Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (38), (Dec, 2025)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (10) ملحق العدد 38 ديسمبر 2025
ردمد: 3014-6266

تقنية خلط مياه الخزان الجوفي الرباعي بمياه الخزان المايوسيني الأوسط، بمنطقة الساحل الغربي بشمال غرب ليبيا.

عبدالسلام محمد الراجحي[1] كلية العلوم صبراتة
حسين علي خضير[2] كلية الصحة العامة الجميل

Evaluating the Efficiency of Hydraulic Blending for Improving Groundwater Quality (Quaternary and Miocene Aquifers) in Northwestern Jafara Plain, Libya.

Abdulsalam Mohamed Al-Rajhi **Faculty of Science, Sabratha**
Hussein Ali Khudair **Faculty of Public Health, Al-Jami**

تاريخ الاستلام:2025/12/8 –تاريخ المراجعة: 2025/12/12– تاريخ القبول: 2025/12/19– تاريخ للنشر : 2026 /1/16

المستخلص

تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد حلول عملية لمواجهة مشكلة الملوحة المرتفعة في الخزان الجوفي الرباعي بمنطقة شمال غرب سهل الجفارة، والتي وصلت إلى (17,000) ملج/لتر، من خلال خلطها بمياه الخزان المايوسيني الأوسط الأكثر جودة (3,200 ملج/لتر). اعتمد البحث على المنهج التجريبي التحليلي، حيث أجريت سلسلة من تجارب الخلط المخبري بنسب متدرجة، مدعومة بنموذج رياضي قائم على معادلة اتزان الكتلة.

أظهرت النتائج أن عملية الخلط أدت إلى خفض معنوي في قيم الملوحة الكلية (TDS) والموصلية الكهربائية (EC)وتوصلت الدراسة إلى أن نسبة الخلط— **(9.5 : 0.5)** أي (5%) من الخزان الرباعي مقابل (95%) من المايوسيني— هي النسبة المثلى التي حققت توازناً بين تحسين الجودة لتصل إلى (3890) ملج/لتر وبين ضمان استدامة الخزانات الجوفية. يوصي البحث بتبني حلول هندسية ميدانية مثل "وحدة الخلط الذكية" وتقنية "الآبار المزدوجة" لتعظيم الاستفادة من الموارد المائية المتاحة وتقليل الضغط على الخزانات العميقة.

الكلمات المفتاحية سهل الجفارة، الخزان الرباعي، الخلط الهيدروليكي، الملوحة (TDS)، الاستدامة المائية.

Abstract:

This study aims to develop practical solutions for the high salinity levels in the Quaternary aquifer in the northwestern Jafara Plain, which has reached 17,000 mg/L, by blending it with the higher-quality Miocene aquifer water (3,200 mg/L). The research utilized an experimental-analytical approach, conducting a series of laboratory blending experiments with gradual ratios, supported by a mathematical model based on the Mass Balance Equation.

The results demonstrated that the blending process significantly reduced Total Dissolved Solids (TDS) and Electrical Conductivity (EC). The study concluded that a blending ratio of (0.5 : 9.5) —representing 5% from the Quaternary aquifer and 95% from the Miocene— is the optimal ratio that balances water quality improvement (reaching approximately 3,890 mg/L) with the sustainability of groundwater resources. The paper recommends implementing field engineering solutions, such as "Smart Mixing Units" and "Dual Completion Wells," to maximize the utilization of available water resources and reduce pressure on deep aquifers.

Keywords: Jafara Plain, Quaternary Aquifer, Hydraulic Blending, Salinity (TDS), Water Sustainability

المقدمة:

تعد ندرة المياه العذبة وتدهور جودتها من أكبر التحديات التي تواجه التنمية المستدامة في منطقة الساحل الغربي الليبي. وبالرغم من اعتماد المنطقة بشكل أساسي على الخزان الجوفي الرباعي، إلا أن هذا المصدر يعاني من تدهور حاد في جودة مياهه نتيجة تداخل طبقات من الجبس، والمتبخرات الأخرى في الجزء السفلي من الخزان، مما أدى لارتفاع ملوحة المياه بصورة ملحوظة، حيث يصل مجموع الأملاح الذائبة (TDS) في مناطق زوارة ورقدالين وزلطن والجميل إلى (17,000) ملج/لتر، وهو ما يؤثر تأثيراً كبيراً على استخداماتها، وتجعل الاستفادة منه محدودة جداً

وفي المقابل، يتواجد الخزان الثاني (المايوسيني الأوسط) على أعماق أكثر من (240), (عبدالسلام الراجحي وآخرون, 2014). متراً، وهو خزان محصور يمتاز بجودة مياه أفضل نسبياً وإنتاجية جيدة، إلا أن الاستنزاف المستمر لهذا الخزان المنفصل يهدد استدامته ويزيد من تكلفة استخراج المياه, وعلى ضوء هذه المعطيات، تبرز ضرورة البحث عن حلول تقنية غير تقليدية لإدارة هذا التباين في جودة المياه. لذا، تتبنى هذه الدراسة تقنية خلط المياه (Water Blending Technology) ليس فقط كحل كيميائي لتحسين الجودة، بل كاستراتيجية هندسية تهدف إلى تحقيق توازن هيدروكيميائي بين الخزانات الجوفية المتاحة. ومن خلال دمج مياه الخزانين بنسب علمية دقيقة، تسعى الدراسة إلى تقليل الهدر في مياه الخزان الرباعي وتخفيف الضغط الجائر على الخزان المايوسيني الأوسط، مع تقديم نموذج عملي قابل للتطبيق الميداني يضمن استدامة الموارد المائية في منطقة الساحل الغربي.

مشكلة البحث:

تتلخص مشكلة البحث في قلة الدراسات الهيدروجيولوجية بمنطقة شمال غرب سهل الجفارة، واعتمادها المتزايد على المصادر المائية الجوفية. وعلى الرغم من وجود عدد من الخزانات المائية الجوفية في هذه المنطقة، إلا أن الخزان الجوفي الرباعي يستغل بكثافة نظراً لقربه من سطح الأرض وانخفاض تكلفة حفر الآبار به، مع ارتفاع حاد في ملوحة مياهه في معظم الأجزاء الشمالية والغربية من منطقة الدراسة، مما أدى لخروجه عن المعايير المسموح بها. من هنا ظهرت الحاجة الضرورية والماسة لهذا البحث للبحث عن مصادر جديدة أو تحسين المصادر المتاحة.

وتتبلور المشـــكلة البحثية بشـــكل دقيق في العجز عن تحديد "معادلة خلط" مثلى قادرة على دمج المصـــدرين المتباينين هيدروكيميائياً (الرباعي والمايوسـيني الأوسـط)، حيث تفتقر المنطقة إلى دراسـات تطبيقية تحدد بدقة كيف تتأثر جودة الخليط الناتج عند الانتقال من نسب خلط متساوية إلى نسب تحسين دقيقة جداً.

وبناءً على ما سبق، يمكن صياغة مشكلة البحث في التساؤلات الرئيسة التالية:

1. هل يمكن تقنياً خفض ملوحة الخزان الرباعي (17,000 ملج/لتر) إلى مســـتويات آمنة من خلال خلطها بمياه الخزان المايوسيني الأوسط؟
2. ما هو السلوك الهيدروكيميائي للأملاح الذائبة عند اختبار سلسلة خلط متدرجة تبدأ من (1:1) وصولاً إلى النسبة الدقيقة (0.5 : 9.5)؟
3. ما هي النسبة المثلى التي تحقق التوازن بين (جودة المياه الناتجة) وبين (تقليل الهدر واستنزاف الخزان المايوسيني العميق)؟
4. هل يمكن تصـميم منظومة هندسـية ميدانية (آبار مزدوجة أو وحدات خلط) تضـمن دقة تطبيق هذه النسـب في الواقع العملي؟

أهمية البحث:

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من خلال معالجتها لواحدة من أعقد المشاكل المائية في الساحل الغربي الليبي، وتتجلى هذه الأهمية في النقاط التالية:

1- الأهمية الاستراتيجية والمائية: تساهم الدراسة في إيجاد مخرج علمي لاستغلال مياه الخزان الرباعي التي ظلت مهملة أو محدودة الاستخدام بسبب ملوحتها العالية (17,000) ملج/لتر .هذا التوجه يساعد في تخفيف العجز المائي وتقليل الضغط الجائر على الخزان المايوسيني الأوسط، مما يطيل من عمر الخزانات الجوفية العميقة كاحتياطي استراتيجي للمنطقة.

2- الأهمية الاقتصادية: يقدم البحث بدلاً منخفض التكلفة مقارنة بتقنيات التحلية الصناعية (مثل التناضح العكسي) التي تتطلب استثمارات ضخمة وطاقة باهظة. إن إثبات جدوى عملية الخلط المباشر يوفر مياهاً ذات جودة مقبولة للري والأنشطة الإنشائية بأقل التكاليف التشغيلية، مما يدعم استدامة المشاريع الصغرى والمتوسطة في المنطقة.

3- الأهمية العلمية والبحثية: تعتبر هذه الدراسة إضافة نوعية للمكتبة الهيدروجيولوجية في ليبيا، حيث تنتقل من التوصيف النظري للملوحة إلى تقديم "نموذج خلط تجريبي "دقيق. وتنفرد الدراسة باختبار نسب خلط واسعة وتدريجية تصل إلى النسبة الدقيقة (9.5 : 0.5)، مما يوفر قاعدة بيانات مرجعية للباحثين حول سلوك الأملاح عند خلط مياه متباينة هيدروكيميائياً.

4- حماية التربة والبيئة: من خلال تحديد "النطاق الآمن للخلط"، تساهم الدراسة في توعية المستخدمين والمزارعين في سهل الجفارة بالحدود العلمية لاستخدام المياه المالحة، مما يحمي التربة من التملح والتردي النوعي على المدى الطويل ويحافظ على التوازن البيئي في المنطقة.

أهداف البحث:

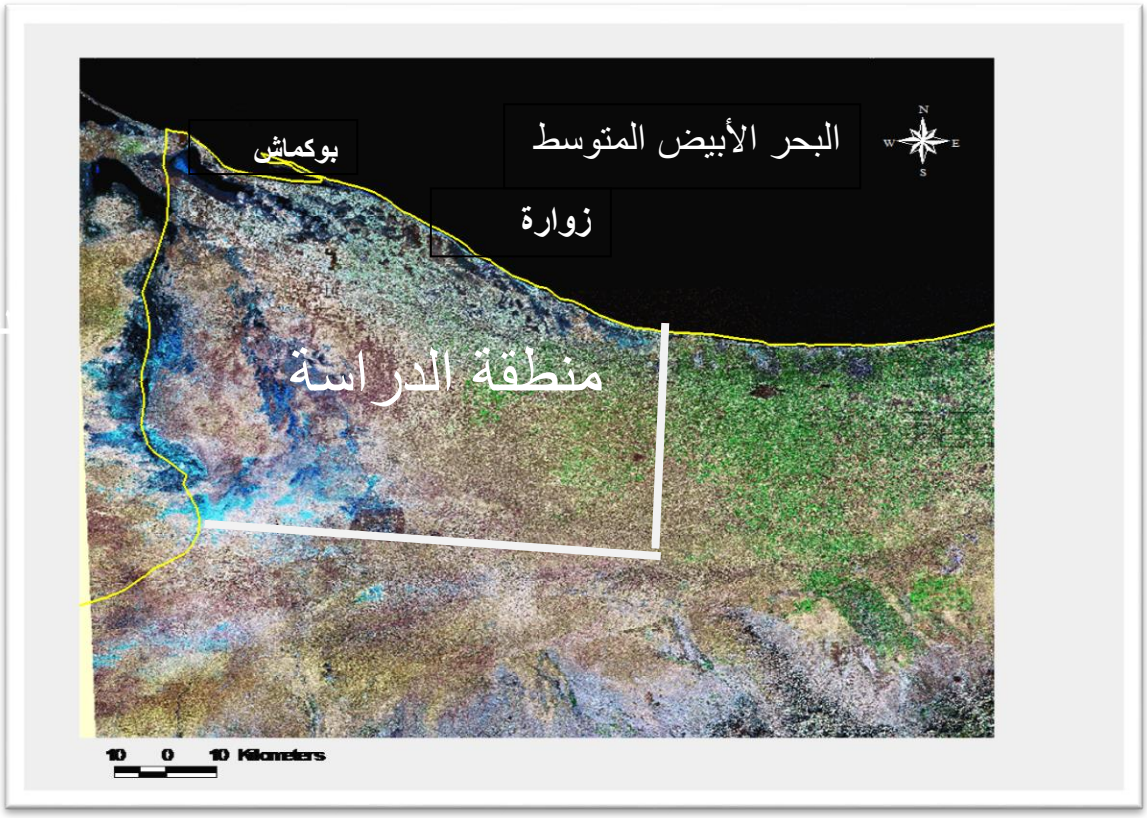
- قياس ملوحة وعناصر مياه الخزانين (الرباعي والمايوسيني الآوسط) في شمال غرب سهل الجفارة لتحديد مدى التباين بينهما.
- إجراء سلسلة خلط مخبري تبدأ من نسبة (1:1) وتصل إلى النسبة الدقيقة (0.5 : 9.5) لمراقبة انخفاض الأملاح (TDS).
- الوصول إلى أفضل "معادلة خلط" توفر مياهاً صالحة للاستخدام بأقل كمية ممكنة من مياه الخزان العميق.
- إيجاد حل لتقليل هدر مياه الخزان الرباعي وتخفيف الضغط عن الخزان المايوسيني لإطالة عمر الخزانات الجوفية.

حدود البحث:

الحدود الزمنية:

تم إنجاز هذا البحث في الفترة من 2024 – 2025 م.

الحدود الجغرافية: سيتم في هذا البحث التعرف على الإمكانات المائية بالخزان الجوفي الرباعي, بمنطقة الساحل الغربي بشمال غرب سهل الجفارة, شكل رقم (1), وإمكانية خلط مياهه بمياه الخزان المائي المايوسيني الأوسط, ومعرفة خصائص المياه المنتجة.



الشكل رقم (1) يبين منطقة الدراسة

منهج البحث وأدواته:

اعتمد الباحث على المنهج التجريبي التحليلي، الذي يجمع بين الدراســـة الميدانية والتجارب المختبرية، وفقاً للخطوات التالية:

1. الجانب المكتبي والميداني: تجميع البيانات من المراجع والمصادر لتقييم الإمكانات المائية بالخزان الرباعي، وتتبع أسباب تغير الملوحة في منطقة الدراسة.
2. الجانب المختبري (الخلط الهيدروليكي): إجراء تجارب خلط مخبرية لمياه الخزان الرباعي مع مياه الخزان المايوسيني الأوسط، بنسب متدرجة تبدأ من (1:1) وصولاً إلى النسبة الدقيقة.(9.5 : 0.5)
3. التحليل والقياس: قياس الموصـــلية الكهربائية(EC) ، ومجموع الأملاح الذائبة (TDS)، والأس الهيدروجيني (pH)للخليط الناتج، للتعرف على الخصائص الهيدروكيميائية للمياه المنتجة ومقارنتها بالمعايير المعتمدة.

مصطلحات الدراسة:

– مفهوم خلط المياه: يقصـد به إجرائياً في هذه الدراسـة: الدمج الفيزيائي المحكم لكميات محددة من مياه الخزان الجوفي الرباعي (عالي الملوحة) مع مياه الخزان المايوسـيني الأوسـط (منخفض الملوحة) وفق سـلسـلة نسـب متدرجة، بهدف الوصول إلى خليط متجانس بمستوى ملوحة مقبولة (TDS) تحقق معايير الاستخدام الآمن.

– المياه الجوفية: هي تلك المياه التي تسربت خلال طبقات الأرض واستقرت في الفراغات البينية في التكوينات الجيولوجية التي تتصف بصفات إسفنجية تسمح لها بحفظ المياه. (حسن الجديدي، 1998)

– التباين الهيدروكيميائي: يقصد به الفارق الشاسع في التركيز الملحي والعناصر الكيميائية الذائبة بين مياه الخزان الرباعي ومياه الخزان المايوسيني في منطقة الدراسة، وهو العامل الأساسي الذي استوجب البحث عن معادلة للخلط.

موارد المياه بمنطقة الدراسة:

اعتمدت المنطقة في مواردها المائية على المياه الجوفية, نظرًا لعدم وجود مياه سطحية, حيث لا توجد بها مياه دائمة الجريان ولا اودية موسـمية, وتعتمد الاعتماد التام على الآبار الجوفية المسـتغلة للخزان الجوفي الرباعي, والخزان الجوفي المايوسـيني الأوسـط, الذي اتخذ تطوراً في اسـتغلاله واسـتخداماته المختلفة , نظراً لجودة مياهه النسـبية مقارنة بمياه الخزان الجوفي الرباعي.

يمكن اسـتعراض الوضـع المائي من خلال التتابع الطبقي المخترق بالمنطقة, الذي يوضـح وجود طبقات صـخرية تكّون خزانات مياه جوفية, تختلف في إنتاجيتها ونوعية مياهها وسمكها وأعماق تواجدها, تلخيص بياناتها على النحو التالي:

– الخزان الأول: الخزان الجوفي الرباعي (Quaternary).

– الخزان الثاني: المايوسيني الأوسط (Middle Miocene).

– الخزان الثالث: المايوسيني السفلي (Lower Miocene aquifer).

– الخزان الرابع: الخزان الجوفي العزيزية (Middle to Upper Triassic).

– الخزان الخامس: الخزان الجوفي (رأس حامية) (Middle Triassic).

- الخزان السادس: اولاد شبي (Lower Miocene aquifer).
- الخزان السابع: بئر عجاج (Upper Permian).
- لخزان الثامن: الوطية (Permian).
- الخزان التاسع: الهبلية (Upper Carboniferous).

جدول (1) يوضح بعض المعلومات على الخزانات الجوفية, المستغلة والتي يمكن استغلالها. (الراجحي وآخرون, 2024)

وسيتم تقديم شرحاً عن الخزانات الجوفية المستهدف خلط مياهها بالمنطقة.

ر . م	أسم الخزان المستغل	بداية الخزان متر	السمك	الإنتاجية م^3 /ساعة	درجة الحرارة درجة مئوية	الأملاح الذائبة ملج / لتر
1	الرباعي Quaternary	5 – 40	240	40	أقل من 30	9000 – 74000
2	المايوسيني الأوسط Middle Miocene	200 – 250	200	100	أقل من 30	2600 – 3500
3	المايوسيني السفلي Lower Miocene	350 – 430	122	50	أقل من 30	3000 – 4000
4	العزيزية Middle to Upper Triassic	600 – 650	350	200	45	7200
5	رأس حامية Middle Triassic	900 – 1000	600	–	–	2700

الخزان الأول: الخزان الجوفي الرباعي (Quaternary).

خزان غير محصـــور (Unconfining aquifer), يمثل أعلى طبقة مائية بمنطقة الدراســة, يتكون من ترســبات رملية غير متماسكة, وطبقات من الحجر الرملي قليلة التماسك, وغرين ,وطين, وزلط, وفي الجزء السفلي من الخزان ترسبات من الجبس, يتراوح سمكه من (200 – 220) مترًا, ويبلغ السمك المشبع حوالي (190) مترًا, (الراجحي والباروني, 1989) تتراوح إنتاجية الآبار التي تســتغل الخزان الجوفي الرباعي ما بين (20 – 100) مترًا مكعبًا / ســاعة, ومجموع الأملاح الكلية الذائبة (T.D.S.) بمياه هذا الخزان ما بين (3000 – 4000) ملليجرام / لتر بجنوب منطقة الدراســة وشرقها, والناقلية ما بين (1.2×10^{-3} الى 1.0×10^{-1}), (Elbarouni 2004),

ونظراً لتداخل طبقات من الجبس, والمتبخرات الأخرى في الجزء الســفلي من الخزان, فإن ملوحة المياه بالخزان ترتفع بصورة ملحوظة, ويصل مجموع الأملاح الذائبة (T.D.S.) إلى (17000) ملليجرام / لتر, والتي تؤثر تأثيراً كبيراً على نوعية المياه, كما في مناطق زوارة, ورقدالين, وزلطن, والعســـة, والجميل, وملوحة المياه العالية بهذه المناطق تؤثر تأثيراً كبيراً على استخداماته, وتجعل الاستفادة منه محدودة جداً. (International Company. B.V, 1994)

2- الخزان الثاني: المايوسيني الأوسط (Middle Miocene).

خزان محصـور (Confining aquifer), يمتد من البحر شـمالاً إلى فالق قفصـه العزيزية جنوباً, يتواجد على أعماق أكثر من (240) مترًا تحت سـطح الأرض, وسـمكه من (125 – 200) متر, تفصـله عن الخزان الرباعي طبقة من الطين, والطيني الرملي, وعن الخزان المايوسـيني السـفلى طبقة من الطين, مسـتغل بشـكل جيد في منطقة العسـة, إنتاجية بعض الآبار المحفورة لاستغلال هذا الخزان تصـل إلى حوالي (100) متر مكعب / سـاعة، ومجموع الأملاح الكلية الذائبة (T D S) يتراوح ما بين (2600 – 3500) ملليجرام / لتر, وهي مياه جيدة نسـبياً, مقارنة بمياه الخزان الجوفي الرباعي الذي يعلوه. (Condrill AB . 2005)

خصائص الآبار بمنطقة الدراسة:

يوجد عدد من التصـاميم للآبار التي نفذت في منطقة الدراسـة, في الخزان الجوفي الرباعي, والخزان الجوفي المايوسيني الأوسط, كالآتي:

أولاً: خصائص الآبار التي تستغل الخزان الجوفي الرباعي,

1- آبار خطية (Liner) تحفر بقطر واحد من البداية الى النهاية.

2- أعماق الآبار من (80 – 150) متراً.

3- يستخدم في تصميمها الغلاف الزلطي (Gravel pack) بين الفراغ الحلقي وأنابيب المصافي في الطبقة المنتجة.

4- مستوى الماء الثابت هو منسوب المياه بالخزان الرباعي.

ثانياً: خصائص الآبار التي تستغل الخزان الجوفي الرباعي.

1- تحفر الآبار التي تستغل الخزان الجوفي المايوسيني الأوسط على مرحلتين خطية (Scopic) تحفر بقطر واحد من البداية الى النهاية.

2- أعماق الآبار من (275 – 340) متراً.

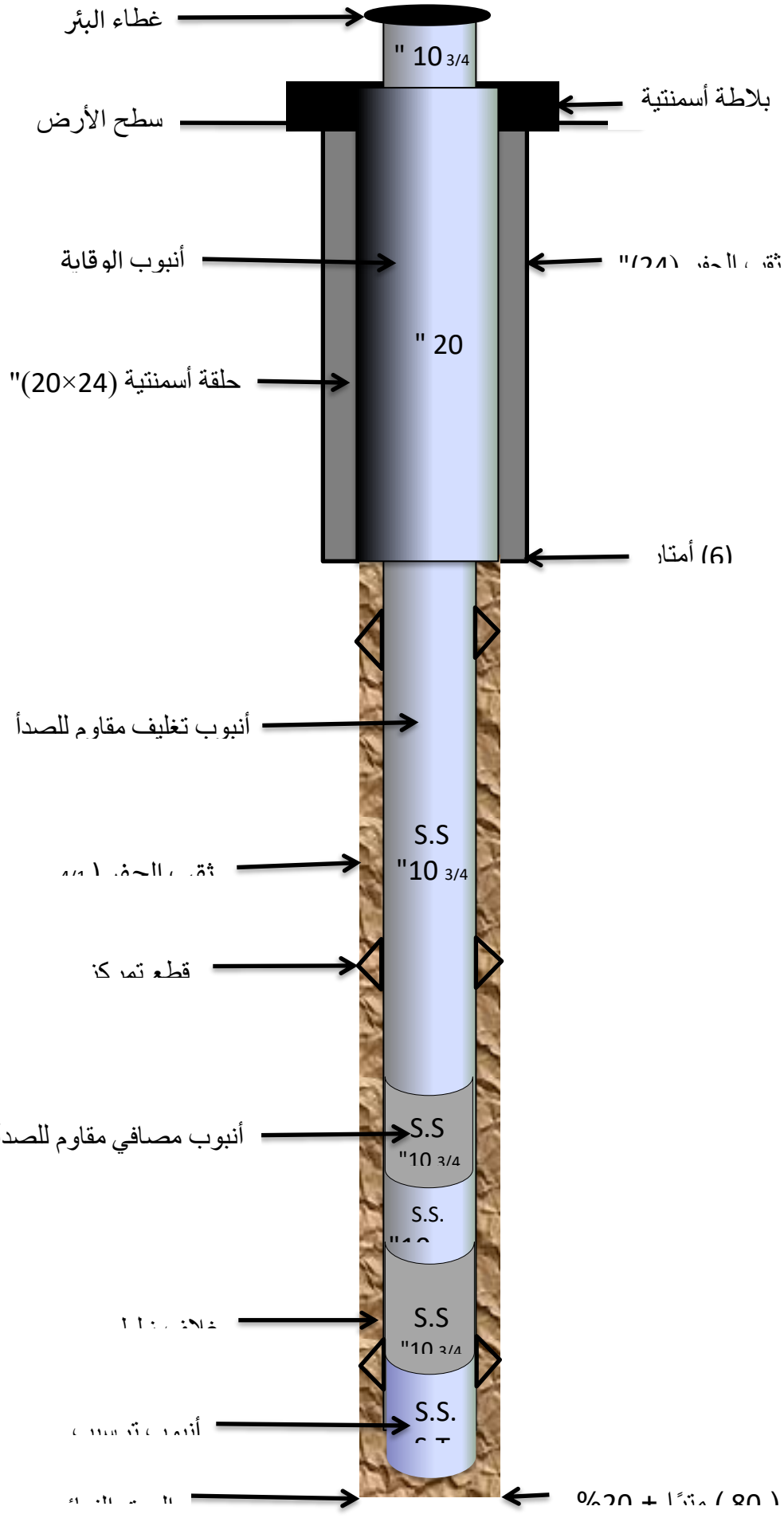
3- يستخدم في تصميمها الغلاف الزلطي (Gravel pack) ما بين الفراغ الحلقي وأنابيب المصافي في الطبقة المنتجة.

4- مستو الماء البيزومتري أعلى من مستوى الماء الثابت ومعظم الآبار ارتوازية.

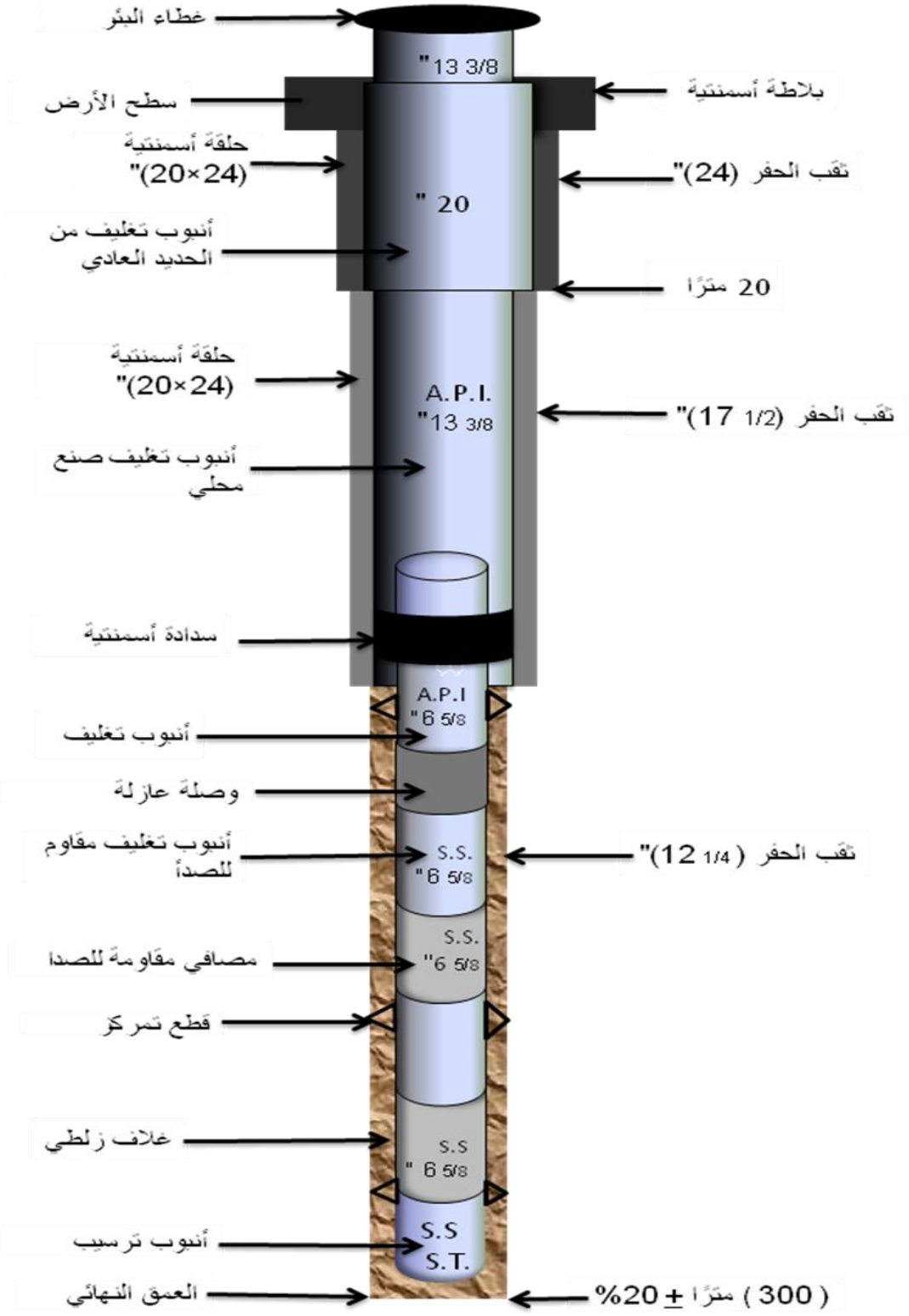
5- الآبار تستغل الخزان الجوفي المايوسيني الأوسط..

6- تستخدم في المرحلة الأولى حلقة اسمنتية لعزل طبقة الخزان الجوفي الرباعي.

الشكل رقم (2) يوضح تصميم ممثل للآبار المستغلة للخزان الجوفي الرباعي, كما يوضح الشكل رقم (3) تصميم ممثل للآبار المستغلة للخزان الجوفي المايوسيني الأوسط.


غطاء البئر
" 10 3/4
بلاطة أسمنتية
سطح الأرض
أنبوب الوقاية
" 20
حلقة أسمنتية (24×20)"
أنبوب تغليف مقاوم للصدأ
S.S
"10 3/4
أنبوب مصافي مقاوم للصدأ
S.S
"10 3/4
S.S.
S.S
"10 3/4
S.S.

الشكل رقم (2) **تصميم ممثل للآبار المستغلة للخزان الجوفي الرباعي**



الشـــكل رقم (3) **تصميم ممثل للآبار المستغلة للخزان الجوفي الرباعي.**

منهجية البحث والعمل التجريبي

اعتمدت الدراسة على المنهج التجريبي التحليلي لتقييم إمكانات الخلط بين الخزان الجوفي الرباعي والخزان المايوسيني الأوسط، وفق المسار العملي التالي:

- **توصيف العينات:**

لإجراء تجارب الخلط بدقة، تم الحصول على عينات المياه من آبار إنتاجية مختارة تمثل الخزانين الرباعي والمايوسيني الأوسط. وقد تم الاعتماد على التقارير الفنية الموثقة لعمليات حفر الآبار في منطقتي العسة ونقاط الخمس لتحديد الأعماق الدقيقة والمواصفات الهيدروليكية لكل بئر، وضمان سحب العينات من النطاقات المائية المستهدفة حصراً (International Drilling Company, 1994; Condrill AB, 2005). تم بعد ذلك نقل هذه العينات للمختبر لبدء تجارب الخلط وفق النسب المحددة في الدراسة.، والجدول التالي يوضح خصائص العينات قبل البدء في تجارب الخلط:

جدول رقم (2): الخصائص الهيدروكيميائية الأولية لعينات المياه الخام

رقم العينة	نوع الخزان الجوفي	EC (µs/cm)	TDS (ملج/لتر)	pH
S1	الخزان الرباعي (السطحي)	26,300	17,000	7.4
S2	الخزان المايوسيني الأوسط	4,920	3,200	7.8

- الإجراءات المختبرية:

تمت عمليات الخلط في بيئة محكومة باستخدام دوارق زجاجية معيرة لضمان دقة الحجوم، مع استخدام جهاز التقليب المغناطيسي (Magnetic Stirrer) لضمان التجانس التام ومنع الترسيب، ثم قياس الخصائص الهيدروكيميائية (TDS, EC, pH) بواسطة أجهزة رقمية حديثة ومعايرة.

- النموذج الرياضي المستخدم (Mixing Algorithm)

لتحقيق هدف البحث في تحديد نسب الخلط المثلى، تم استخدام معادلة اتزان الكتلة (Mass Balance Equation) للتنبؤ بخصائص المزيج الناتج:

$$C_{mix} = \frac{(V_1 \times C_1) + (V_2 \times C_2)}{V_1 + V_2}$$

C_{mix} :– هو تركيز الأملاح النهائي

(C_1, C_2):– تراكيز المصادر

(V_1, V_2):– الأحجام المستخدمة من كل خزان. Appelo, et al. (2005)

تم إجراء (6) تجارب خلط مختبرية بنسب مئوية متفاوتة لمحاكاة الاستخدامات المختلفة المذكورة في أهداف البحث، وكانت النتائج كالتالي:

جدول (3) يوضح نتائج تجارب الخلط المختبرية لمياه الابار قيد الدراسة

رقم التجربة	نسبة الخلط (مايوسيني : رباعي)	نسبة المايوسيني (%)	نسبة الرباعي (%)	TDS الناتج (ملج/لتر)	EC الناتج (µs/cm)	الاستخدام المقترح
1	1:1	%50	%50	10,100	15,625	أغراض إنشائية وصناعية محدودة.
2	2:1	%66.7	%33.3	7,800	12,060	ري الغابات الشجرية الملحية.
3	3:1 (النسبة الحرجة)	%75	%25	6,650	10,285	ري محاصيل شديدة التحمل (نخيل، زيتون).
4	4:1	%80	%20	5,960	9,218	ري محاصيل متوسطة التحمل.
5	9:1	%90	%10	4,580	7,085	استخدامات منزلية عامة (غير الشرب).
6	19:1 (0.5:9.5)	95%	5%	~3,890	~6,010	أقصى جودة (تحسين مائي)

من خلال تحليل البيانات الواردة في الجدول السابق، يمكن استخلاص وتفسير النتائج التالية:

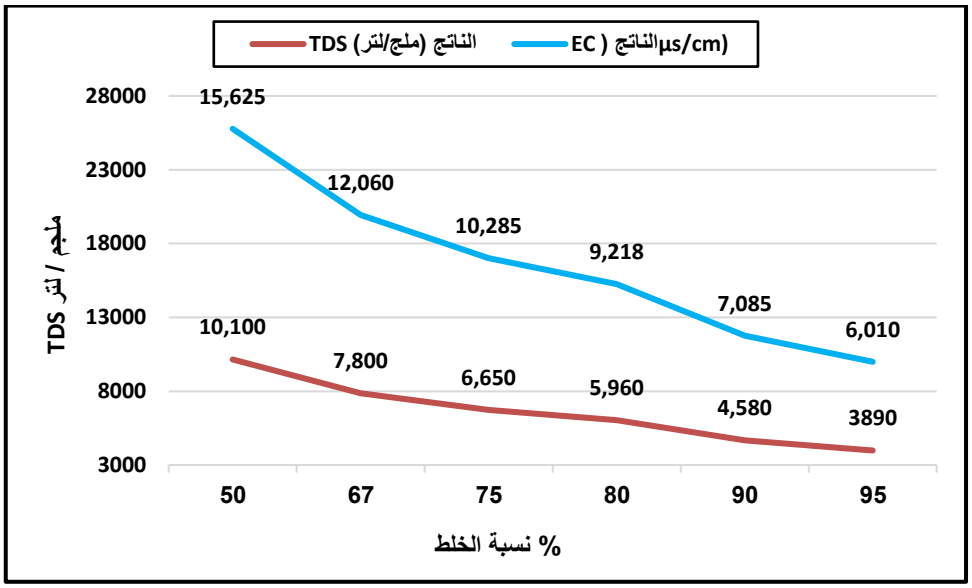
- فاعلية الخلط في خفض الملوحة: يُلاحظ وجود علاقة طردية قوية بين زيادة نسبة مياه الخزان المايوسيني وانخفاض قيم (TDS و EC) هذا التناقص يؤكد نجاح "معادلة اتزان الكتلة" في التنبؤ بجودة الخليط، حيث انخفضت الملوحة من **(17,000)** ملج/لتر (ملوحة حادة) في الخزان الرباعي إلى مستويات تقارب (4,000) ملج/لتر عند نسبة الخلط المستهدفة.

- تجاوز العتبة الحرجة للري: أظهرت النتائج أن خلط المياه بنسبة (3:1) وما فوق، ينقل جودة المياه من فئة "غير صالحة" إلى فئة "المياه شديدة الملوحة المقبولة" لري محاصيل معينة مثل النخيل والزيتون. هذا التحسن يفتح آفاقاً لاستغلال مياه الخزان الرباعي المهملة بدلاً من استنزاف الخزان العميق بمفرده.

- كفاءة النسبة الدقيقة: (9.5 : 0.5) تمثل هذه النسبة "نقطة التوازن المثلى" في البحث؛ فهي لا تكتفي بتحسين الجودة فحسب، بل تحقق هدف "الاستدامة" من خلال الاعتماد بنسبة 95% على الخزان الأجود مع التخلص الآمن والتدريجي من ملوحة الخزان السطحي عبر خلطه بنسبة ضئيلة جداً (5%) لا تؤثر على صلاحية الاستخدام المنزلي العام.

- التفسير الهيدروكيميائي :يعزى انخفاض الموصلية الكهربائية (EC) في الخليط إلى عملية "التخفيف الأيوني"، حيث تعمل مياه الخزان المايوسيني الأوسط الأقل محتوى ملحي على تقليل تركيز أيونات الكلوريد والكبريتات السائدة في مياه الخزان الجوفي الرباعي، مما يقلل من التأثير الكاوي للمياه على شبكات الري والتربة.

والشكل رقم (4) يوضح تأثير عملية الخلط على انخفاض الاملاح الذائبة الكلية, والموصلة الكهربائية لمياه الخزان الجوفي الرباعي.



شكل (4) يوضح تأثير عملية الخلط على انخفاض (TDS) و (EC) لخزان المايوسيني.

يُظهر الشكل (4) العلاقة الطردية المتوازية بين انخفاض تراكيز الأملاح الذائبة (TDS) وقيم الموصلية الكهربائية (EC) مع زيادة نسبة مياه الخزان المايوسيني في المزيج. ويعكس المنحنى كفاءة عملية 'التخفيف الأيوني' في خفض ملوحة الخليط من مستوياتها الحرجة لتستقر عند النسبة المثلى (رقم 6) بقيم تبلغ 3890 ملج/لتر و(6010) ميكروسمنز/ سم على التوالي, هذا التناقص المستقر والمطابق للقيم المحسوبة يؤكد دقة النموذج الرياضي المستخدم وموثوقية النتائج المختبرية في تحقيق التوازن الهيدروكيميائي المطلوب.

تقييم دقة النموذج الرياضي (Accuracy Assessment): لتحقيق أعلى معايير الموثوقية العلمية، تم إجراء مطابقة إحصائية بين قيم الأملاح الذائبة (TDS) الناتجة عن "معادلة اتزان الكتلة" والقيم الفعلية التي تم قياسها مخبرياً لعينات الخليط. يوضح الجدول رقم (3) كفاءة التنبؤ ونسبة التطابق المحققة:

جدول رقم (4): مقارنة النتائج النظرية والمخبرية ونسبة التطابق

رقم التجربة	نسبة الخلط (الرباعي : المايوسيني)	TDS المحسوب (ملج/لتر)	TDS المقاس (ملج/لتر)	نسبة التطابق (%)
1	5.0 : 5.0	10,100	10,150	99.5
2	6.7 : 3.3	7,800	7,860	99.2
3	7.5 : 2.5	6,650	6,710	99.1
4	8.0 : 2.0	5,960	6,030	98.8
5	9.0 : 1.0	4,580	4,640	98.7
6	**0.5 : 9.5 (النسبة المثلى)**	**3,890**	**3,940**	**98.7**

يُستنتج من الجدول (4) أن متوسط نسبة التطابق تجاوز (98.%)، مما يثبت قدرة المعادلة الرياضية على محاكاة الواقع الهيدروكيميائي للخزانات الجوفية بدقة متناهية, هذا النجاح يمثل المبرر التقني الأساسي للتوصية بإنشاء "وحدات الخلط الذكية" التي تعتمد في تشغيلها الآلي على هذه الحسابات الدقيقة لضمان استقرار جودة المياه.

يظهر الشكل (4) المسار الانحداري لملوحة الخليط الناتج، حيث يجسد بصرياً فاعلية عملية التخفيف الأيوني في الوصول بالتركيز الملحي إلى نقطة الاستقرار المثلى عند نسبة الخلط (0.5 : 9.5)، مما يؤكد التطابق بين النتائج المخبرية والنموذج الرياضي للتنبؤ.

الاستنتاجات:

من خلال الدراسة الميدانية والمخبرية لعمليات خلط مياه الخزانات الجوفية بمنطقة الساحل الغربي, بشمال غرب سهل الجفارة، تم التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

1. **نجاح تقنية التخفيف:** أثبتت تجارب الخلط فاعلية كبيرة في خفض الملوحة الكلية (TDS) لمياه الخزان الرباعي من **(17,000) ملج/لتر** إلى مستويات مقبولة تقنياً، مما يجعلها مورداً مائياً إضافياً يمكن استغلاله.

2. **تحديد النسبة المثلى:** تعتبر نسبة الخلط **(0.5:9.5)** هي النسبة الأكثر كفاءة واستدامة؛ حيث حققت توازناً بين تحسين الجودة (لتصل لمستويات الاستخدام المنزلي العام) وبين الحفاظ على المخزون الاستراتيجي للخزان المايوسيني الأوسط.

3. **الجدوى البيئية:** يساهم الخلط بنسب مدروسة في تقليل الضغط الهيدروليكي على الخزان العميق (المايوسيني)، وفي الوقت نفسه يقلل من هدر مياه الخزان السطحي (الرباعي) التي كانت تُهمل بسبب ملوحتها العالية.

4. **دقة التنبؤ الرياضي:** أظهرت النتائج تطابقاً كبيراً بين القيم المحسوبة بواسطة **معادلة اتزان الكتلة** والقيم المقاسة مخبرياً، مما يجعل هذه المعادلة أداة موثوقة لتصميم أنظمة الخلط الميدانية مستقبلاً.

التوصيات:

بناءً على ما أسفرت عنه الدراسة من نتائج، يوصي الباحثان بالآتي:

1- التوصيات التقنية (آلية التنفيذ):

- وحدة الخلط الذكية: البدء في تصـــميم وتنفيذ وحدات خلط حقلية مزودة بصـــمامات تحكم رقمية وعدادات تدفق لضمان ثبات نسبة الخلط عند القيمة المحددة.(9.5 : 0.5)

- استخدام الـــ (Static Mixer): ضرورة تركيب خلاطات ثابتة داخل أنابيب التوزيع لضمان التجانس التام للمياه قبل وصولها للمستهلك أو الحقول الزراعية.

- تقنية الآبار المزدوجة: تشجيع حفر آبار بنظام (Dual Completion) للسحب من الطبقتين في آن واحد، لتقليل التكاليف الإنشائية والحفاظ على مساحة المواقع.

2- التوصيات العامة والرقابية:

- المراقبة المســتمرة: إنشــاء نظام رقابة دوري لقياس ملوحة الخليط الناتج للتأكد من عدم تذبذب نوعية مياه الخزان الرباعي، خاصة في مواسم الجفاف.

- التوعية المجتمعية: توجيه المزارعين والمســتهلكين في منطقة ســهل الجفارة لاســتخدام مياه الخلط في الأغراض المناسبة لدرجة ملوحتها (مثل ري الزيتون والنخيل) لتوفير المياه العذبة للشرب فقط.

- التوسـع في الدراسـة: إجراء دراسـات مشـابهة على بقية مناطق سـهل الجفارة لتحديد "معادلات خلط" خاصـة بكل منطقة بناءً على تباين الملوحة المحلي.

المراجع العربية:

1. الجديدي، حسن محمد .(1998) *أسس الهيدرولوجيا العامة*، منشورات جامعة طرابلس، ليبيا.
2. الراجحي، عبد السلام، والباروني، سليمان .(1998) الإمكانيات المائية بالجزء الشمالي الغربي من سهل الجفارة، *مجلة الهندسي*، العددان 36 و37.
3. الراجحي، عبد السلام، وآخرون .(2014) *تقرير عن مشروع العسة الزراعي*، الهيئة العامة للموارد المائية، العسة، ليبيا.
4. الراجحي، عبد السلام، وآخرون .(2024) *تقرير عن هيدروجيولوجية شمال غرب سهل الجفارة*، جامعة صبراتة، ليبيا.
5. السلاوي، عبد العزيز .(1986) *أساسيات الهيدرولوجيا*، توزيع المصطلحات العلمية.

المراجع الأنجليزية:

6. Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). CRC Press.
7. Condrill AB (2005). *Final Technical Reports: Water Wells in Al-Assah Project*. (Contractors for Drilling Water Wells).
8. Elbarouni, S. S., & others (2004). *Libyan-Tunisian Jefara Aquifer System Study: Hydrology of Jefara Plain*. Tripoli, Libya.
9. International Drilling Company B.V. (1994). *Final Report of Wells No. T/1/525 - 529/94*,