجزة: (أ) الحـالـة الطبيعيـة حيـث تجري الميـاه الجوفيـة العذبة نحو المحيط حيث يكون الحـد الأدنى من التـدخـل؛ (ب) الضـــخ المفرط يســحب منســوب المياه الي تحت مســتوى سـطح البحر مما يتسـبب في تداخل مياه البحر؛ و (ج) تزيد آبار الحقن من الضـــغط بحيـث ترتفع منـاســـيـب الميـاه فوق مستوى سطح البحر، مما يمنع تـداخـل ميـاه البحر (Johnson 2007a).

الحالة 7 : حواجز الملوحة (شاندونغ، الصين)



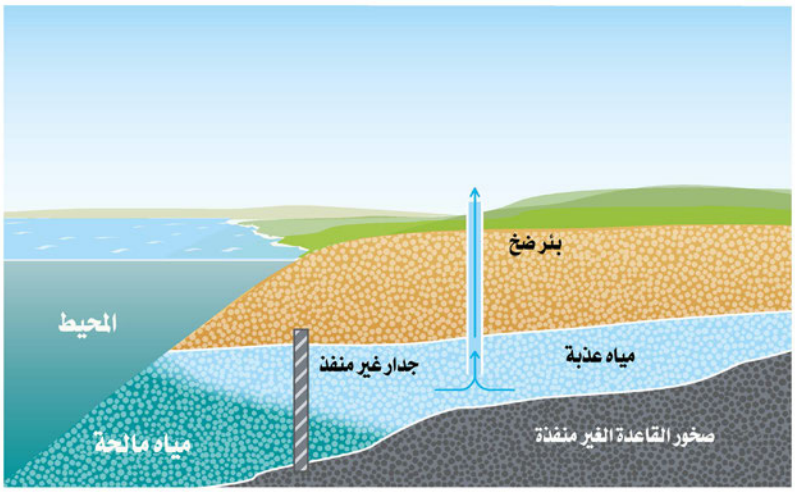
خريطة 7.5: موقع شاندونغ، الصين وموقع سدود المياه الجوفية (Wang et al. 2012).

المقدمة

تقع مقاطعة شاندونغ في الطرف الجنوبي من بحر بوهاي على الساحل الشرقي للصين. وتبلغ مساحتها 157,100 كيلومتر مربع ويقطن بها 95 مليون نسمة يعيش نصفهم تقريبًا في المراكز الحضرية ، بما في ذلك 12 مدينة يزيد عدد سكانها عن مليون نسمة ، مصادر المياه الرئيسية في المحافظة تتمثل في مياه النهر (حوالي 54٪) والمياه الجوفية (حوالي 44٪) ، كما تهطل 90٪ من الأمطار خلال فترة الرياح الموسمية الصيفية ، وتعتبر المنطقة شحيحةً بالمياه وذلك بمتوسط توافرٍ سنوي للمياه يقل عن 320 متر مكعب للفرد (Wu and Tan, 2012) ، في عام 2006 كان نقص المياه يمثل أكثر من 10٪ من الموارد المائية المتاحة سنويًا (Kutzner et al.2006) ، وأدى الاقتصاد المتنامي إلى زيادةٍ في الطلب ، كما انه منذ ثمانينيات القرن الماضي ، أفرط في استخدام موارد المياه الجوفية بشكل كبير وتطور انخفاض مستوى المياه الإقليمي بامتداد 20,000 كيلومتر مربع ، ووصل إلى المنطقة الساحلية وتسبب في تداخل مياه البحر (Monninkhoff et al. 2010). وكما هو موضح بالحالة (3) في القسم (2.5)؛ لا يؤثر تداخل مياه البحر على إمدادات مياه الشرب فحسب، بل يؤثر أيضًا على الإنتاج الزراعي بسبب تملح التربة .

الناحية التقنية

لمنع المزيد من تداخل مياه البحر، تم بناء ثمانية سدود تحت سطح الأرض في منطقة بحر بوهاي؛ حيث تم بناء الحواجز عن طريق حقن الأسمنت بضغطٍ عالٍ تحت سطح الأرض لإنشاء جدار غير منفذ يرتكز على طبقة جيولوجية غير منفذة (Ishida et al. 2011) . ، وفي حين أن السدود تشكل حاجزاً أمام تداخل مياه البحر ، فإنها تخلق أيضًا خزاناً تحت سطح الأرض للأمطار الموسمية الغزيرة (شكل 8.5) ، كما تم أيضًا بناء آبار التسرب والخنادق والقنوات أمام السد لزيادة تغذية المياه الجوفية.



شكل 8.5: مقطع عرضي لسد تحت الأرض Ishida (et al. 2011).

النتائج

كانت السدود التحت سطحية فعالة في الحد من تداخل مياه البحر وزيادة وفرة المياه المحلية. في حالة الخزان التحت سطحي بمنطقة نهر وانغ بالقرب من لايتشور (Laizhou)؛ حيث تم الانتهاء في عام 2004 من سد تحت الأرض؛ والذي بدوره أدى إلى ارتفاع متوسط منسوب المياه الجوفية إلى 3.3 متر، وانخفاض المساحة المتأثرة بتسرب مياه البحر بنسبة 68٪ (Wang 2012)، ويمكن للخزان التحت سطحي تخزين أكثر من 32 مليون مترٍ مكعب من المياه، مما يعزز بشكل كبير الأمن المائي الإقليمي ويدعم العديد من الأنشطة الاقتصادية والزراعية في المقاطعة. ويتطلب بناء خزانات تحت سطحية للمياه الجوفية وحواجز لمياه البحر معرفة جيولوجية وبيانات مراقبة جيدة، كذلك تعد البيانات الموثوقة والتوقعات حول توفر المياه والطلب عليها أمرًا حيويا في التصميم والتشغيل المناسبين، ويتوجب الاهتمام الخاص بظروفٍ معينة أو استبعادها من تطبيق التقنيات؛ فعلى سبيل المثال قد تزيد الحواجز التحت سطحية من تصريف الينابيع أو أنظمة كهوف الفيضانات في طبقات المياه الجوفية الكارستية، كما يجب أيضا تقييم الآثار المترتبة على جودة المياه (Ishida et al. 2011).

6. ملاحظات ختامية

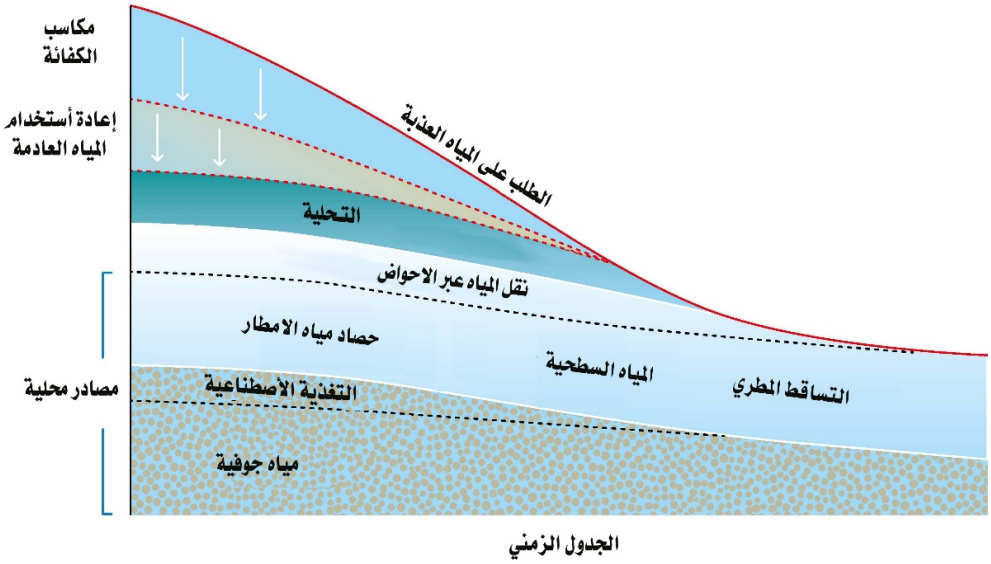
تستضيف المناطق الساحلية جزءاً كبيراً من سكان العالم والنشاط الاقتصادي ، ويشكل الإمداد الآمن بالمياه الأساس لتطورها المحتمل ، وتلعب المياه الجوفية دوراً هاماً رغم إمكانية تعرضها للتملح نتيجة لتداخل مياه البحر ؛ حيث ان الإفراط في استغلال طبقات المياه الجوفية هو المحرك الرئيسي ، كما يؤدي أيضًا إلى هبوط الأراضي ويساهم في خطر التملح ؛ كذلك السبب الآخر لتداخل مياه البحر هو فيضان المناطق الساحلية المنخفضة التي يمكن أن يزداد مستقبلاً مع ارتفاع مستويات البحر.

وكما أوضح هذا الكتيب ؛ فإن الحوكمة الجيدة للمياه الجوفية هي وحدها القادرة على تقليل التهديدات التي تواجه احتياطيات المياه العذبة في طبقات المياه الجوفية الساحلية ، يعتمد هذا أولاً وقبل كل شيء على المعرفة بعمليات المياه الجوفية وحالة موارد المياه العذبة ، وكلاهما يتطلب جمع وإدارة البيانات المستهدفة والمستدامة ، كما من الضروري وجود إطار مؤسسي فعال وقوي لتنسيق عملية المراقبة واستخدام البيانات المتاحة لتطوير السياسات والتشريعات ، وكذلك ضرورة إشراك جميع أصحاب المصلحة لنجاح الحلول لمشاكل إدارة المياه .

كما يجب أن يكون هدف الإدارة الرئيسي دائمًا هو إبقاء الطلب على المياه عند أدنى مستوى ممكن في سيناريو التنمية الساحلية الذي يتم تحديده بشكل جماعي من قبل جميع الجهات الفاعلة (شكل 6.1) ، ونظرًا لأن طلب السكان والغذاء لا يزال ينمو في معظم مناطق العالم ؛ فمن الضروري التقليل من استخدام المياه للفرد والهكتار ، كذلك من الخطوات الأساسية نحو الاستخدام الفعال للمياه هي الرصد المنتظم لاستخراج المياه وقياس استهلاك المياه ، كما يمكن أن تكون الحوافز الاقتصادية ؛ مثل الدعم لتكنولوجيات ، كفاءة استخدام المياه في الري والإنتاج الصناعي والمنزلي أدوات فعالة لتعزيز وفرة المياه ، وفي الوقت نفسه ؛ يعتبر التطبيق الصارم لحدود توزيع المياه شرط أساسي .

يمكن أن توفر المياه الجوفية المُدارةُ بشكلٍ جيد حصةً مهمةً من إمدادات المياه الساحلية ، كما هو موضح في المثال من جنوب داونز ، إنجلترا (قسم 5.1 ، الحالة 1) وتاراوا ، كيريباتي (قسم 5.1 ، الحالة 2) ، و يمكن تطبيق تقنيات التغذية الاصطناعية ؛ مثل التقنيات المعقدة في هولندا (قسم 5.3 ، الحالة 5) أو الحلول البسيطة نسبيًا مثل كيرالا ، الهند (القسم 5.3 ، الحالة 4) لتخزين المياه الزائدة عند توفرها ، كما ويزيد تنويع مصادر المياه من مقاومة ندرة المياه ، ويجب أن يكون هناك توفيرٌ مستدامٌ لمصادر المياه البديلة عندما يتجاوز الطلب المتفق عليه إمدادات النظام الطبيعي، ويمكن أن تكون هذه المصادر متعددة ، هذا وتظهر تحلية المياه ومياه الصرف في الوقت الحاضر كمصادرٍ تكميليةٍ للمياه ؛ حيث إن اقتران عملية تحلية المياه كثيفة الاستخدام للطاقة بتوليد الطاقة المتجددة يزيد من الجدوى الاقتصادية والبيئية لهذه التكنولوجيا .

مع ظهور ونمو المدن الكبرى الساحلية؛ تم تحقيق خطط نقل المياه من مساقط المياه الأخرى في العديد من البلدان، مثل مدينة تيانجين بالصين (قسم 5.2، الحالة 3) ؛ لكن مثل هذه المخططات مكلفة وقد يكون لها آثار بيئية سلبية ، وقد تُكمل الحواجز الطبيعية أو الهيدروليكية لمنع تداخل مياه البحر استراتيجية الإدارة ، كما في الأمثلة على لوس أنجلوس (قسم 5.4 ، الحالة 6) ومنطقة بحر بوهاي (قسم 5.4 ، الحالة 7).



شكل 6.1. نظرة عامة على تطور خيارات إمدادات المياه الساحلية

تجدر الإشارة إلى أن العوامل المؤثرة على طبقات المياه الجوفية الساحلية تعد ديناميكية ومتنوعة ؛ والتحولات الديموغرافية والطبيعية الجارية تعني أنه يجب التخلي عن عمليات إدارة المياه الصارمة لصالح الأساليب التكيفية ، ولا يجب أن تقتصر هذه على قطاع المياه فقط ، بل يجب عليها عبور الحدود بين الإدارات العامة والتخصصات الأكاديمية ، وبالتالي يجب على العلوم أن ترشد السياسات الجديدة ؛ كما أن القدرة المحدودة لأنظمة المياه الجوفية لتلبية الطلب على المياه تتطلب إعادة التفكير في طريقة إمدادات المياه ، والتي يجب أن تستند إلى الحلول المبتكرة والتنوع في مصادر المياه ، و يجب أن تكون مسألة وفرة المياه مبدأً توجيهيًا في التنمية الاقتصادية والتخطيط المكاني ، كما يجب ألا ينصب التركيز فقط على الاحتياجات البشرية المباشرة ولكن أيضًا على صحة النظم البيئية ، هذا وسيكون خلق هذا التوازن حساسًا في العديد من المناطق الساحلية ، ولكن ينبغي مواجهة التحديات التي تفرضها التغيرات السريعة في القرن الحادي والعشرين .

References

African Development Bank (2014): Tracking Africas Progress in Figures. Tunis: African Development Bank – Statistics Department.

Agència de Turisme de les Illes Balears (2016): El Turisme a les Illes Balears. Anuari 2015. Palma: Conselleria d'Innovació, Recerca i Turisme, Govern de les Illes Balears.

Agencia Andaluza del Agua (2009): Acuiferos del Poniente. Un tesoro bajo tus pies. Sevilla: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Barlow, M. (2003): Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast. USGS Circular 1262. Reston, VA: USGS.

BGS Geology 625k:. Reproduced with the permission of the British Geological Survey. ©NERC. Available at http://www.bgs.ac.uk/products/digitalmaps/DiGMapGB_625.html [Accessed on April 18, 2018]

Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C. B., Bullen, T.D. and G. M. Zuppi (2008): Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss–Massa aquifer, southwest of Morocco. In: *Journal of Hydrology* 352 (3-4): 267– 287.

Bray, B. S. and W. W. G. Yeh (2008): Improving seawater barrier operation with simulation optimization in southern California. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 134 (2), 171-180.

Brown, A., Langridge, R. and K. Rudestam (2016): Coming to the Table: Collaborative Governance and Groundwater Decision-Making in Coastal California. In: *Journal of Environmental Planning and Management* 59 (12): 2163–78.

Cap-Net (2010): Groundwater Management in IWRM- Training Manual. Pretoria: Cap-Net/UNDP.

Cardenas, M. B., Bennett, P. C., Zamora, P. B., Befus, K. M., Rodolfo, R. S., Cabria, H. B. and M. R. Lapus (2015): Devastation of aquifers from tsunami-like storm surge by Supertyphoon Haiyan. In: *Geophysical Research Letters* 42 (8): 2844–2851.

Chang, C. (2013): Moving towards 100% recycled water at the Seawater Intrusion Barrier Wells, Central Basin and West Coast Basin. WRD Technical Bulletin 25. Lakewood, CA: WRD.

Choukr-Allah, R., Nghira, A., Hirich, A. and L. Bouchaou (2016): Water Resources Master Plan for Sustainable Development of the Souss-Massa River Basin. In: Choukr-Allah, R., Ragab, R., Bouchaou, L. and D. Barceló (eds.): *The Souss-Massa River Basin, Morocco*: 1-26. Cham: Springer (The Handbook of Environmental Chemistry Series).

Chunmei Y., Jingsheng Y., Fan, Q. and D. Cheng (2000): Seawater intrusion disaster in Longkou City and countermeasures. In: *Shandong Geology* 16 (4): 45-49.

Closas, A. and K.G. Villholth (2016): Aquifer contracts: a means to solving groundwater over-exploitation in Morocco? GRIPP Case Study Series 1. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).

Comte, J.-C., Cassidy, R., Obando, J., Robins, N., Ibrahim, K., Melchioly, S., Mjemah, I. , Shauri, H., Bourhane, A., Mohamed, I., Noe, C., Mwega, B., Makokha, M., Join, J.-L., Banton, O. and J. Davies (2016): Challenges in Groundwater Resource Management in Coastal Aquifers of East Africa: Investigations and Lessons Learnt in the Comoros Islands, Kenya and Tanzania. In: *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5: 179–99.

Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J.L., Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, A. and A. del Villar (2016): Groundwater Intensive Use and Mining in South-Eastern Peninsular Spain: Hydrogeological, Economic and Social Aspects. In: *Science of the Total Environment* 559: 302–16.

Custodio, E. and G. A. Bruggeman (1987): Groundwater problems in coastal areas: a contribution to the International Hydrological Programme. Studies and reports in hydrology. Paris: UNESCO.

Dawoud, A. M. (2004): Design of national groundwater quality monitoring network in Egypt. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 96 (1-3): 99–118.

Deltares (2015): Sinking cities: An integrated approach towards solutions. Available at: https://www.deltares.nl/app/uploads/2015/09/Sinking-cities.pdf [Accessed on July 4, 2016]

Deyà-Tortella, B., Garcia, C., Nilsson, W. and D. Tirado (2016): The effect of the water tariff structures on the water consumption in Mallorcan hotels. In: *Water Resources Research* 52: 6386–6403.

El-Agha, D., Closas, A. and F. Molle (2017): Below the radar: the boom of groundwater use in the central part of the Nile Delta in Egypt. In: *Hydrogeology Journal* 25 (6):1621–1631.

FAO (1997): Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Guidelines for Study, Monitoring and Control. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO.

FAO (2015): Groundwater Governance- a call for action: A Shared Global Vision for 2030. Rome: FAO.

Farid, M. S. (1985): Management of Groundwater System in the Nile Delta. PhD Thesis, Cairo University. Cairo, Egypt.

Ferguson, G. and T. Gleeson (2012): Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. In: *Nature Climate Change* 2: 342–345

Fetter, C. W. (1994): Applied Hydrogeology. New York: Macmillan College Publishing Company.

Galvis-Rodriguez, S., Post, V., Werner, A., Sinclair, P. and A. Bosserelle (2017): Sustainable management of the Bonriki Water Reserve, Tarawa, Kiribati. SPC Technical Report SPC00054. Suva, Fiji: Pacific Community. Available at: http://caia.gsd.spc.int/index.php/reports [Accessed on May 31, 2018]

Garing, C., Luquot, L., Pezard, P. A. and P. Gouze (2013): Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain. In: *Applied Geochemistry* 39 (): 1-10.

He, X., Xiaoqin, L., Lei, Z and J. Guoping (2006): The Challenge of Managing Groundwater Sustainably: Case Study of Tianjin, China. In: *International Review for Environmental Strategies* 6 (2): 387 – 402.

Hof, A., Blázquez-Salom M., Colom M. C. and A. B. Périz (2014): Challenges and Solutions for Urban-Tourist Water Supply on Mediterranean Tourist Islands: The Case of Majorca, Spain. In: Bhaduri A., Bogardi J., Leentvaar J., Marx S. (eds.): *The Global Water System in the Anthropocene*: 125-142. Cham: Springer (Springer Water).

Hssaisoune, M., Boutaleb, S., Benssaou, M., Beraaouz, E.-H., Tagma, T., El Fasskaoui, M. and L. Bouchaou (2012): Geophysical and structural analysis of the Souss–Massa aquifer: synthesis and hydrogeological implications. In: Geo Eco Trop. 36: 63–82.

Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, D., and S. Xu (2009): Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. In: *Environmental Earth Sciences* 59 (2), 269-276.

HydroMetrics (2008): Seawater Intrusion Response Plan Seaside Basin. Monterey County, California.

IGES (2007): Sustainable groundwater management in Asian cities: A summary report of Research on sustainable water management in Asia. Freshwater Resources Management Project. Hayama: IGES. Available at: http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/981/attach/00_complete_report.pdf [Accessed on May 21, 2014].

IGRAC (2012): Saline and brackish groundwater at shallow/intermediate depths. Genesis and World-wide Occurrence. Paper presented at the *39th IAH Conference*, Niagara Falls, Canada, September 16-21, 2011.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge / New York: Cambridge University Press.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley Cambridge / New York: Cambridge University Press.

Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S. and M. Imaizumi (2011): Sustainable use of groundwater with underground dams. In: *Japan Agricultural Research Quarterly* 45 (1): 51-61.

Johnson T. (2007a): Technical Documents on Groundwater and Groundwater Monitoring Battling Seawater Intrusion in the Central and West Coast Basins. WRD Technical Bulletin 13. Available at: http://www.wrd.org/engineering/reports/TB13_Fall07_Seawater_Barriers.pdf [Accessed on May 14, 2014]

Johnson T. (2007b): Will climate change affect groundwater in the central and west coast basins? WRD Technical Bulletin 10. Available at: http://www.wrd.org/engineering/reports/TB10_Winter_2007_Climate_Change.pdf [Accessed on May 14, 2014]

Johnson, T. and T. Kirk (2012): Southern California meets water demands and controls saltwater intrusion. Application Note. Available at: https://in-situ.com/wp-content/uploads/2014/11/Aquifer-Recharge-Southern-California-Meets-Water-Demands-and-Controls-Saltwater-Intrusion-by-Using-Level-TROLL-500-Instruments.pdf [Accessed on May 22, 2018]

Johnson, T. A. and R. Whitaker (2004): Saltwater intrusion in the coastal aquifers of Los Angeles County, California. In: Cheng, A.H. and D. Ouazar (eds.): *Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Case Studies:* 29-48. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.

Jones, H. K. and N. S. Robins (eds.) (1999): National Groundwater Survey. The Chalk aquifer of the South Downs. British Geological Survey - Hydrogeological Report Series. Keyworth, Nottingham: BGS.

Kamps, P., Nienhuis, P., Van den Heuvel, D. and H. De Joode (2016): Monitoring Well Optimization for Surveying the Fresh/Saline Groundwater Interface in the Amsterdam Water Supply Dunes. Proceedings of the 24th Salt Water Intrusion Meeting and the 4th Asia-Pacific Coastal Aquifer Management Meeting, 4 –8 July 2016, Cairns, Australia.

Karim, T., Von Igel, W., Escobar Soler, M. and L. Candela (2008): Analysis of water use patterns and conflicts in the Sa Pobla Plain and Alcudia Bay (Majorca, Spain). In: El Moujabber, M., Shatanawi, M., Trisorio-Liuzzi, G., Ouessar, M., Laureano, P., Rodríguez, R. (eds.): *Water culture and water conflict in the Mediterranean area:* 131-142. Bari: CIHEAM (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens, n. 83)

Kataoka, Y. (2010): Water Resource Management in Asian Cities–Case Studies of Groundwater Management. In: Sumi, A., Fukushi, K., Honda, R. and K. M. Hassan (eds.): *Sustainability in Food and Water:* 19-27. Dordrecht: Springer Netherlands.

Kooi, H. and J. Groen (2003): Geological processes and the management of groundwater resources in coastal areas. In: *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw* 82 (1): 31-40.

Kutzner, R., Zhang, B., Kaden, S. and W. Geiger (2006): Sustainable and integrated water resources management for the coastal areas of Shandong Province, China. In: *Water Science & Technology* 54 (11-12): 57-64.

KWR: Freshmaker test in Ovezande. Available at: http://www.kwrwater.nl/freshinsalt/ovezande/ [Accessed on April 29, 2014]

Leaven, M. T. (1991): Hydrogeological study of the Nile Delta and adjacent desert areas, Egypt, with emphasis on hydrochemistry and isotope hydrology. M.Sc. thesis, Free University, Amsterdam. Also published by RIGW/IWACO (Egypt) as Technical note TN 77.01300-91-01.

López-García, J. M. and R. M. Mateos Ruíz (2003): La intrusión marina en los acuíferos de la isla de mallorca (Seawater intrusion into the aquifers of the island Mallorca). In: López-Geta, J. A., de Dios Gómez, J., de la Orden, J.A., Ramos, G. and L. Rodríguez (eds.): *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos:* 383- 392. Madrid: IGME.

Mabrouk, M. B., Jonoski, A., Solomatine, D. and S. Uhlenbrook (2013): A review of seawater intrusion in the Nile Delta groundwater system–the basis for assessing impacts due to climate changes and water resources development. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10 (8): 10873-10911.

Mechlem, K. (2016): Groundwater Governance: The Role of Legal Frameworks at the Local and National Level – Established Practice and Emerging Trends. In: Water 8 (8): 347.

Michael, H. A., Post, V. E. A., Wilson, A. M. and A. D. Werner (2017): Science, society, and the coastal groundwater squeeze. In: *Water Resources Research* 53 (4): 2610–2617.

Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E. Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S. and G. Thivet (2013): Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. In: *Hydrological Sciences Journal* 58 (3): 498-518.

Moench, M., Kulkarni, H. and J. Burke (2015): Trends in local groundwater management institutions. Thematic Paper 7 / Groundwater Governance – A Global Framework for Action. Rome: FAO.

Molle, F., Gaafar, I., Ezzat El-Agha, D. and E. Rap (2016): Irrigation Efficiency and the Nile Delta Water Balance. Water and salt management in the Nile Delta: Report No.9. Cairo: Australian Center for International Agricultural Research/ Water Management Research Institute/ International Water Management Institute.

Monninkhoff, L. (2010): Overall-effective measures for integrated water resources management in the coastal area of Shandong Province, China. In: Streusloff, H. (ed.): *Integrated Water Resources Management Karlsruhe 2010: IWRM, International Conference, 24 - 25 November 2010 conference proceedings:* 107-113. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Nordpil CC-0: Urban Areas Datasets by Hugo Ahlenius, with data from the UN Population Division and World Urbanization Prospects, 2007 Revision. Available at: http://nordpil.com [Accessed on March 7, 2018]

Nelson, R. L. (2012): Assessing Local Planning to Control Groundwater Depletion: California as a Microcosm of Global Issues. In: *Water Resources Research* 48 (1): W01502.

Neumann B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J. and R. J. Nicholls (2015): Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. In: PLoS ONE 10(3): e0118571.

New, M., Lister, D., Hulme, M. and I. Makin (2002): A high-resolution data set of surface climate over global land areas. In: *Climate Research* 21 (1): 1-25.

NITI and UNDP (2015): The resource book on good practices in social sector service delivery. New Dehli: NITI Aayog, UNDP. Available at: http://www.undp.org/content/dam/india/docs/SSS-2015.pdf [Accessed on April 19, 2016]

Oude Essink G. H. P., van Baaren, E. S., de Louw, P. G. B., Delsman, J., Faneca, M. and P. Pauw (2012): Climate proof fresh ground water supply: an adaptive water management strategy with regional impact. Utrecht: Deltares, Subsurface and Groundwater Systems.

Pahl-Wostl, C., Newig, J. and D. Ridder (2007): Linking Public Participation to Adaptive Management. In: *Quevauviller, P. (ed.): Groundwater Science and Policy. An International Overview:* 150-173. Cambridge: RSC Publishing.

Pereira K. and R. Ratnayake (2013): Water integrity in action: Curbing illegal sand mining in Sri Lanka. Berlin: Water Integrity Network. Available at: http://www.waterintegritynetwork.net/wp-content/uploads/2015/04/Case_SriLanka_SandMining_EN_2013.pdf [Accessed on May 31, 2016]

Piyadasa, R. U. K. and C. M. Naverathna (2008): River Sand Mining in Southern Sri Lanka and its Effect on Environment. Paper presented at the *11th International River symposium on "A Future of Extremes"*, Brisbane, Australia. Available at: http://archive.riversymposium.com/index.php?element=PIYADASA [Accessed on May 31, 2016]

Planning Commission- Government of India (2008): Kerala Development Report. New Delhi: Academic Foundation.

Post, J. C. and C. G. Lundin (eds.) (1996): Guidelines for integrated coastal zone management. Washington D.C.: World Bank.

Raphael J. C. (2014): Mazhapolima "Rain Bounty" Well Recharge Program through Roof Water Harvesting: A Case from Kerala. Thrissur, India.

Reuters World News, May 30, 2016: 'Tourists go home': Spain tourism surge brings backlash, by S. White. Online available at: https://www.reuters.com/article/us-spain-tourism/tourists-go-home-spain-tourism-surge-brings-backlash-idUSKCN0YL0EZ (Accessed on March 10, 2018)

Robins, N. S. and L. T. Dance (2003): A new conceptual groundwater-flow system for the central South Downs aquifer. In: *Water and Environment Journal,* 17 (2): 111-116.

Robins, N. S., Jones, H. K. and J. Ellis (1999): An aquifer management case study–the chalk of the English South Downs. In: *Water Resources Management* 13 (3): 205-218.

Sappa, G. and G. Luciani (2014): Groundwater management in Dar Es Salam coastal aquifer (Tanzania) under a difficult sustainable development. In: *WSEAS Transactions on Environment and Development* 10: 465-477.

Sherif, M. M., Sefelnasr, A. and A. Javad (2012): Incorporating the concept of equivalent freshwater head in successive horizontal simulations of seawater intrusion in the Nile Delta aquifer, Egypt. In: *Journal of Hydrology* 464-465: 186-198.

Shi, L. and J. J. Jiao (2014): Seawater intrusion and coastal aquifer management in China: a review. In: *Environmental Earth Sciences* 72 (8): 2811–2819.

Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K. and J. Burke (2013): Global Map of Irrigation Areas version 5. Bonn / Rome: Rheinische Friedrich-Wilhelms-University / FAO.

Siemon, B. and A. Steuer (2011): Airborne Geophysical Investigation of Groundwater Resources in Northern Sumatra after the Tsunami of 2004. In: Märner, N.-A. (ed.): *The Tsunami Threat - Research and Technology.* Rijeka: InTech.

Skinner, J. and A. Walnycki (2016): Dar es Salaam´s water supplies need stronger, more flexible management to meet SDG6. IIED Briefing Papers. London: IIED.

Song, X., Kong, F. and C. Zhan (2011): Assessment of Water Resources Carrying Capacity in Tianjin City of China. In: *Water Resources Management* 25 (3): 857-873.

Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R. and R. J. Nicholls (2009): Sinking deltas due to human activities. In: *Nature Geoscience* 2 (10): 681-686.

UNEP (2016): Options for Ecosystem-based Adaptation (EBA) in Coastal Environments: A Guide for environmental managers and planners. Nairobi: UNEP.

USGS (2016) Land Subsidence. The USGS Water Science School. Available at: http://water.usgs.gov/edu/earthgwlandsubside.html [Accessed on July 4, 2016]

Van Steenbergen, F., A. Kumsa and N. Al Awlaki (2015): Understanding political will in groundwater management: Comparing Yemen and Ethiopia. In: *Water Alternatives* 8 (1): 774-799.

van Weert, F., van der Gun, J. and J. Reckman (2009): Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis. Report no. GP 2009-1. Utrecht: IGRAC.

Veraart, J.A., van Duinen, R. and J. Vreke (2017): Evaluation of Socio-Economic Factors that Determine Adoption of Climate Compatible Freshwater Supply Measures at Farm Level: a Case Study in the Southwest Netherlands. In: *Water Resources Management* 31 (2): 587–608.

Villholth, K. G. and B. Neupane (2011): Tsunamis as Long-Term Hazards to Coastal Groundwater Resources and Associated Water Supplies. In: Mokhtari, M. (ed.): *Tsunami – A Growing Disaster.* Rijeka: InTech.

Vink, K., Rambags, F. and N. Gorski (2010): Freshmaker: Technologie voor een duurzame zoetwatervoorziening. Report KWR2010.076. Nieuwegein: KWR Watercycle Research Institute.

Wang, K.; Li, B.; Yu, Q. and J. Wang (2012): The construction of underground reservoir and its beneficial effect on resource and environment in Shandong Province Peninsula. In: China Geological Survey – Achievements. Available at: http://en.cgs.gov.cn/achievements/201601/t20160112_35475.html [Accessed on February 20, 2018]

Weerasekera, D. (2014): Digging for development: the hidden cost of sand illegal mining. IWMI Lindha Langa Blog. Available at: http://www.iwmi.cgiar.org/2014/05/digging-for-development/ [Accessed on June 29, 2017]

Werner, A. D., Alcoe, D. W., Ordens, C. M., Hudson, J. L., Ward, J. D. and C. T. Simmons (2011): Current Practice and Future Challenges in Coastal Aquifer Management: Flux-Based and Trigger-Level Approaches with Application to an Australian Case Study. In: *Water Resources Management* 25 (7): 1831–1853.

White, I. and T. Falkland (2010): Management of freshwater lenses on small Pacific islands. In: *Hydrogeology Journal* 18 (1): 227–246.

White, E. and D. Kaplan (2016): Restore or retreat? Saltwater intrusion and water management in coastal wetlands. In: *Ecosystem Health and Sustainablility* 3 (1): e01258.

World Bank (2003): Stakeholder Participation in Groundwater Management. GW-Mate Concept Note Series 6.

WRD (2017): Engineering Survey and Report 2017. Lakewood, CA: Water Replenishment District of Southern California. Available at: http://www.wrd.org/sites/pr/files/WRD%20ESR%20Updated%20April%2027%202017.pdf [Accessed on February 23, 2018]

Wu, P., and M. Tan (2012): Challenges for sustainable urbanization: a case study of water shortage and water environment changes in Shandong, China. In: *Procedia Environmental Sciences* 13: 919-927.

Xu, Y. S., Zhang, D. X., Shen, S. L. and L. Z. Chen (2009): Geo-hazards with characteristics and prevention measures along the coastal regions of China. In: *Natural Hazards* 49 (3): 479–500.

Zekri, S. (2009): Controlling groundwater pumping online. In: *Journal of Environmental Planning* 90 (11): 3581–3588.

Zhang, X. H., Zhang, H.W., Chen, B., Chen, G.Q. and X. H. Zhao (2008): Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city. In: *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 13 (10): 2328–2336.

Zhang, C.; Dong, L.; Liu, Y. and H. Qiao (2016): Analysis on Impact Factors of Water Utilization Structure in Tianjin, China. In: *Sustainability* 8 (3): 241.

Zuurbier, K. G., Stuyfzand, P. J. and J. W. Kooiman (2013a): The Freshmaker: enabling aquifer storage and recovery (ASR) of freshwater using horizontal directional drilled wells (HDDWs) in coastal areas. Paper presented at *International symposium on managed aquifer recharge (ISMAR) 8,* 13 - 18 October 2013, Beijing, China.

Zuurbier, K. G., Bakker, M., Zaadnoordijk, W. J. and P. J. Stuyfzand (2013b): Identification of potential sites for aquifer storage and recovery (ASR) in coastal areas using ASR performance estimation methods. In: *Hydrogeology Journal* 21 (6): 1373-1383.

Zuurbier, K. G., Kooiman, J. W., Groen, M. M., Maas, B. and P. J. Stuyfzand (2014): Enabling successful aquifer storage and recovery (ASR) of freshwater using horizontal directional drilled wells (HDDWs) in coastal aquifers. In: *Journal of Hydrologic* Engineering 20 (3): B4014003.

Spatial data references

Roads, country boundaries, bathymetry: Natural Earth; *Urban areas:* Hugo Ahlenius, Nordpil, http://nordpil.com with data from the UN Population Division and World Urbanization Prospects, 2007 Revision; *US State boundaries:* GADM – http://gadm.org/; *Elevation data:* ASTER GDEM 2 *(regional scale)* / Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second *(Global scale)* – ASTER GDEM is a product of METI and NASA. Data available from the U.S. Geological Survey.

Additional sources are cited specifically within the maps.