

طرق جديدة في تقييم كفاءة آبار المياه الجوفية

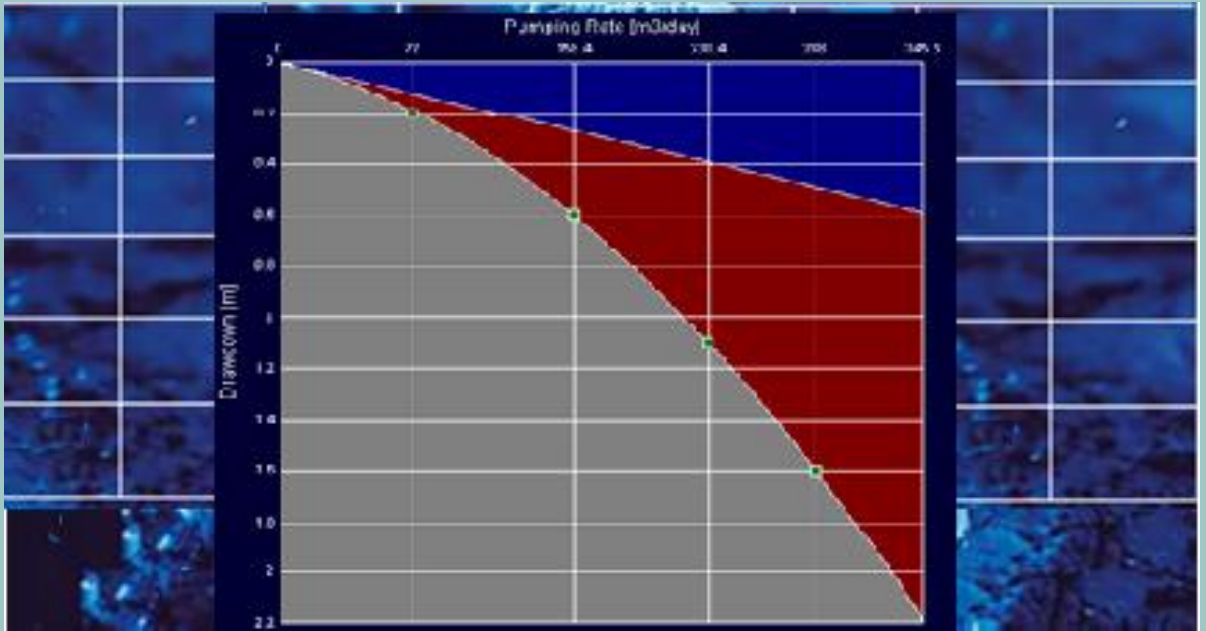
تأليف

الدكتور/ أحمد بابكر الحاج

أستاذ مشارك جامعة الملك خالد

كلية الهندسة

قسم الهندسة المدنية



الطبعة الاولى

2022م



ح) أحمد بابكر عبد القادر ، ١٤٤٤هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

القادر ، أحمد بن بابكر بن الحاج عبد
طرق جديدة في تقييم كفاءة آبار المياه الجوفية. / أحمد بن
بابكر بن الحاج عبد القادر - ط١. - . أبها ، ١٤٤٤هـ
٣١٨ ص ؛ .سم

ردمك: ٩٧٨-٦٠٣-٠٤-٢٠٦٨-١

١- المياه الجوفية أ.العنوان

١٤٤٤/١٨٣

ديوي ٥٥٣

رقم الإيداع: ١٤٤٤/١٨٣

ردمك: ٩٧٨-٦٠٣-٠٤-٢٠٦٨-١

حقوق التأليف والطبع والنشر محفوظة ولا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب إلا بإذن كتابي.

الناشر: دار المصورات للنشر

الخرطوم غرب - شارع الشريف الهندي

شرق مركز الفيحاء التجاري

موبايل: 912294714 (+249)

طرق جديدة في تقييم كفاءة آبار المياه الجوفية

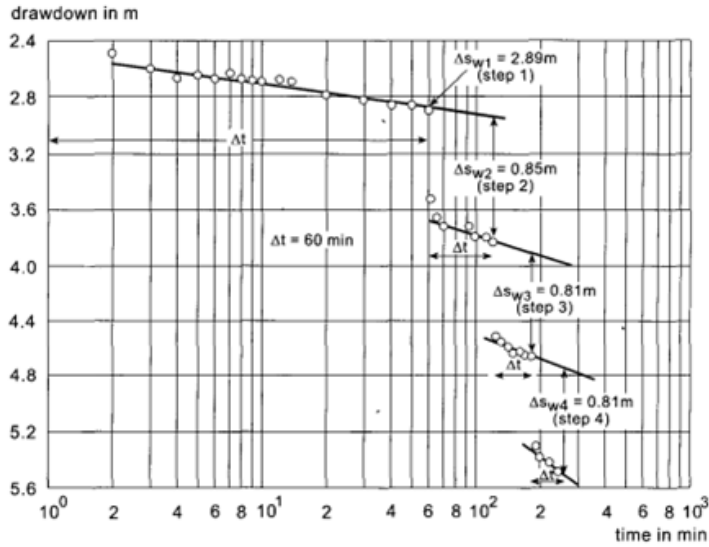
تأليف

الدكتور/ أحمد بابكر الحاج

أستاذ مشارك: جامعة الملك خالد

كلية الهندسة

قسم الهندسة المدنية



الطبعة الأولى

2022م

Email: ahmedhydro@gmail.com

abalhaj@kku.edu.sa

مقدمة الكتاب

يتناول الكتاب مفاهيم تفصيلية عن أهمية وكيفية دراسة كفاءة خزانات المياه الجوفية. ونظراً لأهمية معرفة تأثير الضخ المباشر من الأحواض المائية ومدى فعالية التصميم الجيد للآبار ومعرفة التركيب الجيولوجي للطبقات الحاملة للمياه رسوبية كانت أم صخور أساسية وتواجد المياه الجوفية فيها. حيث يمثل الاختراق الكلي والجزئي للخزان الجوفي وعمليات النظافة والتطهير وتحديد الغلاف الحصى للآبار وحجم وترتيب حبيبات الخزان الجوفي ومسامية ونفاذية الطبقة الحاملة للمياه وطريقة الضخ العناصر الأساسية لتقييم كفاءة الأحواض الجوفية وآبار المياه المعدة للأبحاث والدراسات العلمية.

يتحدث الكتاب عن حركة المياه الجوفية عبر الخزانات الجوفية المختلفة، مع احتواءه على تعريف لمفاهيم ومصطلحات هيدروجيولوجية فضلاً عن الطرق المختلفة لتجارب الإنتاج والتي عن طريقها يتم تقدير المعاملات الهيدروجيولوجية لطبقة المياه الجوفية ومعاملات الخصائص الهيدروليكية للبئر مثال السعة النوعية وكفاءة البئر، وطرق اختبار الضخ الثابت مع احتواءه على عدد وافي من الأمثلة النظرية من زيارات ميدانية والتي عن طريقها يتم توضيح كيفية تحديد كفاءة البئر. وفي هذا الكتاب تم تناول واستعراض لكافة طرق حساب فاقد الخزان الجوفي وتحديد كفاءة البئر من خلال النتائج المتحصل عليها من مراحل اختبار الضخ المتدرج مع احتواءه على أمثلة محلولة متعددة ومتنوعة حسب الحالة الهيدروليكية للخزان الجوفي وكيفية تصميم البئر.

ولقد تناول المؤلف الدكتور/ أحمد بابكر الحاج وبصورة واضحة العالقة بين مكونات الطبقات الحاملة للمياه والتصميم الأمثل للآبار وكيفية تحديد كفاءة الخزانات الجوفية والآبار وربط بين كفاءة الطبقات الحاملة للمياه وكفاءة الآبار. أيضاً تناول المؤلف

طرق تحديد كفاءة الخزانات الجوفية والآبار وكيفية الاستفادة منها في حماية مصادر المياه الجوفية من الهبوط المضطرب والنضوب واتخاذ القرارات الهندسية التي تعين متخذي القرار في الاستفادة من المياه الجوفية مع المحافظة على مخزونها كما تساهم الدراسة في توفير المعلومات الفنية للباحثين ومؤسسات البحث العملي لاتخاذ أقرب الطرق لمعرفة كفاءة الأحواض المائية حيث استفاد المؤلف من تجاربه العملية والعلمية.

(والله من وراء القصد وهو الهادي إلى سواء السبيل)

المهندس/ بخيت ابراهيم بخيت

استشاري حفر آبار المياه الجوفية

أستاذ متعاون/ هندسة آبار المياه الجوفية بالجامعات السودانية

astrihna@yahoo.com

المقدمة

أحمد الله وأشكره الذي يسر لي أمري، ونصلي ونسلم على خاتم الانبياء والمرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه وسلم. أرجو أن أكون قد وفقت في تقديم وإعداد هذا العمل المتواضع والذي أصبح بنعمة الله حقيقة واقعة راجياً من الله عز وجل أن يلقي الرضا والقبول وأن يستفيد الباحثين وطلاب العلم مما جاء فيه في حياتهم الأكاديمية والمهنية.

لقد توسعت وتطورت المعارف والعلوم وتغيرت مناهج دراستها لتحاكي وتواكب مستجدات التكنولوجيا الحديثة، وبناءً على ذلك انتهج هذا الكتاب أسلوباً يفضي لتبسيط المعلومة العلمية ومواكبتها لمفردات علم الهيدرولوجيا. لذا تم في هذا الكتاب تقديم مفاهيم جديدة لاختبارات الضخ التدريجي، وفيها تم تطوير عدد من الطرق التحليلية للاختبار التدريجي. وعلى هذا الأساس يقدم هذا الكتاب طرقاتاً بارامترية جديدة لتحديد الحالة الهيدروليكية لأبار المياه وبالتحديد حول مصفاة البئر وذلك بغرض معرفة الحالة الراهنة للبئر، وعلى افتراض أن الدارس لم يقدر وافٍ من المعرفة بمنهج ضخ وتصميم آبار المياه الجوفية، بحيث أنه يستوعب كافة ما يطرح من أفكار ومنهجيات جديدة تسعى إلى تزويد الطلاب بالمعلومات ذات العلاقة بالجانب العلمي والتطبيقي.

جاءت فكرة إعداد هذا الكتاب من أجل الارتقاء بالمستوى العلمي وبغرض تجاوز الأخطاء الفنية التي ربما قد تحدث أثناء الحفر الجوفي وعند تصميم البئر والتي تتسبب في قلة الكفاءة التشغيلية لأبار المياه الجوفية. فالكتاب الذي بين أيديكم هو دراسة أكاديمية وعلمية مفصلة تشرح وتوضح كافة الطرق المقترحة التي توفر فهماً دقيقاً لواقع ومعطيات الخصائص الهيدروليكية للخران الجوفي والبئر لكي يتعامل معها الجيولوجي بصورة فعالة وسليمة. ونظراً لأن التركيز الرئيسي لهذه الدراسة

هو التحقيق في إمكانية استبدال طريقة تفسير نتائج اختبار السحب التدريجي بعدة طرق وأفكار جديدة، كان لازماً علي تقديم عدد من العلاقات والمعادلات المتعلقة بضبط كمية تصريف البئر بغرض تحقيق الكفاءة المثلى Optimum لأبار المياه.

يعرض هذا الكتاب في تسعة فصول نتائج الاختبارات الهيدروليكية الميدانية متعددة المراحل التي أجريت على آبار جوفية، تم فيها تفسير نتائج الاختبار على أسس منهجية متطورة. تسمح هذه المنهجية باختيار معدل الضخ الأقصى (الأمثل) الذي لا تحدث فيه زيادة مفاجئة في الخسائر الهيدروليكية لمصفاة البئر. فالفصل الأول عبارة عن مقدمة عن حركة المياه الجوفية عبر المكامن والخزانات الجوفية المختلفة، مع احتواءه على تعاريف لمفاهيم ومصطلحات هيدروجيولوجية مختلفة ورد ذكرها ضمن فصول الكتاب. وأتى الفصل الثاني يحمل عنوان هذا الكتاب - كفاءة آبار المياه الجوفية، ليبين الطرق المختلفة لتجارب الإنتاج والتي عن طريقها يتم تقدير المعاملات الهيدروجيولوجية لطبقة المياه الجوفية ومعاملات الخصائص الهيدروليكية للبئر مثال القدرة النوعية وكفاءة البئر، وتطرق الفصل الثالث إلى دراسة ميكانيكية ضخ آبار المياه موضحاً خطوات اجراء اختبارات الضخ المختلفة للوصول إلى أنواع خسائر الطبقة الحاملة للمياه وفقد البئر مع تحديد أهم المناطق التي تحدث فيها تلك الخسائر. ثم تفرد الفصل الرابع بشرح مفصل لطرق اختبار الضخ الثابت مع احتواءه على عدد وافي من الأمثلة النظرية والتي عن طريقها يتم توضيح كيفية تحديد كفاءة البئر. الفصل الخامس وهو فصل استعراض لكافة طرق حساب فاقد الخزان الجوفي وتحديد كفاءة البئر من خلال النتائج المتحصل عليها من مراحل اختبار الضخ المتدرج مع احتواءه على أمثلة مطولة متعددة ومتنوعة حسب الحالة الهيدروليكية للخزان الجوفي وكيفية تصميم البئر. وأتى الفصل السادس على شاكلة الفصل الخامس، وعالج هذا الفصل الخسائر التي تحدث للبئر من أجل

الحصول على قرارات صائبة في توجيه التصميم الهندسي المناسب للبئر مع تسليط الضوء بشيء من التفصيل عن كيفية حساب كفاءة البئر. وأبان الفصل السابع طريقة تقدير كفاءة البئر عن طريق تسليط الضوء على مختلف مراحل ميل مسار خط بيانات اختبار الضخ. وأعطى الفصل الثامن تقييماً دقيقاً لمعايير الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي والبئر، وجاء تحديد هذه المعايير وتفسيرها بمثابة اهتمام كبير يحتاج إلى تحليل بيانات اختبار الضخ التي يحتاجها الباحث للحصول على بيانات ميدانية أكثر موثوقية، وهذا يعني أن الهبوط الأمثل ومعدل التدفق الأمثل كدالة للوقت، ولمحاكاة هذه البيانات يجب أن تؤخذ الظروف الخاصة بمعدل الضخ الثابت والمتغير في البئر في الاعتبار عند تحليل تلك البيانات الحقلية، ويُمكن تحليل بيانات اختبار الضخ التدريجي من القياس الكمي لمكونات الهبوط – السحب في بئر تم ضخه لتحديد: تكوين أو فقدان الخزان الجوفي وخسارة البئر. أما الفصل التاسع فهو من الفصول الواسعة والمهمة والذي أعطي له اهتمام خاص، وفيه اقتضت الحاجة إلى تضمينه كافة الدراسات والأسس الخاصة بالتحكم في ضبط تصريف البئر للوصول إلى الكفاءة المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر دون حدوث فقد للبئر. ثم نظر الفصل إلى طرق القياسات المائية بالخزان الجوفي والبئر والتحليلات الاحصائية المصاحبة لها، والاستفادة منها عند تصميم الآبار في المستقبل.

لزيادة الفائدة المرجوة من هذا الكتاب تم إدراج عدد من المسائل المحولة التي جمعت بياناتها من آبار مياه ذات كفاءة قليلة وأخرى عالية الكفاءة وذلك بغرض المقارنة والتأكد من صحة هذه الطرق. وعند إعداد مادة هذا الكتاب تم الاستعانة بقائمة تضم أهم المراجع والمصادر المتعلقة بموضوع الكتاب. ومن أجل الارتقاء بالمستوى العلمي لهذا الكتاب أرجو أن لا يبخل أحد علي بأي ملاحظة أو تصويب يفيد في إكمال الكتاب في الطباعات اللاحقة على العنوان المبين أدناه.

أخيراً أتقدم بالشكر والامتنان إلى الأستاذ المهندس/ بخيت إبراهيم بخيت المحاضر بكلية هندسة المياه - جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا على جهوده التي أبداها والمراجعة العلمية لمحتويات هذا الكتاب وابداء النصح والارشاد، وهنا لا يفوتني أن أوجه خالص شكري وتقديري إلى زملائي الأفاضل كافة في قسم الهندسة المدنية بجامعة الملك خالد للدعم المعنوي الكبير طيلة فترة إعداد الكتاب. في الختام، نسأله سبحانه وتعالى أن يتقبل هذا الجهد المتواضع وأن يضعه في ميزان حسناتي يوم لا ينفع مال ولا بنون إلا من أتى الله بقلب سليم، وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

المؤلف:

د/ أحمد بابكر الحاج

جامعة الملك خالد

كلية الهندسة - قسم الهندسة المدنية

البريد الإلكتروني:

ahmedhydro@gmail.com

abalhaj@kku.edu.sa

الفهرس

التسلسل	الموضوع	رقم الصفحة
	تقديم الكتاب	I
	المقدمة	III
	الفصل الاول حركة المياه الجوفية	1
1.1	هيدروليكا الآبار	3
1.2	سرعة دخول المياه مصفاة البئر	7
1.3	قطر المصفاة	8
1.4	تصميم البئر الجوفي	9
1.4.1	أفضل ظروف تصميم البئر	12
1.5	تطوير البئر	13
1.6	عامل تنمية البئر	14
1.7	التصريف الآمن	16
1.8	الانخفاض الآمن	16
1.9	تأثير الضخ الزائد	16
1.10	إدارة موارد المياه الجوفية	17
	الفصل الثاني كفاءة آبار المياه الجوفية	19
2.1	تأثير الضخ على مستويات المياه	21
2.2	ضبط كفاءة الآبار	21

22	القدرة النوعية	2.3
24	أسباب انخفاض القدرة النوعية	2.3.1
25	العوامل التي تؤثر علي القدرة النوعية	2.3.2
26	فعالية البئر الجوفي	2.4
29	تصحيح فعالية البئر	2.4.1
29	تقييم عامل تطوير البئر	2.4.2
32	العلاقة بين القدرة النوعية وكفاءة الآبار	2.5
34	العلاقة بين القدرة النوعية والانتقالية	2.6
35	علاقة القدرة النوعية مقابل سمك الخزان الجوفي	2.7
37	الفصل الثالث تجارب الضخ	
39	ميكانيكية ضخ آبار المياه	3.1
39	تجارب واختبارات الخزان الجوفي	3.2
40	أهداف تجارب الضخ	3.3
41	أجهزة و معدات اختبار الضخ	3.4
42	اشتراطات تجارب الضخ	3.5
43	خطوات إجراءات اختبار الضخ	3.6
46	أنواع اختبارات الضخ	3.7
46	اختبار الضخ ذو المعدل الثابت	3.7.1
47	اختبار الاستعاضة	3.7.2
47	اختبار الضخ التدريجي	3.7.3

49	طريقة اجراء اختبار الضخ المتدرج	3.8
51	تفسير البيانات الحقلية لاختبار الضخ التدريجي	3.9
52	أنواع الخسائر المختلفة	3.10
55	أسباب فواقد الانخفاض في المنسوب	3.11
71	زيادة خسائر الآبار	3.12
71	الأسباب الرئيسية التي تؤدي إلى حدوث فواقد البئر	3.13
73	المقاومة الهيدروليكية	3.14
74	أسباب حدوث المقاومة الهيدروليكية	3.14.1
75	تحليل نتائج اختبارات الضخ المتدرج	3.15
85	الفصل الرابع اختبار الضخ الثابت	
87	تجربة اختبار الضخ المستمر	4.1
87	طريقة الهبوط النظري والفعلي في منسوب الماء	4.2
95	الفصل الخامس فواقد الخزان الجوفي	
97	الخصائص الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية	5.1
97	طريقة الزاوية	5.2
105	طريقة نقطة الانقلاب	5.3
116	طريقة ارتفاع عمود الماء	5.4

127	الفصل السادس فواقد البئر	
129	مكونات خسائر البئر	6.1
129	تقدير فواقد البئر عن طريق فاقد الخزان الجوفي	6.2
138	تقدير فواقد البئر عن طريق الانخفاض في المنسوب	6.3
143	الفصل السابع طريقة الميل	
145	تقييم الحالة الراهنة للبئر	7.1
145	طريقة ميل الخط المستقيم	7.2
160	طريقة تقدير الميل من نقطة ما على الخط المستقيم	7.3
167	الفصل الثامن الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي والبئر	
169	تحليل بيانات اختبار الضخ	8.1
170	تقدير كمية التصريف المثلّي	8.2
179	تقدير قيمة فاقد الطبقة المائي	8.3
191	تقدير فواقد البئر	8.4
193	تقدير قيمة ثابت خسائر الخزان الجوفي وثابت خسائر الآبار	8.5
193	ثابت خسائر فاقد الخزان الجوفي	8.5.1
199	ثابت خسائر الآبار	8.5.2
201	علاقة القدرة النوعية بإجمالي خسائر الآبار	8.6
203	فواقد البئر في حالة السكون	8.7

207	الفصل التاسع ضبط كفاءة البئر	
209	تعيين كفاءة البئر	9.1
209	الكفاءة المثلى للبئر	9.2
210	أهمية اختبار السحب المتدرج	9.3
212	نقطة التقاطع المثلى A	9.4
213	الاختبارات الهيدروليكية	9.5
214	طرق تحديد كفاءة البئر المثلى	9.6
217	تحليل خسارة الآبار	9.7
261	اختبار المجال الهيدروليكي المتعدد	9.8
268	تحديد كمية الضخ المثلى	9.9
293	قائمة المراجع	

الفصل الأول

حركة المياه الجوفية

Groundwater Movement

1.1 هيدروليكا الآبار:-

Well hydraulics

يهتم علم هيدروليكا المياه الجوفية بدراسة سريان الماء الجوفي خلال الأوساط المسامية بالتكاوين الجيولوجية المختلفة، وكيفية حساب كمية تصريف الآبار ومعدلات الهبوط في مستوى الماء الجوفي أو السطح البيزومتري الذي ينتج من عملية ضخ المياه من هذه الآبار، إضافة إلى تحديد الخصائص الهيدروليكية للتكاوين المائية التي منها يتم تحديد تصريف الآبار عن طريق اجراء اختبارات الضخ والرجوع.

أوضحت العديد من الدراسات الجيولوجية أن الماء الجوفي عندما يكون في حركة مستمرة في باطن الأرض فإنه يسلك مسار معين خلال فترة زمنية محددة. وعند دراسة حركة المياه بالخرانات الجوفية المختلفة لابد من فهم كيفية عمل البئر، ومن المعروف أن أي بئر من غير ضخ ستقف المياه فيها عند مستوى الماء الساكن *SWL* Static water level، ولكن عندما يتم تشغيل المضخة فإنها تخلق ضغطاً أقل بالقرب من البئر حول محيط المصفاة ليتدفق الماء نحو منطقة الضغط المنخفض، ويعتمد الانخفاض في مستوى الماء على معدل الضخ وكمية التغذية. وعلى هذا الأساس ينخفض مستوى الماء الساكن داخل الغلاف إلى مستوى مياه الضخ *PWL* Pumping water level، حيث يكون الهبوط أكبر داخل غلاف البئر نفسه ويقل تدريجياً كلما زادت المسافة من بئر الضخ، وينعدم تماماً في نقطة معينة.

عند تتبع تحرك المياه الجوفية داخل الأوساط المسامية نجد أنها تتحرك ببطء شديد من المناطق ذات الجهد العالي إلى المناطق ذات الجهد المنخفض، فالمياه أثناء حركتها تعبر من خط تساوي الجهد إلى آخر أقل منه في قيمة الطاقة. ولمعرفة هذه الحركة يجب الاطلاع بالمعلومات الجيولوجية المؤثرة على حركة المياه مثل التكوينة الجيولوجية والتراكيب الجيولوجية (الفوالق، الطيات والصدوع) بالإضافة إلى وجود الحواجز Barriers والتي قد تكون صماء أو مغذية. وبالتفصيل عند ضخ المياه من

الخزان الجوفي قد تكون حركة المياه الجوفية صفائحية، ويجب أن تكون وفقاً لافتراضات ديوبت Dupuit، وأيضاً من الممكن وجود ظروف تدفق مضطربة في طبقات المياه الجوفية الصدمية والمتشقة. مجمل هذه الظروف الخاصة بحركة المياه الجوفية يمكن دراستها من خلال تحليل بيانات اختبار آبار المياه. وبسبب التفاعل بين البئر ومكن المياه الجوفية، يمكن تمييز ثلاث مناطق مميزة لحركة الماء الجوفي وهي على النحو التالي:-

- المنطقة الخارجية لطبقة المياه الجوفية التي تغطي البئر.

- منطقة البئر.

- المنطقة داخل البئر.

تتباين حركة المياه الجوفية خلال الأوساط المسامية، وذلك في حالة ضخ آبار المياه بمعدلات تصريف مختلفة والتي عندها يحدث تباين في سرعة سريان المياه نحو البئر وعلى طول المصافي، ويعزى ذلك إلى استمرار تقارب Convergence خطوط السريان بالقرب من حافة Edge المصفاة الخارجية وعلى طول واجهة المصفاة. وعموماً تتأثر المياه الجوفية أثناء حركتها بعدة عوامل تتعلق بخصائص المتكون الحامل للماء، التغذية والضخ، الزمن وقيمة عدد رينولد Reynold number R_e وبناءً على ذلك يمكن التمييز بين أنواع التدفق الآتية:-

1- التدفق الصفائحي:- Laminar flow

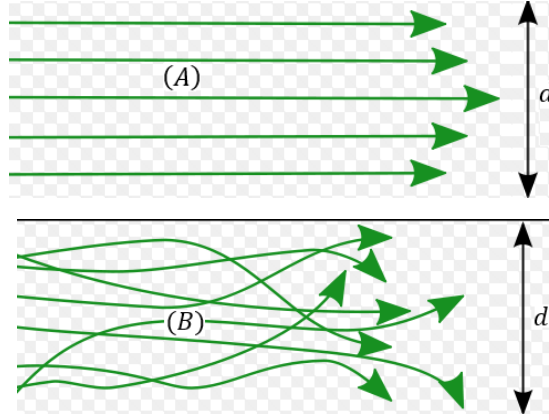
تعتمد النظريات المتعلقة بحركة المياه الجوفية على أن حركة الماء تكون صفائحية خطية وذلك عند ضخ آبار المياه الجوفية بسرعة تتوافق مع السرعة المثلى لدخول المياه فتحات المصفاة 0.031 متر/ ثانية، وفي هذه الحالة تكون أرقام رينولد صغيرة أقل من 2.3 ويمكننا أن نتوقع أن يكون التدفق رقائق لجزيئات الماء التي تتحرك في خطوط مستقيمة ومتوازية وفي اتجاهات غير متداخلة مع بعضها البعض شكل

(1.1.A)، وتكون سرعة المياه بطيئة جداً وبالتالي فإن الانخفاض في مستوى سطح الماء يتناسب طردياً مع معدل التصريف. يحدث هذا النوع من السريان في تكاوين جيولوجية (رواسب) ذات بيئات مسامية دقيقة الحجم إلى متوسطة التحبب.

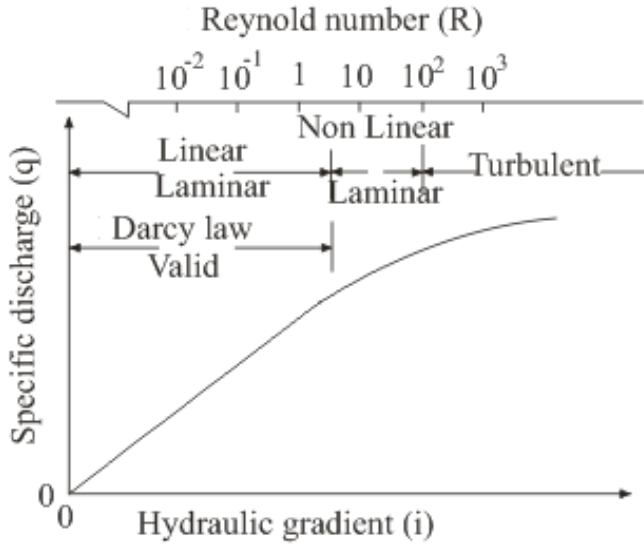
2- السريان المضطرب:- Turbulent flow

عند ضخ البئر بكمية تصريف مناسبة يظل التدفق الصفائحي هو السائد ولكن في لحظة ما ربما قد يحدث الانتقال من التدفق الصفائحي إلى التدفق المضطرب وذلك عندما يتقدم التدفق تدريجياً نحو البئر، وفي هذه الحالة قد يحدث تداخل بين التدفق المضطرب والخطي بسبب زيادة معدلات الضخ. ميكانيكية هذا الانتقال توضحها أرقام رينولد التي تتراوح ما بين 2.3 إلى 4.0. وبالتفصيل يتوقع أن يكون التدفق صفائحي عندما يكون رقم رينولد أقل من 2.3، ولكن عندما يفوق رقم رينولد 4.0 عندها يكون التدفق مضطرب، وذلك عند ضخ الآبار بمعدل تصريف عالي لتصبح حركة الماء الجوفي مضطربة وعشوائية وتكون سرعة الجريان عالية وبالتالي تصبح العلاقة غير خطية ما بين الانخفاض في مستوى الماء ومعدل التصريف حيث تسير جزيئات الماء في خطوط متعرجة وفي اتجاهات متداخلة وبسرعة عالية شكل (1.1.B). وبالتفصيل يكون جهد التدفق المضطرب على أشدة في حالة وصول المياه الجوفية إلى السطح الخارجي للمصفاة وداخل البئر، وعليه يعتبر التدفق المضطرب مكون أساسى لفواقد البئر وهو يؤدي إلى المزيد من الانخفاض في المنسوب، ولتفادي حركة المياه المضطربة أو العشوائية خلال الغلاف الحصوي يفضل أن يكون رقم رينولد أقل من 4.0 ومن ثم تعديل تصميم البئر. ويحدث هذا السريان في بيئات مسامية كبيرة التحبب وفي الشقوق وفجوات الازابة. وفي هذا النوع من السريان لا يمكن تطبيق قانون دارسي لأن قيمة رقم رينولد تكون فيه أكبر من 4.0 شكل (1.2)،

وعموماً يمكن تحديد نوع السريان (خطياً أو عشوائياً) عند تطبيق عدد رينولد الذي يمثل النسبة بين اللزوجة والقوة الحركية للسائل.



شكل (1.1):- يوضح الأنواع المختلفة لسريان المياه الجوفية عبر أبعاد الأنبوب (d); (A) سريان خطي (B) سريان مضطرب.



شكل (1.2):- يوضح مدى صلاحية قانون دارسي لقيم عدد رينولد (المصدر: (Freeze and Cherry, 1979).

لدراسة هيدروليكا آبار المياه الجوفية هنالك عدد من الأسئلة تطرح نفسها على القارئ لذا يجب الاجابة عليها، ومن أهم هذه الأسئلة ما يلي:-

- هل يوفر البئر الانتاجية المطلوبة؟
- هل انتاجية البئر تماثل السعة النوعية والتخزينية للخزان الجوفي؟
- هل يختلف الهبوط في منسوب الماء مع معدل الضخ؟
- هل الانخفاض في المنسوب يماثل الإنتاجية المثلى؟
- هل يتم ضخ الماء من البئر بكفاءة أم أن هناك خسائر كبيرة في البئر تؤدي في النهاية إلى تكاليف مفرطة للضخ؟
- هل تتدهور الانتاجية بمرور الوقت بسبب بعض الأخطاء الفنية التي صاحبت تصميم البئر، أو بسبب انسداد أو ترسب قشرة من المواد الكيميائية في فتحات مصافي الآبار أو الغلاف الحصى أو التكوينة الجيولوجية؟

1.2 سرعة دخول المياه مصفاة البئر:- Screen entrance velocity

من بين العديد من المعاملات الهامة التي تأخذ في الاعتبار عند تصميم وتشغيل آبار المياه من أجل الإدارة السليمة للآبار هي سرعة دخول المياه مصافي البئر. ومن المسلم به أن سرعة الدخول هي جزء لا يتجزأ من تصميم البئر. وتشير الدراسات النموذجية وبوضوح إلى أن نطاق سرعة الدخول المقبولة نسبياً هو في الواقع 0.031 متر/ ثانية أو 0.1 قدم/ ثانية. فمثلاً إذا كانت سرعة دخول الماء إلى المصفاة منخفضة وأقل من الموصى به، وعلى هذا النحو قد لا تكون المساحة المفتوحة الكاملة للفتحات متاحة لتدفق المياه بحرية مما يؤدي بدوره إلى خسائر زائدة في الآبار. وفي المقابل تؤدي سرعة الدخول العالية نحو البئر إلى حدوث انسداد ميكانيكي، ومن التجارب العملية لاختبارات جودة المياه وجد أن احتمال الانسداد الكيميائي والبكتريولوجي

منخفض للغاية. تُعرَّف سرعة الدخول v_n بأنها معدل تدفق الضخ Q بالمتر المكعب/ساعة مقسوماً على منطقة عمل المصفاة A_r بالمتر المربع على النحو التالي:-

$$v_n = \frac{Q}{A_r} \dots \dots \dots (1.1)$$

تعتمد سرعة الدخول على عوامل مختلفة منها تصميم تصريف البئر ومصفاة البئر (حجم الفتحة، القطر والطول) وما إلى ذلك. ويجب أن تكون سرعة دخول المصفاة منخفضة بدرجة كافية لتقليل حركة جزيئات التكوين الدقيقة إلى البئر والانسداد اللاحق لفتحات المصفاة. في هذا الشأن أوضح العالم جونسون Johnson 1966 أن سرعة دخول المصفاة التي تقل عن 0.031 م/ثانية تتمتع بالمزايا التالية:-

- 1- ستكون خسائر الاحتكاك في فتحة المصفاة ضئيلة.
- 2- معدل التقشير سيكون عند الحد الأدنى.
- 3- معدل التآكل سيكون عند الحد الأدنى.

Screen Diameter

1.3 قطر المصفاة:-

بعد اختيار طول المصفاة وحجم فتحة المصفاة المناسب عندها يمكن اختيار قطر المصفاة، ويفضل أن يكون القطر متباين المقاس للبئر الواحدة مع مراعاة سرعة دخول المياه مصفاة البئر. أوضحت العديد من الدراسات أن القطر الأكبر يقلل من سرعة دخول المياه للمصفاة مما يقلل من إمكانية الانسداد الميكانيكي ويضمن عمراً طويلاً للبئر، ولكن القطر الأكبر يحتاج إلى تكلفة اقتصادية أعلى، لذلك عند اختيار مصفاة البئر المثلى يجب الأخذ في الاعتبار العوامل الفنية المختلفة، العوامل الاقتصادية وتوفر المواد.

1.4 تصميم البئر الجوفي:-

Well design

يؤدي التصميم الجيد لأبار المياه الجوفية إلى تطابق مناسب سطح الماء الساكن في كل من التكوينة الجيولوجية والبئر الجوفي وذلك عندما تخترق البئر الخزان الجوفي اختراقاً كاملاً بالمصافي وفيها يتم اختيار فتحة المصفاة Slot size الموصى بها من عمل التحليل الميكانيكي لعينات الخزان الجوفي بالإضافة إلى حساب حجم وكمية الغلاف الظلطي. أما في حالة التصميم غير السليم يكون هنالك اختلاف في مستوى سطح الماء الساكن حيث يكون أقرب إلى سطح الأرض بالتكوينة الجيولوجية ويزداد بعداً بالبئر الجوفي خاصة في الخزانات غير المحصورة وهذا الفرق يسمى بفقد البئر Well loss شكل (2.2).

يهتم المصمم بتحديد مقدار الانخفاض في المنسوب المطلوب لإنتاجية معينة من خلال الطبيعة الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية التي من خلالها يتم تصميم البئر وتطويرها بعناية فائقة، ولا يمكن تجنب الانخفاض بسبب فواقد الاحتكاك في طبقة المياه الجوفية وتدفق المياه إلى البئر، ولكن من الممكن تجنب الفواقد الرأسية Head losses أثناء مرور المياه عبر المنطقة المضطربة حول البئر. وتعزى هذه الفواقد الرأسية إلى وجود سائل الحفر المتبقي Bentonite في التكوينة أو تلف التكوينة الناجمة عن الحفر الجوفي أو وجود حزمة من الغلاف الحصى سيئ الفرز والتصميم أو نتيجة لاستخدام مصفاة بئر بمساحات مفتوحة محدودة وغيرها من العوامل.

التصميم الجيد وأساليب الحفر المستنيرة تضمن تقليل الفواقد الرأسية إلى الحد الأدنى عبر المنطقة القريبة من فتحة البئر. وتعتبر مصافي الآبار ذات الحد الأقصى من مناطق دخول المياه للمصفاة هي الأنسب لضمان تقليل الفواقد الرأسية، ومما يعزز دور المصفاة في تقليل الفواقد الرأسية إذا كانت تحيط بها حزمة مناسبة من الغلاف الحصى والتي تحيط بها تكوينة تم تطويرها بشكل صحيح عن طريق إزالة سوائل

الحفر والمواد الدقيقة الناعمة، غير أن التصميم غير الجيد لأبار المياه تتبعه عدد من المشاكل التي تعزز من زيادة الهبوط في البئر وتقلل من كفاءة وصلاحية البئر، ومن أهم هذه الأسباب ما يلي:-

1- الأسباب التي تعزى إلى تصميم البئر.

2- الأسباب التي تعزى إلى إنشاء البئر.

أولاً: الأسباب التي تعزى إلى تصميم البئر:-

من الأسباب والعوامل التي تعزز من زيادة الفواقد الرأسية عند تصميم البئر وتطويره ما يلي:-

- اختيار مصافي البئر مع مساحة مفتوحة غير كافية تؤدي إلى زيادة سرعة دخول المياه فتحات مصفاة البئر (أكبر من الموصى بها 0.031 m/sec) مما يؤدي إلى حدوث فواقد رأسية كبيرة (زيادة فقد البئر) وهو خلاف دخول المياه في المصافي بصورة عادية.

- يؤدي التوزيع الضعيف لفتحات المصافي إلى تقارب مفرط في التدفق بالقرب من الفتحات الفردية ونتيجة لذلك قد يتضاعف الانخفاض في المنسوب بسبب تراحم المياه في فتحات المصفاة.

- عدم كفاية طول مصفاة البئر، مما يؤدي إلى اختراق جزئي لطبقة المياه الجوفية، يشوه نمط التدفق بسبب بعد المسافة حول البئر.

- تقيد حزم المصافي من تدفق المياه نحو مصفاة البئر إذا كانت ذات حجم غير مناسب أو تلك المصنوعة من زوايا وألواح غير مطابقة للمواصفات العالمية.

- تقيد حزم الغلاف الحصوي من التدفق نحو مصفاة البئر إذا كانت ذات حجم غير مناسب أو إذا كانت مصنوعة من مواد ذائبة مثل كربونات الكالسيوم.

- سوء توزيع حزم الغلاف الحصوي من حيث الحجم والشكل هذا بالإضافة إلى سوء توزيع حبيبات التكوينة الجيولوجية الذي يؤثر على الموصلية الهيدروليكية.

لتفادي تلك السلبات التي تزيد من الفواقد الرأسية نوجز عدد من التوصيات الهامة التي يجب إتباعها عند تصميم آبار المياه وذلك من أجل التمية المستدامة والإدارة السليمة لموارد المياه الجوفية وهي كما يلي:-

1- يجب أن توضع مصافي الآبار في الجهة المقابلة للطبقات الجيولوجية المنتجة للماء.

2- يجب أن تكون حزم الحصى متدرجة بشكل أفضل، ويصاحب ذلك تجنب مواد العبوات packing الزاوية لمنع انسداد مادة التكوينة الجيولوجية.

3- زيادة مساحة المصفاة المفتوحة إلى الحد الأقصى يعمل على تقليل سرعة دخول الماء إلى البئر بالإضافة إلى تقليل نسبة فقد البئر.

4- يجب أن تكون مواد المصفاة مقاومة للتآكل. وهنا لابد من الإشارة إلى العلاقة بين نوعية المياه وماده صناعة المصفاة، ففي حالة المياه المالحة يفضل استخدام مواسير بلاستيكية PVC، وفي حالة المياه العذبة تستخدم مواسير الحديد من النوع American Petroleum Institute API.

5- المسافة من مدخل المضخة إلى نقطة دخول الماء إلى البئر (موضع المصفاة) لها تأثير على خسائر البئر. ومن أجل تقليل تلك الخسائر قد يتعين خفض المضخة إلى أقرب عمق من المصفاة، مع مراعاة اقتصاديات المصعد مقابل الحد الأقصى لفقدان البئر المسموح به.

ثانياً: الأسباب التي تعزى إلى إنشاء البئر:-

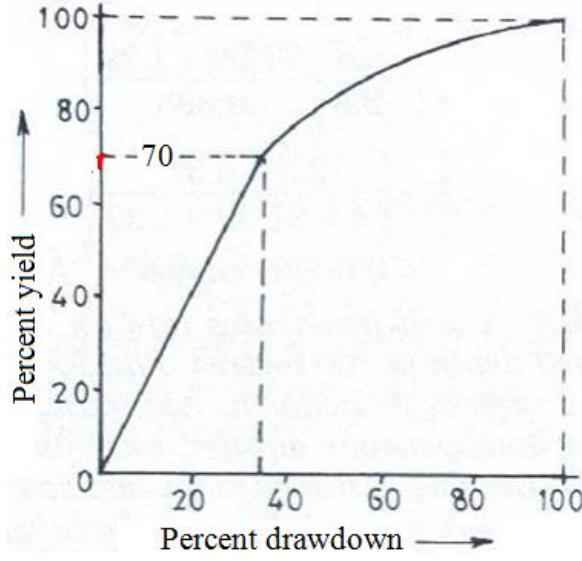
- عدم وضع المصافي في العمق المناسب والمقابل لأفضل طبقة منتجة للمياه يساعد على حدوث اضطرابات أثناء سريان الماء نحو البئر.

- عدم تطوير البئر بطريقة كافية يساعد على بقاء أجزاء من طين الحفر حول جدار البئر مما يقلل من النفاذية Permeability بالقرب من الجزء المثقّب من البئر.

1.4.1 أفضل ظروف تصميم البئر:- Best well design conditions

تتمثل في الحالة التي يتناسب فيها تصريف البئر مع عمليات الهبوط التي تنعدم فيها فواقد البئر. ويسمى التصريف لكل وحدة هبوط بالقدرة المحددة للبئر، هذه القدرة المحددة تختلف باختلاف تصاميم الآبار. ولتحديد أفضل ظروف تصريف السحب لبئر ما، لابد من تشغيل البئر في ظل ظروف هبوط متفاوتة، ومنها يمكن إعداد رسم بياني بين التصريف والهبوط يدعى بمنحنى انخفاض العائد (الإنتاج) كما هو موضح في الشكل (1.3). فالمنحنى الذي تم الحصول عليه هو خط مستقيم يصل إلى مرحلة معينة من الهبوط، والذي بعده يزداد الهبوط في المنسوب بشكل غير متناسب مع العائد. ويضع هذا الشكل حداً مثالياً وفعالاً للهبوط، والذي يمكن السماح بإنشائه في البئر. عادة ما يكون هذا الحد أو السحب هو 70% من الحد الأقصى للهبوط الذي يمكن إنشاؤه في البئر. ومن الرسم البياني لمنحنى انخفاض العائد بالشكل أدناه ندرس الآتي:-

- امكانية استخدام منحنى انخفاض الإنتاجية لتحديد أفضل حالات تصريف للبئر.
- تطوير هذا المنحنى عن طريق سلسلة من تصريف البئر يتبعها تغير في قيم الهبوط.
- بشكل عام وجد أن الحد الأمثل والفعال لإنتاجية البئر هو 70% من نسبة الحد الأقصى للهبوط في المنسوب.



شكل (1.3):- منحنى نسبة الهبوط في المنسوب مقابل نسبة الإنتاجية (المصدر: Mogheir, 2010).

Well development

1.5 تطوير البئر:-

يتم تطوير وتنظيف آبار المياه بشكل صحيح عند استخدام ضاغط الهواء أو الجردل Bailer بما في ذلك اختبار البئر وذلك بغرض إزالة قالب كعكة الطين والمواد الدقيقة من التكوينات حول غلاف البئر مباشرة أو بالقرب من الآبار وبالتالي يمكن حماية الجزء المثقب للآبار من الانسداد شكل (1.4). ويستفاد من تقنية تطوير البئر في زيادة الإنتاجية أو العائد المحتمل الكلي للبئر وزيادة السعة المحددة وكفاءة البئر.

تتمثل أهمية تطوير البئر في الغرض الذي من أجله تم إنشاء وبناء البئر، ومن ناحية اقتصادية يمكن التخلي عن البئر إذا كانت ذات كفاءة قليلة جداً أو سيحدد ما إذا كان يجب تقليل تصريف البئر لإطالة العمر المتوقع للبئر، غير أن الآبار عالية الكفاءة أقل تكلفة للتشغيل لأنها تتطلب طاقة أقل لتشغيل المضخة.



شكل (1.4):- تم التقاط الصورة بواسطة جوان Jwan بتاريخ (2016/9/7) ، وذلك خلال عملية تطوير البئر - 14 بواسطة الضاغط الهوائي Compressor.

1.6 عامل تنمية البئر:- Well development factor

تعد شيخوخة أو تسريع تقادم مصفاة البئر عملية طبيعية تحدث أثناء استغلال البئر، وهذه الظاهرة تحدث بسبب انسداد فتحات المصفاة، ونتيجة لذلك تزداد خسائر المدخل Well losses مع زيادة تكاليف ضخ المياه. ولتفادي سلبيات هذه الظاهرة يتم تطوير آبار الضخ لفترة طويلة تستمر حتى يتم إنتاج مياه خالية من الرمال.

يُقصد بمصطلح التطوير إزالة السلت (الطمي) والرمل الناعم حول مصفاة بئر الضخ وذلك بغرض إنتاج مرشح طبيعي من الرمل الخشن أو الحصى بحيث يكون أكثر اتساقاً، والذي بدوره يوفر أكبر قدر ممكن من المساحة المفتوحة Open area لتدفق المياه نحو البئر. وعملياً توفر أكبر مساحة ممكنة من هذه الفتحات أقل سرعة لدخول المياه فتحات المصفاة فضلاً عن تقليل المقاومة أو الاحتكاك الذي يحسن ويزيد من كفاءة البئر. لسوء الحظ أحياناً قد يتم إيقاف ميزة أو مزايا هذا التطوير جزئياً بسبب التصميم السيئ أو الاختيار غير المناسب لحزمة الغلاف الحصى أو المصفاة، فإذا كان حجم فتحة المصفاة كبير Oversized أكبر من الموصى به 0.031 m/sec فإنه

وبالتأكيد تعمل المصافي على إدخال مكونات الخزان الناعمة إلى داخل البئر، وفي هذه الحالة يصبح من الصعوبة بمكان نظافة مياه البئر من تلك الرمال، والعكس إذا كان حجم فتحة المصفاة أصغر من الحجم الموصى به Undersized فهذا يجعل من وجود مقاومة وصعوبة في دخول وسريان المياه الجوفية نحو البئر ونتيجة لذلك يكون هنالك مزيد من الانخفاض في مستوي سطح الماء وهو ما يسمى بالفواقد الرأسية بالإضافة إلى حدوث تآكل Corrosion لمصافي الآبار نتيجة لتلك المقاومة.

من خلال نتائج اختبار السحب التدريجي Step drawdown pumping test يمكن تقييم فعالية التطوير بشكل عام، وعليه فإن انخفاض كفاءة بعض الآبار تعزى إلى عدة أسباب منها الآتي:-

- عدم كفاية طول المصفاة، وهو ما يعرف بالاختراق الجزئي لطبقة الحاملة للمياه الجوفية.

- فتحات المصفاة كبيرة أو صغيرة جداً خلاف الفتحات القياسية الموصى بها بناءً على التحليل الحجمي الحبيبي.

- عدم مطابقة الغلاف الحصوي للمواصفات العلمية.

- التنمية غير الكافية.

مع العلم أن اختبارات السحب المتدرج هي إجراء ما بعد الواقع، وأن كل نتيجة ينتج عنها هذا الاختبار تعتبر بيانات قابلة للتطبيق فقط على البئر المحدد أو الآبار التي سوف يتم حفرها في المستقبل في تلك التكوينات الجيولوجية، إلا أن هذا الافتراض تم دحضه في هذا الكتاب من خلال ابتكار عدة طرق جديدة يمكن من خلالها التحكم في رفع وتطوير كفاءة البئر.

Optimum discharge

1.7 التصريف الآمن:-

يلزم تحديد التصريف الآمن للبئر اختباراً يقضي بالوصول إلى مرحلة التوازن بين أقصى كمية للمياه التي يتم ضخها من البئر وتلك التي يعاد تغذيتها وشحنها إلى داخل البئر، ويعرف التصريف الآمن بأنه هو كمية المياه التي يمكن ضخها من البئر دون حدوث اضرار بالبئر أو الطبقة الحاملة للمياه الجوفية. ويلزم أن يكون أقصى تصريف مسموح بضخه من البئر أقل من أقصى تصريف تصميمي وذلك لضمان عدم انسداد المصافي والغلاف الحصى وهو دالة على سرعة سريان المياه عند تقاربها من البئر وبذلك يكون سريان المياه نحو البئر أفقياً، وفي خطوط مستقيمة ومتوازية وغير متداخلة مع بعضها البعض وفي هذه الحالة تكون أرقام رينولد أقل من 2.3.

Optimum drawdown

1.8 الانخفاض الآمن:-

يمثل الانخفاض الأقصى الذي يمكن الوصول إليه للحصول على تدفق دون حدوث تداخل بين مياه الآبار في الحقل الواحد Well interference، ويعتمد الانخفاض الآمن على الظروف الهيدروليكية للطبقة الحاملة للمياه بالإضافة إلى طريقة الحفر الجوفي وتصميم وتنمية البئر.

Over pumping

1.9 تأثير الضخ الزائد:-

يُعرّف الضخ الزائد بأنه هو الإفراط Excessive في ضخ المياه من طبقة المياه الجوفية بصورة زائدة تفوق كمية التغذية المتدفقة في الحوض. ويؤدي استخراج كميات كبيرة من المياه الجوفية على المدى الطويل الذي يتجاوز تغذية طبقة المياه الجوفية إلى حدوث مشاكل وخلل هيدرولوجي في منظومة الخزان الجوفي، وعليه إذا استمر الإفراط في السحب بغرض سد الطلب ودون مراقبة وإدارة كافية فإنه سيؤدي إلى استنزاف المياه الجوفية التي يمكن أن تضر البيئة بشكل لا رجعة فيه، وعليه فإن واحد من أهم عواقب الضخ المفرط أنه يترك أثراً بيئياً سلبياً يتمثل في الآتي:-

- انخفاض منسوب المياه الجوفية الذي يدمر منظومة الخزان الجوفي بسبب هبوط منسوب المياه على المكامن الجوفية.
- هبوط منسوب الماء داخل البئر (فواقد البئر) بعمق أكبر من الهبوط داخل المكمن مما يقلل من كفاءة البئر.
- استمرار تناقص وتدهور جودة نوعية المياه الجوفية يتمثل في زيادة ملوحة المياه الجوفية.
- جفاف بعض آبار المياه الجوفية.
- حدوث ظاهرة تداخل مناسيب أو مخاريط آبار المياه الجوفية مع بعضها البعض مما يزيد من تكلفة الضخ.
- حدوث ظاهرة غور وهبوط أو تشقق Shrinkage طبقات الأرض خاصة في الخزانات المحصورة Confined aquifer.

1.10 إدارة موارد المياه الجوفية:- Groundwater resources management

أن تزايد الطلب على الموارد المائية أفضى إلى تراجعها، ويعزى ذلك إما إلى ندرة هذه الموارد أو سوء تدبيرها، وعليه فإن التنمية المستدامة والشاملة للموارد المائية وإدارتها أصبحت من الأمور البالغة الأهمية، وذلك لتجنب أزمات مستقبلية تنجم عن نقص الماء كماً وكيفاً.

تعنى الإدارة المستدامة للمياه الجوفية بالاستغلال الأمثل للمورد المائي والمحافظة عليه من الاستنزاف والهدر والتصدي لانخفاض مستويات المياه الجوفية وتداخل مخاريط المياه في الحوض الجوفي. وتعرف الإدارة المستدامة بأنها هي أقصى تنمية للموارد المائية الجوفية لتحقيق أكبر مردود بأقل تكلفة، ودون حدوث أضرار جانبية سيئة لتلك الموارد. وعادة تؤخذ الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية

والهيدرولوجية بعين الاعتبار وذلك من حيث تقدير التفاعل بين استعمال المياه الجوفية والنظام الهيدرولوجي الإقليمي.

تكون الإدارة المتكاملة للموارد المائية بالإستفادة من كل الموارد المائية المتوفرة، مع اتخاذ كل الخطوات للمحافظة عليها. في السنوات الأخيرة تتجه الكثير من دول العالم إلى الإدارة المتكاملة للموارد المائية لمواجهة الطلب المتزايد للمياه وذلك بغرض تلافي حصول شح في المياه. الآن نحن معنيون أكثر بطرق تقييم وإدارة موارد المياه، وهناك عدد من الأسئلة ينبغي الاجابة عليها في هذه المرحلة.

1- كم معدل التصريف الذي يمكن سحبه؟

2- ماذا سيكون تأثير الضخ على وضع النظام الهيدرولوجي ومستويات الماء في المنطقة؟

3- ما هي إمكانات التكوينات المائية على المدى الطويل؟

4- هل ستكون هناك نتائج جانبية مترتبة على استخدام واستخراج المياه الجوفية بكثرة والذي يؤدي إلى ما يسمى بهبوط الأرض Subsidence ودخول المياه المالحة مما يحد من كمية السحب؟

الفصل الثاني

كفاءة آبار المياه الجوفية

Groundwater Wells Efficiency

The effect of pumping on

2.1 تأثير الضخ على مستويات المياه:-

water levels

يؤدي ضخ آبار الماء الجوفية إلى انخفاض مستويات سطح الماء داخل البئر والتكوينة الجيولوجية مكوناً ما يعرف بمخروط الانخفاض، وهو ناتج عن فقد المتكون للمياه التي تم ضخها عبر البئر والذي يجب أن يتطابق بالطبقة الحاملة للمياه وداخل البئر وذلك عندما يكون تصميم البئر جيداً، ولكن في أغلب الاحيان لا يحدث هذا التطابق وبالتالي تكون هنالك فواقد في البئر وأخرى بالتكوينة الجيولوجية. ومن هذه الفواقد يتم حساب فعالية البئر، فإذا كانت قيمة الفعالية منخفضة أقل من 70% فإن البئر تحتاج إلى تنمية واعاده النظر في التصميم لمعرفة الأخطاء الهندسية التي ربما قد تكون حدثت أثناء عملية التصميم أو الحفر الجوفي وفي المقابل إذا كانت قيمة الفعالية عالية فهو دليل على صحة ودقة تصميم وتطوير البئر بوضع المصافي على كامل سماكة الخزان الجوفي، مع اختيار الفتحات المناسبة للمصفاة وتحديد حجم وكمية الغلاف الحصى فضلاً عن ترتيب حبيبات التكوينة الجيولوجية من خلال عملية تنمية البئر.

Well efficiency adjustment

2.2 ضبط كفاءة الآبار:-

يجب أن يولي ضبط وتحديد كفاءة الآبار أهمية قصوى عند تطوير البئر في أي حقل من حقول آبار المياه الجوفية. فإذا كانت انتاجية البئر أقل من المتوقع فيما يتعلق بالقيم النظرية فإن كفاءة البئر المنتجة تكون أقل من 100%، وأوضحت العديد من الدراسات أن كفاءة البئر إذا كانت أقل من 65% فهذا يعني الإفراط في التصريف على الآبار. وعموماً يعتمد ضبط كفاءة البئر على الوقت الذي يبدأ فيه حدوث التدفق المضطرب والذي يزداد بمرور الوقت، وفي هذا الشأن اقترح لينوكس Lennox 1966 أن الوقت يجب أن يكون عاملاً عند الإبلاغ عن كفاءة البئر، وزيادة على ذلك اقترح لينوكس معيار قياس ساعة واحدة، غير أن معيار كوخ 24 ساعة. ووفقاً للعالم

Driscoll 1986، فإن الآبار التي تم تطويرها بشكل صحيح لا تتعدى كفاءتها 80 إلى 85%. لكن حالة كلارك Clark 1977 تنص على أن كفاءة البئر تكون منخفضة بالآبار العميقة أمر لا مفر منه، لأن فقد البئر في الآبار العميقة قد ينجم عن التدفق عبر الغلاف أثناء عملية التصريف. يتفق Kawecki 1995 مع Clark ويؤكد أن كفاءة البئر إما مضللة أو غير دقيقة أو لا معنى لها فيما يتعلق بأداء البئر المنتجة وأن فقدان البئر الكلي كدالة تصريف يوفر تقييماً أكثر جدوى، وقد يكون هذا صحيحاً عند التفكير في تنمية الآبار الفقيرة أو العاملة.

من التجارب الحقلية لا يمكن أن تزيد كفاءة البئر عن 100%، وفي ظل الظروف المثالية تكون الكفاءة حوالي 80% باعتبار أنه الحد الأقصى الذي يمكن أن تحقيقه عادةً معظم الآبار التي يتم فحصها. وأكد Helweg et al. 1983 وآخرون أنه في ظل الظروف الطبيعية قد تكون الكفاءة بنسبة 60% وهي أكثر واقعية Realistic، ولكن إذا كانت كفاءة الآبار أقل من 45% فهي تعتبر ليست ذات كفاءة هيدروليكية.

2.3 القدرة النوعية:- Specific capacity

يعبر عن السعة أو القدرة النوعية رياضياً على أنها مقلوب الانخفاض النوعي Specific drawdown (s_w/Q) وهي مؤشر يدل على إنتاجية البئر أو كمية المياه المتوفرة لكل انخفاض في المنسوب، وتصف السعة المحددة للبئر إنتاجية كل من طبقة المياه الجوفية والبئر، ويمكن الحصول عليها بتقسيم معدل الضخ التشغيلي Q في أي وقت أثناء الضخ على عمق السحب الأقصى أو الثابت معادلة (2.1)، وهنا تكمن أهمية السعة النوعية في تحديد مدى إمكانية تداخل مخاريط انخفاض الآبار الموجودة في نفس المنطقة. ويُشار إلى السعة النوعية بالرمز S_c ، ووحدة قياسها جالون لكل دقيقة. قدم أو (L^3/T per L drawdown) أو ($L^2.T^{-1}$) لكل وحدة سحب

وهي نفس وحدة قياس الانتقالية ($L^2.T^{-1}$)، وهو دليل يوضح إمكانية الاستعانة بالسعة النوعية لتقدير قيمة الانتقالية أو نفاذية الخزان الجوفي.

$$Sp. capacity = \frac{\text{discharge of the well}}{\text{drawdown}} = \frac{Q}{s_w} \dots \dots \dots (2.1)$$

أثبتت الدراسات الهيدرولوجية أن السعة المحددة للبئر ليست ثابتة ولكنها تتناقص بزيادة تصريف البئر وطول فترة إستمرارية الضخ بسبب زيادة خسائر الخزان الجوفي مع الوقت وخسارة الضخ غير الخطية، وبالتالي فإن أي نقصان في السعة النوعية يدل على حدوث ترسبات في البئر، وفي هذه الحالة يحتاج جيولوجي الحقل للقيام بأعمال صيانة وتنمية للبئر وفي حالات أخرى يحتاج إلى اعادة اصلاح لتأهيل البئر. ولكن في بعض الحالات قد تزداد قيمة السعة النوعية في البداية ثم تنخفض بعد ذلك، فالزيادة الأولية ربما تشير إلى أن البئر كان مستمراً في التطور، بينما يعزى الانخفاض إلى أن التطور الأصلي عند بداية الحفر وتجهيز البئر لم يكن كافياً، وأيضاً يعزى إنخفاض السعة المحددة في معدلات التصريف المتزايدة إلى زيادة فقدان البئر وذلك بسبب زيادة الإضطرابات أثناء ضخ البئر، وتظهر العلاقة بين السعة المحددة وأنواع إنتاجية الآبار في الجدول أدناه.

جدول (2.1):- قيم القدرة النوعية وتصنيف إنتاجية الآبار (المصدر: Sen, 1995).

إنتاجية البئر	القدرة النوعية ($m^3 hr^{-1}m^{-1}$)
عالية	$C > 18$
متوسطة	$18 > C > 1.8$
منخفضة	$1.8 > C > 0.18$
منخفضة جداً	$0.18 > C > 0.018$
لا تذكر	$0.018 > C$

يعتبر الهبوط النوعي مؤشراً مفيداً لاختيار سعة البئر لطبقة المياه الجوفية، وللحصول على أداء سهل ومعقول يجب أن يكون للبئر سعة محددة تتراوح بين 6.2 إلى 18.5 لتر/ ثانية/ متر، وهبوط محدد يتراوح ما بين 0.054 إلى 0.162 م/لتر/ ث أي من 5 – 15 ثانية/ قدم تربيع، (المؤسسة الدولية للتنمية IDA, 1988). ومن جانب آخر تعتمد القدرة النوعية والنفاذية على فقد البئر في بئر الضخ، والذي ينتج بدوره عن الآتي:-

1- التدفق المضطرب في المنطقة خارج البئر أي في حزمة الحصى.

2- التدفق المضطرب عبر مصفاة البئر (سرعة دخول الماء).

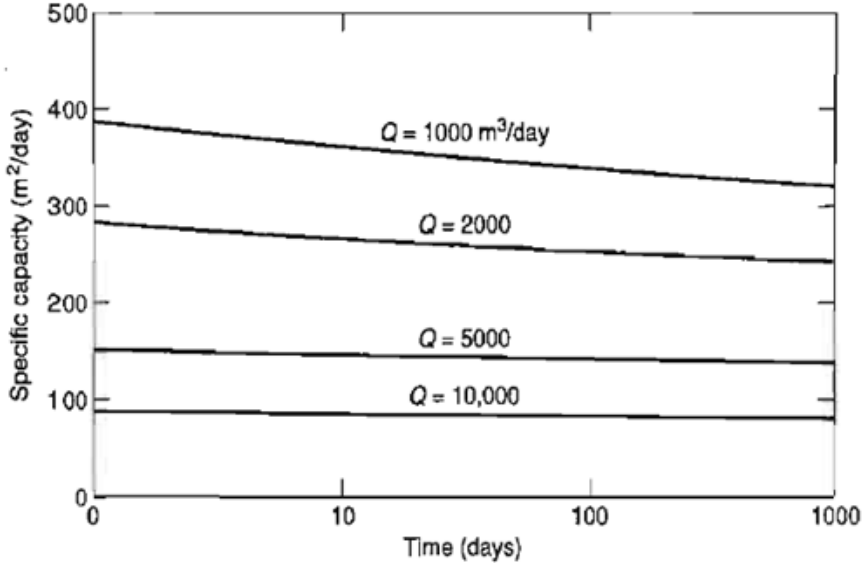
3- التدفق المضطرب داخل البئر إلى مدخل المضخة.

2.3.1 أسباب انخفاض القدرة النوعية:- Reasons for low specific capacity

في حالة حدوث تغيرات كبيرة في القدرة النوعية فإنها تعزى إلى تناقص معامل التوصيل المائي نتيجة لانخفاض مستوى سطح الماء داخل طبقة المياه غير المحصورة Unconfined aquifer أو إلى زيادة فاقد البئر نتيجة لتراكم الفتات الصخري حول المصافي وانسداده أو بمعنى آخر إلى نقص فعالية البئر. ذكرنا فيما سبق أن القدرة النوعية تتدهور مع استمرار الضخ، وتأكيداً لذلك يُشير الشكل (2.1) إلى أن السعة المحددة تتناقص بزيادة ضخ آبار المياه بمعدل تصريف عالي ولفترة زمنية طويلة وذلك نسبة لحدوث مكون السريان العشوائي، وعليه توضح بيانات البئر المرسومة في هذا الشكل إلى التأثير بالنسبة لتصريف معين غالباً ما يُفترض أن البئر لها سعة محددة ثابتة على الرغم من أن هذا الافتراض ليس صحيحاً تماماً، ويلاحظ أن التغيير بمرور الوقت يعد بسيطاً. ويُعزى الانخفاض الكبير في السعة المحددة للبئر إلى الآتي:-

- انخفاض النفاذية بسبب انخفاض مستوى المياه الجوفية في خزان جوفي غير محصور.

- زيادة خسائر الآبار المرتبطة بانسداد أنواع مختلفة مثال عبوة الحصى وفتحات المصفاة أو بسبب تدهور مصفاة البئر.



شكل (2.1):- يوضح التباين في القدرة النوعية عند ضخ البئر بمعدلات تصريف مختلفة (المصدر: (Jacob, 1947).

2.3.2 العوامل التي تؤثر علي القدرة النوعية:- Factor effective of specific capacity

هنالك عدة عوامل تؤثر في قيمة السعة النوعية ومن هذه العوامل الاتي:-

- 1- فواقد البئر.
- 2- كون البئر الجوفي غير مكتملة.
- 3- الحدود الهيدروجيولوجية.

2.4 فعالية البئر الجوفي:-

Well efficiency

عادةً ما تساعدنا اختبارات الهبوط التدريجي في تقييم أداء فواقد كل من طبقة المياه الجوفية والبئر، والتوجيه في اتخاذ قرار بشأن تحديد معدل الضخ الأمثل في وقت لاحق من اختبار الضخ بمعدل ثابت، وفي هذا الشأن تستخدم جميع الرسومات البيانية الناتجة من بيانات الهبوط التدريجي بغرض حساب كفاءة البئر الناتجة من فقدان طبقة المياه الجوفية وتصحيح فقد البئر. ولهذا الغرض يتم تحديد الانتاج الآمن لبئر الضخ اعتماداً على كفاءة البئر، وسوف يتم شرح هذا الموضوع بالتفصيل في الفصل التاسع. تشير الكفاءة العالية إلى أن إنتاجية البئر أكثر أماناً، ولكن أحياناً يكون البئر ذو كفاءة رديئة نتيجة لارتفاع تكلفة المضخة بسبب الهبوط المفرط في منسوب الماء.

تعرف فعالية البئر بأنها النسبة المئوية للفواقد الرأسية بطبقة المياه الجوفية إلى الانخفاض التراجعي في مستوي سطح الماء داخل البئر أو إلى إجمالي الفواقد الرأسية التي تشمل كلاً من طبقات المياه الجوفية وفواقد البئر، وتقرأ عندما يتم التعبير عنها كنسبة مئوية معادلة (2.2 إلى 2.4)، ويمكن تفسير هذه المعادلة ببساطة على أنها السحب الفعلي - المقاس s_a Actual drawdown مقسوماً على السحب النظري - المحسوب s_T Theoretical drawdown وهو مجموع السحب الفعلي زائداً الهبوط الملحوظ داخل البئر والناجم عن خسارة البئر CQ^2 . ويرمز لفعالية البئر بالرمز E_w ، وهي تعبر عن مدى كفاءة وصلاحية البئر ومدى الفقد الحاصل بها.

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{BQ}{s_w} 100 \dots \dots \dots (2.2)$$

$$E_w = \frac{B_1 Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 \dots \dots \dots (2.3)$$

$$E_w = \frac{\text{Actual drawdown}}{\text{Theoretical drawdown}} \times 100 = \frac{s_a}{s_T} \times 100 \dots \dots (2.4)$$

حيث أن:-

$$B = \text{معامل فقدان الخزان الجوفي الخطي } (d \cdot m^{-2}).$$

$$BQ = \text{خسارة الخزان الجوفي } (L).$$

$$C = \text{معامل فقدان البئر غير الخطي أو معامل السرعة العالية } (d^2 \cdot m^{-5}).$$

$$CQ^2 = \text{فوائد الآبار } (L).$$

ندلل على كفاءة البئر الجوفي بالخزانات الجوفية المغلفة تغليف كامل من نسبة التغير ما بين الانخفاض في المنسوب الحقيقي والفعلي بالخزان الجوفي إلى الانخفاض في المنسوب النظري داخل البئر كما في الشكل (2.2) والمعادلة (2.4). في الوضع الميداني الفعلي نادراً ما يكون مستوى مياه الضخ داخل غلاف البئر (النظري) مساوياً لذلك الموجود خارج الغلاف (الفعلي) مباشرةً وذلك بسبب الفوائد الرأسية من خلال المصافي وحزم الحصى وما إلى ذلك، وعليه فإن السحب أو الهبوط الفعلي (المحسوب) يتم الحصول عليه بيانياً Graphically من السحب النظري (الملاحظ) والمقاس داخل البئر شكل (2.2). ومن أهم مكونات الهبوط في مناسيب المياه بالخزان الجوفي والبئر ما يلي:-

- الانحدار الكلي داخل البئر s_w .

- الانحدار عند سرعة منخفضة نسبياً في حالة التدفق الصفائحي s_1 .

- الانحدار بسرعة عالية نسبياً في حالة التدفق المضطرب s_2 .

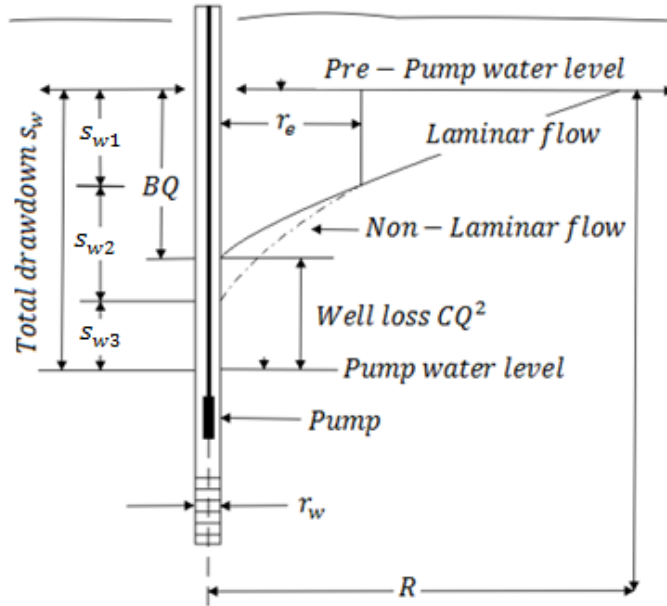
- خسائر المدخل s_3 وهي تعود إلى (تأثير المصفاة) والتدفق المضطرب من خلال المصفاة أو حزمة الحصى.

- نصف قطر التأثير R .

- نصف قطر البئر r_w .

- معدل الضخ Q .

- معامل التدفق الصفائحي B .
- معامل التدفق غير الصفائحي C .



شكل (2.2):- يوضح حدود الانخفاض الفعلي بمكونات التدفق الرقائقي بالتكوينة الجيولوجية ومكونات الهبوط النظري داخل البئر أثناء عملية الضخ. عملياً يتم حساب كفاءة البئر عن طريق قسمة السحب الفعلي على السحب النظري المقاس في البئر معادلة (2.4). ويتم تفصيل هذه المعاملات في الحقل الجيولوجي كما يلي:-

- فعلياً الانخفاض في المنسوب بالخران الجوفي وبالتحديد المحسوب مباشرة خارج مواسير البئر أو بالمنطقة المتاخمة لمصافي البئر s_a .

- نظرياً الانخفاض في منسوب المياه ببئر الضخ في ظل الظروف الحقلية الجيولوجية

s_T .

2.4.1 تصحيح فعالية البئر:- Correction of well efficiency

يستفاد من قيم كفاءة الآبار في تصحيح فاقد طبقة المياه الجوفية وحساب فواقد البئر، وعليه قبل أن يتم التعامل مع قيمة الهبوط الفعلي لأي تحليل يجب تصحيح الهبوط باستخدام تصحيح كفاءة البئر، ويتم ذلك عند إجراء تصحيح الهبوط الفعلي عن طريق طرح قيمة الهبوط الكلي s_w من بيانات الهبوط النظري (الملاحظ) ببئر الملاحظة. وعموماً، تخبرنا المعادلة (2.2) أنه عند زيادة معدلات الضخ تتناقص كفاءة البئر والتي فيها يكون فقد البئر كبيراً وكذلك عندما تأخذ عوامل فقد طبقة المياه الجوفية والبئر B و C قيم معنوية كبيرة، ويعزى ذلك إلى أن تصميم مصفاة البئر أو حزمة الحصى لم يتم بشكل صحيح، أو تم وضعها في مكان غير مناسب عندها تحدث مقاومة دخول عالية واضطراب مفرط عند دخول المياه المصفاة وبالتالي فإن قيم B و C يمكن أن تكون عالية وستكون كفاءة البئر منخفضة، وأيضاً يمكن العثور على قيم عالية خاصة بالنسبة إلى B (معامل فقد طبقة المياه الجوفية) في بئر لم يتم تطويرها بشكل صحيح بعد الحفر وأثناء الإنتاج وذلك عندما تصبح مصفاة البئر مسدودة بسبب كربونات الكالسيوم أو ترسيب الحديد. وفي المقابل عندما تكون قيم B و C صغيرة عندئذ يُقال إن الآبار تتسم بالكفاءة العالية.

2.4.2 تقييم عامل تطوير البئر:- Evaluation of Development factor

لتقييم عامل فعالية تطوير البئر DF Development factor تستخدم المعادلة الرياضية (2.5) التي تبين العلاقة ما بين معامل خسارة البئر إلى معامل خسارة التكوينية الجيولوجية، والرقم الناتج لكل بئر هو عرض يُشير إلى تصنيف تجريبي لقيم عامل تنمية تطوير البئر إلى عدة فئات يوضحها الجدول أدناه، وعليه ينبغي تصنيف فعالية تطوير البئر إلى عدة فئات: ممتازة، جيدة، عادلة وفقيرة.

جدول (2.2):- يُصنف فعالية تطوير البئر إلى عدة فئات (المصدر: Bierschenk (1963).

قيمة عامل تطوير البئر (d/m^3)	درجة التطور
< 0.1	فعالة للغاية Very effective
$0.1 - 0.5$	فعالة Effective
$0.5 - 1.0$	فعالة إلى حد ما Fairly effective
> 1.0	ضعيفة الفعالية Poorly effective

$$DF = \frac{C}{B} = \frac{CQ}{BQ} \dots \dots \dots (2.5)$$

اقترح العالم والتون Walton 1970 أن يتم تقييم درجة تدهور البئر Well deterioration اللاحق للاستخدام باستخدام قيم ثابت فقدان البئر C كمعيار ومقياس، ومن التجارب أوضح أن قيمة C للبئر المستقر والمطور بشكل صحيح تقل عموماً عن $5 \times 10^{-6} ftgpm^2$ أو ثانية/قدم⁵، بينما تُشير قيم C ما بين 1 إلى 10 ثانية/قدم⁵ إلى تدهور بسيط مع انسداد فتحات المصفاة بعد الضخ الثقيل Heavy pumping، وعندما تكون قيمة C أكبر من 10 ثانية/قدم⁵ يكون الانسداد شديداً Severe وعليه إذا تم إجراء اختبارات الضخ المتدرج على آبار الضخ بعد مضي فترة زمنية فيمكن تحديد ما إذا كان البئر قد تدهور أم لا، وما إذا كانت إعادة التأهيل مطلوبة. مثال (2.1):-

إذا كان من المفترض أن توفر بئر ضخ 47 جالون في الدقيقة لكل قدم من الهبوط النظري، ولكن في الواقع يتحصل منها على 40 جالون في الدقيقة لكل قدم من الهبوط الفعلي، المطلوب تحديد كفاءة البئر.

الحل:-

$$s_a = 40 \text{ gpm}/\text{ft} \quad s_T = 47 \text{ g}/\text{minpft}$$

$$E_w = \frac{s_a}{s_T} \times 100 = \frac{40}{47} \times 100 = 85.1\%$$

هذا أمر مهم لأن الانخفاض المقاس داخل البئر أكبر من الانخفاض في الخزان الجوفي بالقرب من حافة البئر وبالتحديد في المنطقة المجاورة لمصافي البئر. من أجل استخدام بيانات بئر الضخ يمكن تحديد معاملات طبقة المياه الجوفية بثقة كبيرة، وبالتالي يجب ضبط القدرة النوعية (Q/s_w) لضمان كفاءة البئر. ولتحديد القدرة النوعية عند كفاءة البئر بنسبة 100% يجب إعادة تعريف مصطلح كفاءة الآبار تقنياً $Q/s_{w100\%E_w}$ على أنها نسبة السعة الفعلية أو السعة الحقلية المحددة $(Q/s_w)_{field}$ إلى السعة النظرية المحددة كما هو واضح في المعادلة التالية:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{(Q/s_w)_{field}}{E_w} \right] \times 100 \dots \dots \dots (2.6)$$

حيث أن:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \text{السعة النوعية عندما تكون كفاءة البئر } 100\%.$$

$$(Q/s_w)_{field} = \text{السعة النوعية الفعلية المقاسة في الحقل الجيولوجي.}$$

في هذه الحالة يظل معدل الضخ ثابتاً، وما يجري تعديله بالفعل هو الانخفاض في المنسوب المقاس كما جاء في المعادلة التالية:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{Q}{s_w \times E_w} \right] \times 100 \dots \dots \dots (2.7)$$

يرشدنا هذا المثال أنه يمكن التحكم في ضبط كفاءة البئر من خلال التحكم في كمية التصريف والهبوط، ولتوضيح هذا المفهوم بشيء من التفصيل راجع الفصل التاسع.

مثال (2.2):-

في الحقل الجيولوجي تم قياس القدرة النوعية لبئر جوفي فكانت حوالي 40 gpm/ft، وكفاءة البئر المنتجة 85%. أحسب القدرة النوعية إذا فرضنا أن كفاءة البئر 100%.
الحل:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{(Q/s_w)_{field}}{E_w} \right] \times 100$$

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{(40 \text{ gpm/ft})_{field}}{85} \right] \times 100 = 47.1 \text{ gpm/ft}$$

مثال (2.3):-

أوجد قيمة السعة النوعية إذا كانت كفاءة البئر 100%، علماً بأن تصريف البئر 800 جالون لكل دقيقة والانخفاض في المنسوب 20 قدم وكفاءة البئر 0.85.
الحل:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{Q}{s_w \times E_w} \right] \times 100 = \left[\frac{800}{20 \times 85} \right] \times 100$$
$$= 47.1 \text{ gpm/ft}$$

2.5 العلاقة بين القدرة النوعية وكفاءة الآبار:- Relation between specific capacity and wells efficiency

ذكرنا فيما سبق أن القدرة النوعية ليست ثابتة إلا أنها تعتبر مقياس يعطي مؤشر جيد في معرفة إنتاجية البئر، لأن القدرة النوعية تعطي كمية المياه المنتجة من البئر لكل وحدة عمق من الانخفاض في المنسوب، فكلما كانت قيمة القدرة النوعية عالية كلما كانت البئر ذات إنتاجية أفضل بدءاً من معادلة عدم التوازن التقريبية بما في ذلك فقد البئر معادلة (2.8). ومن اختبار السحب التدريجي يكون الهبوط في البئر والسعة المحددة كما جاء في المعادلات الرياضية 2.9 إلى 2.11.

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{1}{(2.30/4\pi T) \log(2.25Tt/r_w^2 S) + CQ^{n-1}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$Sp. capacity = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{1}{B + CQ} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{1}{(B_1 + B_2) + CQ} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$E_w = \frac{Q/s_w}{Q/BQ} \times 100 = \frac{S_c}{Q/BQ} \times 100 \dots \dots \dots (2.11)$$

يمكن الاستفادة من قيمة القدرة النوعية في إيجاد كفاءة البئر الجوفي، فكل من السعة المحددة وكفاءة البئر مهمان لقياس أداء البئر. فالسعة المحددة (التصريف/ الهبوط) تمثل إنتاجية الخزان الجوفي، وتعني أكبر سعة نوعية أن البئر جيد وفي أفضل حالة، وفي المقابل تمثل كفاءة البئر (خسارة الخزان الجوفي/ الخسارة الكلية) إنتاجية البئر فقط، ويتطلب تقييمهما التمييز بين الهبوط الكلي للخزان الجوفي وفقدان الآبار.

لفهم العلاقة التي تربط بين القدرة النوعية وكفاءة الآبار نجد أن الكفاءة المنخفضة التي تصل إلى 70 في المائة إلى عدم كفاية وضعف نمو وتطوير البئر. وبناءً على كفاءة الآبار تختلف السعة المحددة مع اختلاف تصميم البئر، هذه العلاقة توضح أن زيادة الكفاءة والسعة المحددة للبئر تتم عن طريق زيادة نصف قطر البئر وزيادة نسبة اختراق إجمالي السمك المشبع للخزان الجوفي. كقاعدة عامة، وجد أن السعة المحددة لا تزداد بشكل كبير عن طريق زيادة نصف قطر البئر لأن تصريف البئر يختلف حسب نصف قطر البئر. وعليه يمكن توقع زيادة بنسبة 5 بالمائة تقريباً عن طريق زيادة نصف القطر الفعال من 12 إلى 18 بوصة، وإلى 10 بالمائة فقط من خلال الانتقال إلى نصف قطر يبلغ 30 بوصة، وفي نفس السياق أظهرت الدراسة التي قام بها Rorabaugh 1953 أن نصف القطر يصبح أكثر أهمية مع زيادة التصريف.

2.6 العلاقة بين القدرة النوعية والانتقالية:- Relation between specific capacity and transmissivity

لابد من معرفة العلاقة بين هذه المعاملات الهيدروليكية وذلك بغرض الإدارة السليمة للبئر والخزان الجوفي، فالسعة المحددة مفيدة لتقدير الانتقالية في طبقات المياه الجوفية التي تحتوي على القليل من اختبارات الضخ الجيدة، حيث تعتمد السعة النوعية والانتقالية على فواقد البئر في بئر الضخ. وعموماً، يشيع استخدام السعة المحددة لتقدير قابلية الانتقالية بطبقات المياه الجوفية بسبب توفر بيانات سعة محددة من سجلات الحفر، أما قيمة الانتقالية فهي الأخرى يتم الحصول عليها من خلال اختبار طبقة المياه الجوفية. وفي هذا الشأن قدم العالم 1986 Driscoll معادلات تجريبية Empirical (2.12 – 2.13) تم استخدامها للتنبؤ بالقدرة المحددة، واشتقاقها باستخدام تقريب Cooper-Jacob كوبر و جاكوب 1946، واشتقاق معادلة تجريبية أخرى (2.14) لتقدير قيمة الانتقالية من معادلة Huntley و Razack 1991.

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{T}{Q} 183 \log \frac{2.25Tt}{r_w S} \dots \dots \dots (2.12)$$

أضرب طرفي المعادلة في Q وأقسم على S

$$T = 183 \log \frac{r_w S}{2.25Tt} \dots \dots \dots (2.13)$$

حيث أن:-

Q = معدل الضخ.

s_w = الهبوط في منسوب الماء ببئر الضخ.

T = نفاذية طبقة المياه الجوفية (الانتقالية).

t = الوقت منذ بدء الضخ.

r_w = نصف قطر بئر الضخ.

S = التخزينية بطبقة المياه الجوفية.

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{0.67} \dots \dots \dots (2.14)$$

مثال (2.4):-

من معلومات الجدول أدناه أحسب قيمة الانتقالية من السعة النوعية.

جدول (2.3):- يوضح قيمة الانتقالية من السعة النوعية (المصدر: Jwan, 2017).

رقم البئر	$Q \text{ (m}^3/\text{d)}$	$s_w \text{ (m)}$	$S_c \text{ (m}^2/\text{d)}$	$T \text{ (m}^2/\text{d)}$
1	1114.56	39.6	28.15	143.0
2	907.2	58	15.64	96.4

الحل:-

قيمة الانتقالية بالبئر الأولى

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{0.67} = 15.3 \left(\frac{1114.56}{39.6} \right)^{0.67} = 143.0 \text{ m}^2/\text{d}$$

قيمة الانتقالية بالبئر الثانية

$$T = 15.3 \left(\frac{907.2}{58} \right)^{0.67} = 96.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

2.7 علاقة القدرة النوعية مقابل سمك الخزان الجوفي:- Relationship of specific capacity versus aquifer thickness

هنالك علاقة تربط بين بيانات السعة النوعية وسمك الخزان الجوفي b ، ولإيجاد هذه العلاقة يستخدم مؤشر أو دالة السعة النوعية Si بواسطة المعادلة (2.15). يعبر رياضياً عن مؤشر السعة المحددة بنفس وحدات الموصلية الهيدروليكية m/d . ولا يتم استخدام هذا المؤشر بشكل شائع على الرغم من أنه يمكن استخدامه بدلاً من السعة

المحددة وذلك بغرض إزالة تأثير تباين سماكة الخزان الجوفي على إنتاجية طبقة المياه الجوفية.

$$Si = \frac{S_c}{b} \dots \dots \dots (2.15)$$

في بعض الآبار الجوفية يتم وضع عدد من المصافي في عدد من مناطق الإنتاج n بطبقة المياه الجوفية أو بمجموعة من طبقات الخزان الجوفي (الحوض الجوفي Basin) وذلك بغرض تحقيق الانتاجية المطلوبة. على سبيل المثال قد يتم وضع مصافي البئر من عمق 30 إلى 40 متراً، ومن 50 إلى 60 متراً ومن 65 إلى 80 متراً، وبالتالي فإن إنتاجية البئر وقيمة السعة المحددة تعتبر مزيج من مناطق الإنتاج. قدم والتون 1970 Walton مقارنة لطيفة لتحديد ما إذا كانت الوحدات الأعمق أقل أو أكثر نفاذية من الوحدات العلوية، وذلك عن طريق حساب دالة السعة المحددة لكل بئر، حيث يتم تقسيم وفصل الآبار إلى فئات بناءً على التكوينات الجيولوجية التي تم اختراقها أو عمق التكوين المخترق ومقارنة توزيع دالة السعة المحددة لمختلف فئات الآبار كما يلي:-

- إذا تم العثور على دوال منخفضة السعة المحددة للآبار التي تتقاطع عند وحدات جيولوجية متباينة أو عند أعماق بعيدة فإن الوحدات السفلية تكون أقل إنتاجية.
- إذا زاد مؤشر القدرة المحددة فإن الوحدات الأدنى تكون أكثر إنتاجية.
- إذا أصبح مؤشر السعة المحددة على حاله، عندئذٍ تكون للتكوينات الجيولوجية إنتاجية مماثلة.

الفصل الثالث

تجارب الضخ

Pumping Tests

3.1 ميكانيكية ضخ آبار المياه:- Mechanism of wells pumping

تمثل عملية ضخ البئر بالخزانات المحصورة أخذ المياه من الضغط وهي عكس عملية الضخ بالخزانات غير المحصورة والتي فيها يتم أخذ المياه مباشرة من المخزون الجوفي مما يؤدي إلى تكوين مخروط الانخفاض المائي Cone of depression، ومع استمرار عملية الضخ يتسع المخروط ويزداد عمقاً لتكون الفرصة مؤاتية لحدوث مكون سريان رأسي بالبئر. أما في الخزانات شبه المحصورة - الراشحة Semi-confined aquifer تحدث حركة أفقية للمياه داخل الخزان الراشح نحو البئر وحركة رأسية للمياه لأسفل من الطبقة شبه المنفذة إلى الخزان الراشح. ومع استمرار عملية الضخ يتم التوازن ما بين الرشح من الخزان الأعلى عبر الطبقة شبه المنفذة إلى الخزان الراشح وكمية المياه الخارجة من الخزان الراشح، وفي هذه الحالة يكون الخزان وصل إلى مرحلة التوازن Steady state. من تجربة الضخ يمكن تصنيف العوامل التي تسهم في الهبوط الزائد في الآبار إلى فئتين:-

1- الفئة الأولى: تشتمل على تلك العوامل المتعلقة بشكل أساسي على الاختيار الذي تم فيه تصميم الآبار.

2- الفئة الثانية: تشمل العوامل المتعلقة ببناء وتشبيد الآبار.

3.2 تجارب واختبارات الخزانات الجوفية:- Aquifer tests

يجرى اختبار طبقة المياه الجوفية أو اختبار الضخ لتقييم الطبقة الحاملة للمياه الجوفية عن طريق تحفيز الطبقة أو عن طريق الإجهاد والضغط على طبقة المياه الجوفية من خلال الضخ المستمر بغرض استخراج المياه الجوفية من بئر ضخ واحدة وبمعدل ثابت Constant rate ولمدة يوم واحد على الأقل. ويتضمن مبدأ هذا الاختبار قياس تصريف البئر المنتجة وقياس مدى استجابة طبقة المياه الجوفية لذلك الضغط عن طريق مراقبة مستويات الهبوط في المياه بدقة وعناية فائقة كدالة للوقت في بئر الضخ

وآبار المراقبة - الضاغط البيزومتري Piezometers من مسافات معروفة من بئر الضخ. وخلال عملية الضخ يتغير الارتفاع الهيدروليكي بحيث تتراجع وتنخفض مستويات المياه بالخران الجوفي وآبار المياه ويزداد التراجع مع تقدم الزمن الذي يستمر فيه الضخ.

تُعد الاختبارات الهيدروليكية طريقة معاملة أكثر موثوقية إذا ما تم تخطيطها وتنفيذها بدقة فإنها تكشف عن حقائق هامة حول كيفية أداء الخزان المائي الجوفي نفسه والتي لا يمكن الحصول عليها بنفس الدقة باستخدام أي طريقة أخرى، وفي معظم الأحيان يتم إجراء اختبار مبسط لتشخيص نوع الطبقة الحاملة للمياه الجوفية فضلاً عن تقدير المعاملات الهيدروجيولوجية لطبقة المياه الجوفية، والاختبار بهذا الوضع يعرف باختبار الخزان المائي Groundwater basin. تدرس عملية الاختبار أداء وسلوك آبار المياه الجوفية التي تشمل الخصائص الهيدروليكية للبئر، إنتاجية البئر، معرفة عمق البئر وقطرها، السعة النوعية، كفاءة البئر وقوة المضخات، وفي هذه الحالة يتم قياس معدل التصريف مع أخذ بعض قراءات الهبوط وذلك بغرض اختيار المضخة المناسبة لخصائص تشغيل البئر. وعادةً ما تكون اختبارات السحب التدريجي بمثابة مرشد، ومنها يمكن تقييم أداء فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر، فضلاً عن الحصول على إرشادات لتحديد معدل الضخ الأمثل لاختبار الضخ الثابت بمعدل لاحق. ومن هذه الطريقة يتم تحليل البيانات التي تم الحصول عليها عن طريق معادلات رياضية مناسبة تلائم تدفق الآبار، ومنها يتم حساب كفاءة البئر موضوع هذا الكتاب.

3.3 أهداف تجارب الضخ:- Aim of pumping tests

الهدف الأساسي من اختبار الخزان الجوفي هو التأكد من أن البئر يعمل كما هو متوقع ومخطط له، ومن أهم أهداف هذا الاختبار ما يلي:-
- تحديد كمية المياه المنتجة من البئر.

- تقييم مدى استمرارية الضخ.
- تقييم اداء البئر ومدى وصولها إلى كفاءتها المثلى.
- تقييم الخصائص الأساسية للطبقة الحاملة للمياه الجوفية.
- التحقق من جودة نوعية المياه الجوفية بصورة دورية.

3.4 أجهزة و معدات اختبار الضخ:- Pumping test equipment

يتطلب اجراء اختبارات طبقة المياه الجوفية توفير عدد من المعدات والأجهزة شكل (3.1)، وهي:-

- بئر ضخ رئيسي وبئر مراقبة وأحياناً آبار مراقبة.
- جهاز لقياس التذبذب في مستوى الماء أو عمق الماء Water level indicator.
- وعاء معلوم الحجم عادة برميل ماء أو عداد تدفق يستخدم لتقدير تصريف البئر.
- ساعة إيقاف Stopwatch لقياس مستوى الماء عند زمن معين.
- جداول خاصة لتسجيل بيانات اختبار الضخ – كمية التصريف والهبوط في مستوى سطح الماء مع الزمن.
- ورق Sheet رسم بياني أو لو غاريتمي لرصد القياسات أثناء الاختبار.



شكل (3.1):- يبين بعض من متطلبات تجربة الانتاج: (1) جهاز قياس المناسب الذي

يصدر صوت أو إضاءة لمبة، (2) برميل ماء معلوم الحجم، (3) ساعة توقيت (المصدر: Jwan, 2017).

3.5 اشتراطات تجارب الضخ:- Pumping test requirements

يشترط عند اجراء تجارب الانتاج بالحقل أن لا تبدأ التجربة قبل التعرف على التغيرات الطبيعية لمنسوب المياه بالمنطقة (تغيرات بعيدة المدى تسمى إقليمية وأخرى قريبة المدى تسمى محليه)، حيث يتم قياس مناسب المياه الجوفية بالبئر المنتجة وآبار المراقبة عدة مرات وبدقة فائقة قبل وأثناء تجربة الانتاج وأيضاً يجب الاستمرار في قراءة منسوب المياه بنفس الآبار بعد الفراغ من التجربة لمدة يوم أو يومين. ومن أهم اشتراطات تجارب الضخ أنه يتم قياس مناسب المياه في فترات متقاربة في الساعة الأولى من الضخ وذلك بسبب الهبوط المضطرد للمناسيب خلال تلك الفترة خاصة إذا كانت آبار المراقبة قريبة من بئر الضخ حيث يتأثر منسوب المياه بها مباشرة بعد الضخ إضافة إلى ظروف الخزان الجوفي، وتزداد الفترة الزمنية مع تقدم التجربة وكلما ازدادت أبعاد آبار الملاحظة عن بئر الضخ خاصة بالخزانات المحصورة، وأيضاً يتم قياس تصريف البئر الجوفي عدة مرات وذلك باستخدام طلمبة ضخ ذات إنتاجية ثابتة وبهذه القياسات يمكن التعرف على هذه التغيرات وتسويتها مع قراءات التجربة مع الأخذ في الاعتبار العوامل التي تؤثر في القراءات مثل تنمية البئر وارتفاعات سطح الأرض، حركة القطارات والشاحنات الثقيلة، أيضاً إذا تم عزل الخزان العلوي سيتغير المنسوب وفق خصائص الخزان الأسفل. وعند اجراء اختبار الضخ يجب مراعاة بعض الظروف الآتية:-

- رصد مستوى سطح المياه في بئر لم يضخ لفترة طويلة.
- ثبات الظروف الهيدرولوجية حول الموقع وتمثيله للمنطقة.
- البعد عن خطوط السكك الحديدية، المطارات والطرق الخلوية.

- البعد عن الآبار العاملة بالمنطقة وإيقاف ضخ الآبار المجاورة.
- يجب أن يكون ميلان منسوب المياه معدوم أو قليل الميل Negligible.

3.6 خطوات إجراءات اختبار الضخ:- Pumping test procedures

يُجرى اختبار الضخ لتقييم طبقة المياه الجوفية وذلك من خلال عمل اختبارات في الحقل على الآبار الجوفية المحفورة سابقاً وعلى الآبار المحفورة بغرض عمل أبحاث عليها. تعتمد تجارب الإنتاج على ضخ المياه من البئر المنتجة Pump well مع قياس الكمية المنتجة من المياه حيث يؤدي ذلك إلى الانخفاض في مستوى سطح الماء بالبئر المنتجة وآبار المراقبة والتي تكون على أبعاد معروفة من البئر المنتجة ليتم وضع نتائج هذه القياسات على معادلات حركة المياه ومنها يمكن حساب الخواص الهيدروليكية للخران الجوفي أو البئر، ويتم تحليل هذه الخواص بطريقتين هما:-

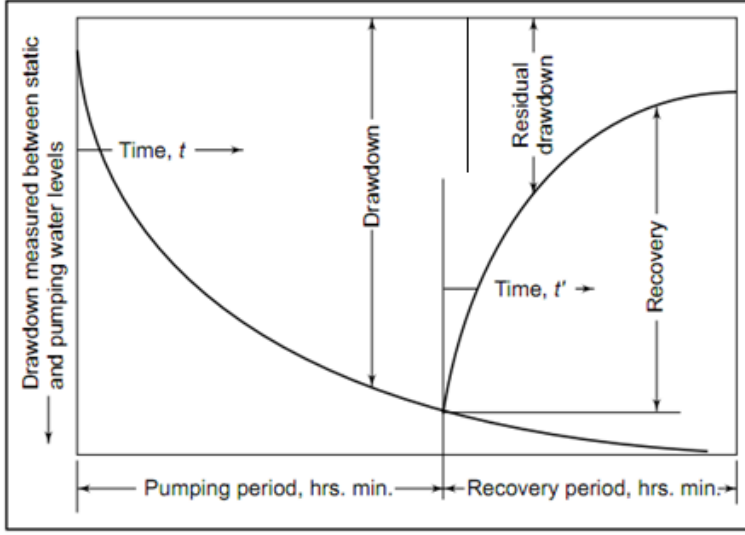
- الانخفاض في المنسوب مع الزمن.

- الانخفاض في المنسوب مع المسافة.

ذكرنا فيما سبق أنه عند ضخ آبار المياه الجوفية يبدأ مستوى سطح الماء في الانخفاض بصورة سريعة في الدقائق الأولى من التجربة ثم يتناقص تدريجياً حتي يصل الي مرحلة الثبات Steady state flow خلال عدة ساعات أو أيام (حسب نوع الخزان الجوفي) وأحياناً قد لا يصل الي مرحلة التوازن Unsteady state flow حيث توجد طرق ومعادلات لكل من الحالتين. الأصل في الاختبار هو: الاطمئنان إلى وصول المنسوب الثابت إلى عمقه قبل بداية الاختبار مع الأخذ في الاعتبار العوامل التي أدت إلى عدم رجوعه، مثلاً عدم النظافة الجيدة، احتواء الغلاف الحصوي على أكاسيد الحديد التي تترسب وتعمل علي أغلاق فتحات المصفاة، وقبل البدء في عملية تجربة الاختبار يجب التأكد من اتخاذ عدد من الترتيبات الهامة والخاصة بعملية الاختبار وهي كما يلي:-

- إغلاق جميع الآبار القريبة من بئر الضخ قبل 24 ساعة من بدء عملية الاختبار.
- إذا بدأ الاختبار فيجب أن يستمر إنتاج المياه دون توقف حتى ينتهي الاختبار، فإذا توقف الإنتاج لأي سبب من الأسباب فإنه ينبغي إعادة الاختبار مرة أخرى بعد مضي 24 ساعة من زمن التوقف.
- يجب قياس مستوى الماء الساكن (الثابت) بدقة عدة مرات وفي أوقات مختلفة قبل بداية عملية الاختبار في بئر الضخ الذي لم يضخ لفترة طويلة وفي آبار المراقبة.
- يتطلب إجراء اختبارات الضخ أخذ قياسات مستوى الماء خلال فترات زمنية محددة ومتقاربة باستعمال جهاز قياس المناسب، أما في حالة الآبار المتدفقة ذاتياً فإنه ينبغي استخدام قياس الضغط.
- اختيار نقطة مناسبة يتم الرجوع إليها لتصحيح جميع قياسات مستوى سطح الماء.
- في اختبارات الضخ ينبغي أن تكون المضخة قادرة على إنتاج أقصى حد ممكن لكميات المياه المتوقع انتاجها بعد اتمام عمليات تنمية وتطوير البئر.
- تشغيل المضخة، وتسجيل تصريف البئر وعمق الماء كدالة للوقت في جداول خاصة.
- تركيب صمام Valve على أنبوب التصريف للعمل على إنتاج كميات ثابتة من الماء أثناء عملية الاختبار وأي تغير في معدل التصريف أثناء الاختبار ينبغي معالجته في الحال باستخدام الصمام.
- الاستمرار في تسجيل بيانات الاختبار حتى تتحقق حالة التوازن.
- عند إيقاف تشغيل المضخة في نهاية الاختبار، ستبدأ مستويات المياه في البئر في العودة إلى مستوى ما قبل الضخ، ويسمى هذا الارتفاع في مستوى المياه باسم السحب المتبقي Residual drawdown والذي يمثل الفرق بين مستوى الماء الساكن ومستوى الماء أثناء فترة الاستعاضة (التعافي).

- يجب خلال عملية الاختبار تسجيل درجة التوصيل الكهربائي للمياه فضلاً عن درجة حرارة المياه وذلك خلال فترات زمنية محددة ومتقاربة.
- من أساسيات اجراء اختبارات الضخ أو اختبار الانخفاض في مستوى سطح الماء هو حساب الخصائص الهيدروليكية للخرانات الجوفية أو للبئر الجوفي (درجة التوصيل المائي، الانتقالية والتخزينية) مع مقارنة تلك النتائج مع نتائج تجربة اختبار الرجوع شكل (3.2)، حيث أن هنالك عدة طرق تستخدم في حساب تلك الخصائص وذلك عند وصول البئر إلى مرحلة الثبات أو مرحلة عدم الثبات. وتحتاج المعادلات التي تصف هيدروليكية الآبار إلى الاستعانة بافتراضات ثايس وكوبر - جاكوب التي يجب توفرها عند تطبيق هذه الطرق ومن هذه الافتراضات الآتي:-
- الخزان محصور، غير محصور أو راشح (شبه محصور) وممتد إلى ما لانهاية - غير محدود المساحة.
- الخزان متجانس ومتساوي الخواص الهيدروليكية أفقياً ورأسياً.
- قبل بداية الضخ يجب أن يكون مستوى سطح الماء الخيالي Piezometric surface أفقياً بالمنطقة المتأثرة بالضخ.
- يتم ضخ المياه بمعدل ثابت.
- يخترق البئر الجوفي السمك الكلي للخزان الجوفي Fully penetrating عليه يكون سريان المياه نحو البئر أفقياً.
- المياه التي تضخ من البئر يجب أن تحدث تغير لحظي في منسوب سطح الماء وأن لا ترجع مرة أخرى للخزان الجوفي خلال تجربة الانتاج.
- قيم الانتقالية تكون ثابتة في كل نقطة من مقطع بالطبقة المائية وفي جميع الأوقات.
- الجريان طباقى وبالتالي يمكن استخدام قانون دارسي.
- البئر ذات قطر صغير لضمان عدم وجود مخزون جوفي بالبئر.



الشكل (3.2):- يوضح تجربة الهبوط في مستوى سطح الماء وتجربة الرجوع (المصدر: Jack and Hudson 1961).

3.7 أنواع اختبارات الضخ:-

Types of pumping tests

من الناحية المثالية يتطلب إجراء اختبار طبقة المياه الجوفية توفر ظروف طبيعية لسطح مائي مستقر، ولكن وفي كثير من الأحيان قد يرتفع منسوب المياه وينخفض بسبب إعادة التغذية والتصريف الطبيعي لخزان المياه الجوفية بسبب الأمطار، عمليات الري، والضخ من الآبار، والتغيرات في الضغط الجوي، وحركات المد والجزر في طبقات المياه الجوفية الساحلية وغيرها ... الخ. يتم تقسيم الاختبارات إلى قسمين مرحلي للآبار Step test ومستمر للخزانات Continuous، ومن أهم اختبارات الضخ الأساسية الآتي:-

3.7.1 اختبار الضخ ذو المعدل الثابت:- Constant rate pumping test

يعتبر من أكثر أنواع اختبارات الضخ شيوعاً، وفيه يتم استخراج المياه من الخزان الجوفي عبر البئر المنتجة بانتظام ولمدة زمنية معينة (من عدة ساعات إلى عدة أيام أو

حتى أسابيع) للحفاظ على معدل إنتاج واحد مع تسجيل الهبوط في هذا البئر وآبار المراقبة القريبة. والاختبار المثالي ينبغي أن يستمر حتى الوصول على الأقل إلى مرحلة التوازن والثبات أي حتى يثبت مخروط السحب، ولكن عملياً فإن ذلك نادر الحدوث. وخلال اجراء هذا الاختبار تتم مراقبة ورصد مستويات المياه في بئر الضخ في جداول خاصة بغرض معرفة مدى استجابة الضغط داخل بئر الضخ أثناء مرحلة الهبوط فضلاً عن تسجيل مدى الاستجابة في بئر المراقبة أو آبار المراقبة التي توضع على مسافات مختلفة من بئر الضخ حسب نوع التكوينات الجيولوجية. ففي الخزانات المائية المحصورة يتسع مخروط السحب سريعاً لأنه يحدث تفريغ حقيقي من المياه ولكن بدلاً من ذلك فإن الضغط يتناقص في المنطقة المحيطة بالبئر ولذلك فإن الاختبار لمدة 24 ساعة يعتبر كافي للحصول على معلومات يعتمد عليها في تقدير الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي، ولكن في حالة الخزانات المائية الحرة فإنه يلزم حوالي 72 ساعة لتفريغ الماء الموجود بداخل مخروط السحب لأن الماء يتغلغل إلى أسفل ببطء في معظم الرسوبيات الطباقية بيد أنه في بعض الحالات فإن مخروط السحب يثبت قبل مرور هذه المدة وعلى أية حال فإنه ينبغي عدم إيقاف الاختبار قبل الوصول إلى حالة الثبات.

3.7.2 اختبار الاستعاضة:- Recovery test

بعد إيقاف سحب المياه من البئر المنتجة يتم قياس مستوى الماء أو الضغط في هذه البئر وآبار المراقبة وبنفس الفترات الزمنية المتبعة في الاختبار السابق لمدة 24 ساعة أو حتى يعود الماء إلى مستواه الثابت الأصلي تقريباً.

3.7.3 اختبار الضخ التدريجي:- Step drawdown pumping test

يُجرى هذا الاختبار عادةً لتقييم أداء البئر وفقد الخزان الجوفي والبئر وهو خلاف الاختبار المستمر Continuous الذي يختص بتقييم خصائص الخزانات الجوفية.

ويرشدنا هذا الاختبار المرحلي للآبار Step test لاختبار معدل الضخ الأمثل الذي يجب أن تضخ به البئر. يتم إجراء هذا النوع من الاختبار كسلسلة من اختبارات الضخ المتتابعة ذات المعدل الثابت في كل مرحلة. ولا يتطلب اختبار السحب التدريجي فواصل ضرورية لاستقرار منسوب المياه الجوفية، بل يجب أن يستمر الضخ عند مستوى معين حتى تحدث ظروف تدفق ثابتة. ويستمر هذا الاختبار لفترة قصيرة عادةً من 8 إلى 10 ساعات مقارنة باختبارات الضخ الأخرى، وبمعدلات ضخ تزيد تدريجياً في كل خطوة تلي الخطوة السابقة من الضخ.

أثناء هذا الاختبار تتم مراقبة جميع بيانات الضخ وتسجيلها ورسمها في الحقل بالتقريب، وفي حالة ملاحظة أي انحرافات في الرسم البياني ربما قد تعزى إلى وجود شذوذ Anomalies وعدم دقة ناتجة عن تشغيل المضخة وتخزين الماء في البئر، وعندها يمكن اتخاذ قرارات بشأن تمديد أو تقصير طول فترة الاختبار المخطط له أو محاولة تعديل معدل الضخ.

تكمن أهمية هذا الاختبار في تحديد عدد من المعاملات الهيدروليكية للخران الجوفي والبنر، وبالتفصيل هنالك أسباب مختلفة تعضد من أداء اختبار الضخ المتدرج ومن أهمها ما يلي:-

- في حالة الآبار الاستكشافية يسمح هذا الاختبار بفهم سلوك البئر أثناء الضخ وتحديد القدرة الإنتاجية المثلى لاختبار طبقة المياه الجوفية اللاحقة، وتحليل الأداء الجيد بمرور الوقت.

- يساعد هذا الاختبار في تحديد كفاءة البئر التي نخبرنا بدورها ما إذا كان بناء البئر تم بشكل مثالي أم لا. وفي كثير من الأحيان لم يتم التركيز بشكل كبير على كفاءة البئر حيث يكون التركيز في الغالب على الحصول على عائد جيد للبئر دون النظر في كفاءة البئر. فمثلاً عند معرفة أن البئر لها كفاءة منخفضة عندها نتجاهل كفاءة البئر

المنخفضة بغرض الحصول على انتاجية كبيرة البئر، هذه الطريقة غير مناسبة لتطوير أنظمة البئر.

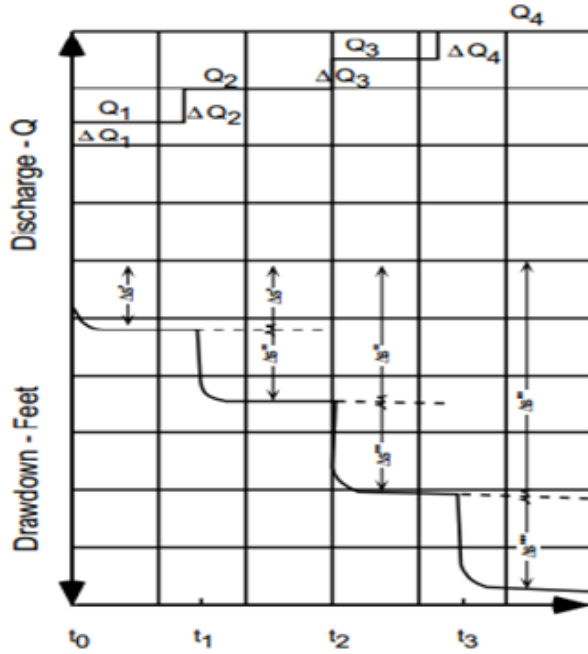
3.8 طريقة اجراء اختبار الضخ المتدرج:- Procedure of step pumping test

تم إجراء هذا الاختبار لأول مرة بواسطة العالم جاكوب Jacob في عام 1947. ويعد اختبار الهبوط عند مراحل متزايدة من الانتاج هو اختبار بئر واحد يتم فيه سحب الماء من البئر المنتجة عند مراحل متتابعة ومتزايدة من الانتاج وتسجيل الهبوط المصاحب لكل من هذه المراحل وفترات زمنية مساوية إلى الزمن المتوقع لتشغيل البئر، غير أنه من الشائع أن يبدأ اختبار الضخ المرحلي بضخ الماء بمعدل أقل من معدل التصريف التصميمي، ثم زيادته في كل مرحلة من مراحل الضخ وهي على الأقل ثلاث مراحل تغطي مجموعة واسعة من التدفقات ($Q_{1,2,3...n}$)، ويفضل أن يكون ذلك مطابقاً لتدفق التصميم المقترح أو يتجاوزه. وفي هذا الاختبار يتم ضخ البئر مبدئياً بمعدل تصريف ثابت ومنخفض في البداية Q_1 ، ونتيجة لذلك ينخفض مستوى سطح الماء سريعاً ثم يقل معدل الانخفاض تدريجياً بمرور الوقت t حتى يثبت ويستقر الانحدار في مستوى سطح الماء داخل البئر بشكل أساسي وفيها نصل إلى حالة الثبات والسكون s_{w1} ويصبح الانسياب متوازناً. ومن ثم تتم زيادة معدل الضخ إلى معدل تصريف ثابت أعلى من سابقة Q_2 ليقاس الانخفاض الجديد في مستوى سطح الماء s_{w2} بعد فترة من زمن الضخ الثاني حتى يستقر الانخفاض في المنسوب مرة أخرى، ويتم زيادة معدل التصريف Q_3 لتقاس الزيادة عند أقصى انخفاض لمنسوب الماء s_{w3} حتى يثبت مستوى الماء تدريجياً، والسبب في ثبات مستوى سطح الماء هو وصول الطبقة المائية إلى مرحلة من الانسياب المتوازن والمتساوي مع معدل الضخ. وهكذا تتابع سلسلة الضخ التدريجي في كل مرحلة عن طريق زيادة كمية التصريف

على التوالي $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 < Q_5$ وذلك مع قياس قيمة الانخفاض في مستوى سطح الماء مع الزمن في كل مرة مع تقدم زمن التجربة.

من الناحية المثالية يجب أن يكون زمن ضخ البئر في كل مرحلة من هذه المراحل متساوي المدة الزمنية ولفترة قصيرة مقارنة بأي اختبار آخر، وعلى سبيل المثال بضع ساعات لكل منها وهي غالباً ساعة إلى ساعتين، وعادةً ما يحدث الاختبار الكامل في يوم واحد، وتعمل أوقات الضخ المتساوية على تبسيط تحليل البيانات الحقلية.

ويقوم الجيولوجي خلال هذه المراحل بتسجيل معدل الضخ Q والتغير في مستوى سطح الماء s_w مع الزمن منذ بدء الضخ حتى يثبت المستوى في جداول رصد معدة خصيصاً لهذا الغرض، وبمعنى آخر في كل خطوة يتم تحديد الانخفاض أو الهبوط التزايدى بواسطة منحنى السحب التكميلي إلى منحدر يتناسب مع التصريف شكل (3.3). ويسمح التحليل الإحصائي لتلك البيانات بحساب القيم المقاربة لكل سلسلة زمنية، وعليه فإن لكل مرحلة من مراحل الضخ المتدرج أهميتها القصوى في حساب كفاءة البئر وتصحيح بيانات الانخفاض في المنسوب والتي يمكن تقدير المعاملات الهيدروليكية.



شكل (3.3):- يوضح طريقة توقيع بيانات السحب التدريجي (المصدر: خبير المياه الجوفية الإقليمي، وكالة حماية البيئة الأمريكية، المنطقة الثامنة).

3.9 تفسير البيانات الحقلية لاختبار الضخ التدريجي:- Interpretation data of step drawdown test

يتم تصميم هذا الاختبار عند توفير قياسات الانخفاض في المنسوب في بئر الضخ لمجموعة من الانتاجيات المختلفة، ونظراً لأن معظم إنتاجية البئر يتم تعيينها عند اختبار حقل بئر معين وذلك بناءً على الآبار الموجودة في نفس منطقة البئر المجاورة، وهي في الغالب أو معظمها بدون إجراء اختبار الهبوط التدريجي، وبالتالي فإن هذه الطريقة تعتبر غير علمية لتحديد إنتاجية البئر المثلى Optimum.

يوصف هذا الاختبار بأنه اختبار بئر واحدة تتبعه سلسلة من معدلات الضخ الثابتة والمتتالية. وهذا الاختبار مصمم بحيث يساعد في تقييم الخزان الجوفي والحالة الراهنة للبئر وفي تحديد كفاءة البئر وهي التي بدورها تخبرنا ما إذا كان بناء وتشديد البئر قد

تم بصورة جيدة أم لا. وأيضاً ترشدنا وتوجهنا اختبارات السحب التدريجي في تحديد معدل الضخ الأمثل (تعيين إنتاجية البئر) وإجراء اختبار ضخ بمعدل ثابت في وقت لاحق.

يرتبط الانخفاض الكلي في الآبار بعاملين: الأول خسائر الخزان الجوفي أو فقدان التكوينة BQ ، التي ترتبط بالتدفق الخطي وهي جزء من الانخفاض المتعلق بالخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي ويمكن التنبؤ بها من خلال معادلات الهبوط أو السحب النظرية، ويرجع عنصر السحب الثاني إلى التدفق عبر مصفاة البئر والتدفق داخل البئر إلى المضخة فيما يسمى بخسائر الآبار CQ^n ، وهذه الخسارة مرتبطة بالتدفق المضطرب، وفي هذه الحالة يتم وصف العلاقة رياضياً بدرجة (n) ، والتي تختلف في نطاق التكوينة وفقاً للعديد من الباحثين.

3.10 أنواع الخسائر المختلفة:- Different types of losses

تتشكل هذه الخسائر أثناء ضخ المياه من البئر، وعليه فإن الهبوط في بئر الضخ يتكون من مكونين هما: خسارة الخزان الجوفي وخسائر البئر شكل (3.4)، وعليه فإن إجمالي الانخفاض في عمود الماء بالبئر Δh_w هو مجموع خسارة عمود الماء – الانخفاض الهيدروليكي في الخزان الجوفي Δh_a عند البئر أو بالقرب من البئر إضافة إلى فقد البئر Δh_L ، والذي يمثل جزء من الانحدار أو الهبوط في البئر بسبب التدفق المضطرب عبر مصفاة البئر وفي غلاف البئر معادلة (3.1). وللتمييز بين هذه الخسائر يتم إجراء اختبار الضخ التدريجي لمعرفة أداء الآبار. ومن هذا الاختبار يستطيع الباحث تحديد إجمالي مكونات الفوائد الرأسية بالآبار، فأتثناء التدفقات القليلة عبر مصفاة البئر قد يكون تدفق المياه رقائقياً في كل من الخزان الجوفي والبئر، والعكس قد يحدث فقد البئر المضطرب عند مراحل الضخ الأعلى، ووفقاً لهذا

الافتراض يتم إجراء الحسابات باستخدام معادلات مختلفة أهمها معادلة جاكوب (3.2).

$$\Delta h_w = \Delta h_a + \Delta h_L \dots \dots \dots (3.1)$$

Which as also:

$$s_w = \Delta h_w = BQ + CQ^2 \dots \dots \dots (3.2)$$

بقسمة الانخفاض على معدل تصريف البئر، تتغير المعادلة أعلاه ومنها نتحصل على قيمة الانخفاض النوعي على النحو التالي:-

$$s_w/Q = B + CQ \dots \dots \dots (3.3)$$

ومن المعادلة (3.2) يمكن كتابة المعادلة العامة (3.4 و 3.6) التي تصف الهبوط في بئر الضخ، وذلك عند تتابع فواقد كل من الخزان الجوفي والبئر ومعدل التصريف، وعليه فإن الفواقد الكلية تكتب كما جاء في المعادلة العامة الآتية:-

$$Total\ loss\ s_w = Aquifer\ loss\ BQ + Turbulent\ well\ loss\ CQ^2$$

$$s_w = (B_1 + B_2)Q + CQ^n = BQ + CQ^n \dots \dots \dots (3.4)$$

$$s_w = s_1 + s_2 + s_3 + s_n \dots \dots \dots (3.5)$$

$$s_w = \frac{Q}{(4\pi T)[\ln(4tT/r_w^2 S) - 0.5772] + CQ^2} \dots (3.6)$$

حيث أن:-

$$B_1 Q = \text{خسائر الخزان الجوفي Aquifer loss.}$$

$$B_2 Q = \text{خسائر البئر الخطية Linear well loss.}$$

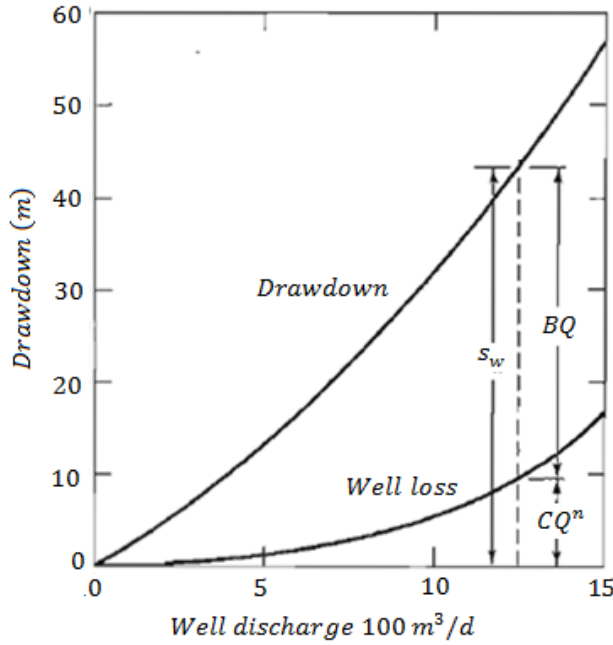
$$T = \text{نفاذية طبقة المياه الجوفية (الانتقالية).}$$

$$t = \text{الزمن بالأيام.}$$

$$r_w = \text{نصف قطر البئر الفعال.}$$

S = التخزينية بطبقة المياه الجوفية.

تُستخدم بيانات اختبار أداء البئر (اختبار الهبوط التدريجي) لتحديد الأنواع المختلفة من الخسائر. وفي هذا الشأن تم تقدم حلاً رسومياً للمعادلة (3.4) والتي يمكن استخدامها لتحديد معامل فاقد خزان المياه الجوفية B وثابت فقدان البئر C . ويتم حساب هذه المعاملات B و C من منحنيات (s_w/Q) مقابل منحنيات Q شكل (3.7)، ومن قيم هذه المعاملات الهيدروليكية نتحصل على العلاقة التي تربط بين الهبوط (السحب) وكمية الضخ لاختيار العائد التجريبي الأمثل للبئر أو الحصول على معلومات حول حالة أو كفاءة البئر.



شكل (3.4) :- تبين إجمالي الهبوط في المنسوب، فقدان الخزان الجوفي وخسارة البئر مقابل تصريف البئر (المصدر: (1953 Rorabaugh).

3.11 أسباب فواقد الانخفاض في المنسوب:- Causes of low level losses

يتشكل الانخفاض في بئر الضخ من مكونين هما: فواقد طبقة المياه الجوفية وفقد البئر. وتعزى فواقد الانخفاض في المنسوب إلى كفاءة البئر الناتجة بسبب سوء تصميم وتشديد البئر أو تنميتها، وقد تكون كل هذه العوامل مجتمعة، وفي المقابل لا تتسبب السرعة الآمنة في حدوث أضرار للبئر بل تتجنب السريان العشوائي وتقلل من فواقد الاحتكاك Friction losses أو فقد البئر ما بين المياه وفتحات المصافي حتى تصبح مهملة بالإضافة إلى خفض حركة دخول مواد التكوينة (الرمال الناعمة) إلى فتحات المصافي وبالتالي تقل فرص معدلات التآكل والتقشير، وعموماً يجب أن تكفي المساحة المفتوحة بالمصفاة سرعة دخول المياه فتحات المصفاة بحيث لا تتجاوز التصميم القياسي الأمثل ولكن عند تجاوز سرعة دخول المياه للمصفاة إلى الحد الأمثل الموصى به فإن الزيادة في سرعة الدخول تؤدي إلى خلق مشاكل تتمثل في الآتي:-

- زيادة طاقة الفقد.

- زيادة جهد التآكل والتقشير.

- زيادة حركة المواد الناعمة بالخران الجوفي في اتجاه المصافي ربما تخلق تجويف أو قد تعبر إلى داخل البئر.

ومن العوامل الأخرى تعمل على زيادة الانخفاض في مستوى سطح الماء وبالتالي تقلل من كفاءة الآبار ما يلي:-

1- إذا كانت فتحة المصافي كبيرة وغير موصى بها من قبل نتائج التحليل الميكانيكي لعينات التكوينة الجيولوجية فإنها تؤدي إلى زيادة سرعة دخول الماء إلى داخل المصفاة وبالتالي يكون هنالك مزيد من الانخفاض في مستوى سطح الماء مع زيادة فاقد البئر والعكس إذا كانت فتحة الفلتر صغيرة فإنها تؤدي إلى تقليل سرعة الدخول التي تزيد بدورها من قيمة فاقد البئر.

2- تغليف البئر تغليفاً جزئياً Partially penetrating وذلك بنقص طول المصافي التي تخترق جزء من كامل سمك الخزان الجوفي.

3- وضع المصافي في عمق غير مناسب في طبقة غير حاملة للماء والذي يجب أن يقابل أفضل طبقة منتجة للماء أي الخزان الجوفي.

4- يؤدي تقليل كمية، حجم، شكل وسوء توزيع الغلاف الحصى Gravel pack إلى تقليل النفاذية خاصة إذا كان الغلاف الحصى يتكون مادة غير سيليكاتية مثلاً كربوناتية.

5- عدم تنمية البئر تنمية جيدة وذلك بترك وبقاء طينة الحفر Mud cake حول جدار البئر مما يؤدي إلى تقليل النفاذية.

عند تحليل بيانات اختبارات أداء الآبار المنتجة نجد أنها تحتوي على عدة مكونات من الانخفاض في المنسوب وذلك اعتماداً على معدل الضخ، ويرتبط الانخفاض في المنسوب بمقاومة سريان وتدفق المياه الجوفية التي تدخل البئر من خلال فتحات مصافي البئر. ومن أهم مكونات الانخفاض التي تحدث أثناء تجربة الإنتاج ما يلي:-

أولاً: خسائر طبقة المياه الجوفية:-

تمثل الخسائر الرئيسية بطبقة المياه الجوفية والتي فيها يكون التدفق رائقاً Laminar شكل (3.4)، وتختلف أو قد تتغير هذه الخسائر خطياً مع تصريف البئر. وتكاد تكون خسائر طبقة المياه الجوفية مستقلة تماماً عن البئر نفسها لأنها تعتمد على خصائص طبقات المياه الجوفية المختلفة جنباً إلى جنب مع طريقة استخراج المياه. وتمثل خسارة أو فاقد التكوينية الجيولوجية الفرق بين مستوى سطح الماء الساكن والهبوط داخل الطبقة المائية المحيطة بالبئر وذلك اعتماداً على قيمة الوقت، ونادراً ما يتغير فقدان الخزان الجوفي في أي منطقة بمرور الوقت ما لم تحدث بعض التغيرات الهيدروجيولوجية الرئيسية. ويرمز لهذه الخسائر بالرمز s_{w1} . ويعزى الفرق بين

السحب الكلي s_w وفقد الخزان الجوفي s_{w1} إلى الفواقد الرأسية التي تحدث بسبب انتقال المياه من طبقة المياه الجوفية إلى البئر وبالتحديد أعلى تجويف البئر (شكل 2.2). ومن المثير للاهتمام أنه يمكن عقد مقارنة لطيفة بين خسائر الخزان الجوفي وقيم النفاذية، فالمناطق التي تكون فيها قيم النفاذية أعلى بها خسائر أقل للخزان الجوفي والمناطق التي تكون فيها قيم النفاذية أقل لها خسائر عالية في الخزان الجوفي، ويرجع السبب إلى ضعف عملية التغذية. وفي الممارسة العملية يتم تضمين الفواقد الرأسية الإضافية الناتجة على سبيل المثال عن طريق الاختراق الجزئي للبئر في فواقد طبقة المياه الجوفية، وعليه يمكن التعبير عن فواقد الخزان الجوفي من معادلة جاكوب على النحو التالي:-

$$s_{w1} = B_{1(r_w, t)} Q = B_1 Q = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r_w^2 S} \dots \dots \dots (3.7)$$

1- أنواع خسائر طبقة المياه الجوفية:- **Types of aquifer losses**

أ- خسائر طبقة المياه الجوفية بدون اختراق جزئي:- **Aquifer losses without partial penetration**

وهي خسائر الخزان باستخدام الاختراق الكلي **Aquifer losses with fully penetration**، وتمثلها خسائر التكوين الخالصة وهي مستقلة تماماً عن البئر، فإذا كانت معاملات الخزان الجوفي معروفة عندها يمكن تحديد خسائر الخزان الجوفي من معادلة التدفق وذلك باستخدام الظروف الهيدروجيولوجية، ومن طريقة معادلة جاكوب (3.7) يسهل تحديد خسائر الخزان الجوفي لطبقة المياه الجوفية المحصورة عندما يتم اختراق البئر بالكامل وفي حالة عدم ثبات الجريان.

ب- خسائر الخزان الجوفي بسبب الاختراق الجزئي: - Aquifer losses due to partial penetration

عند تقييم اختبارات أداء البئر لا يمكن إهمال تأثير الاختراق الجزئي بشكل كامل في منطقة الدراسة، ويرجع السبب إلى أن الاختراق الجزئي للبئر يؤدي إلى تحريض المكونات الرأسية للتدفق بالقرب من البئر وفي المنطقة المجاورة مباشرة للبئر، وفي هذه الحالة تزيد سرعة التدفق أكثر مما هو متوقع بالإضافة إلى حدوث خسائر إضافية في ارتفاع منسوب الماء. وللوصول إلى حالة التدفق الثابت يمكن تطبيق طريقة تصحيح Huisman لتحديد الهبوط الإضافي s_{wp} الذي يحدث بسبب الاختراق الجزئي لطبقة المياه الجوفية المحصورة وهو على النحو التالي:-

$$s_{wp} = \frac{Q}{2\pi T} \frac{(1-P)}{P} \ln \frac{eD}{r_w} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$P = d/D \dots \dots \dots (3.9)$$

حيث أن:-

$d/D=P$ = معدل الاختراق.

d = طول مصفاة البئر.

$1/D=e$ = كمية الانحراف Amount of eccentricity.

1 = المسافة ما بين وسط مصفاة البئر ووسط الخزان الجوفي.

t = معامل وظيفة p و e .

r_w = نصف القطر المؤثر لبئر الضخ.

2- معامل فاقد الخزان الجوفي:- Coefficient of aquifer loss

أثبتت التجارب أن قيمة عامل فقدان طبقة المياه الجوفية B يعتمد على الوقت، ومع ذلك فإن B تتغير بشكل طفيف فقط بعد مدة ضخ معقولة وبالتالي يمكن افتراض أنها

ثابتة. أحياناً قد يتم العثور على قيم عالية لهذا المعامل في بئر لم يتم تطويرها بشكل صحيح بعد الحفر وأثناء الإنتاج وذلك عندما يتم انسداد مصفاة البئر بسبب ترسبات كربونات الكالسيوم أو قشرة الحديد. ويتم تقدير هذا المعامل رياضياً على النحو التالي:-

$$B = \frac{1}{(4\pi T)[\ln(4tT/r_w^2 S) - 0.5772]} \dots \dots \dots (3.10)$$

ثانياً: فواقد البئر:- Well losses

ذكرنا فيما سبق أن خسارة الخزان الجوفي تعتمد على خصائص الخزان الجوفي فقط ، بينما خسارة البئر تنشأ من التأثير المشترك لفقد دخول المياه المصفاة وفقدان الاحتكاك داخل الآبار التي يتم ضخها. وتمثل فواقد البئر الهبوط (السحب) الزائد بسبب التدفقات غير الصفحية الناتجة من سوء تصميم البئر، وبالتفصيل تعتمد جميع النظريات الهيدروليكية التقليدية للبئر على افتراض أن ظروف التدفق الصفائحية موجودة في طبقة المياه الجوفية أثناء الضخ، فإذا كان التدفق رقائقياً فإن السحب يتناسب طردياً مع معدل الضخ. أما في حالة حدوث تدفق مضطرب لم تعد العلاقة الخطية بين السحب ومعدل الضخ قائمة، وبشكل عام يرتبط جزء من الهبوط في المنسوب بمعدل الضخ الذي تمت زيادته، وأيضاً عند حدوث تدفق مضطرب ستتخفض السعة المحددة بشكل كبير في الغالب مع زيادة معدل التصريف، وبمعنى آخر أن فقدان البئر يؤدي إلى سوء تقدير السعة المحددة الذي يمكن توقعه إذا كانت هذه السعة تعكس فقط إنتاجية الخزان الجوفي. وعند تقييم أداء البئر يلاحظ أن قدراً معيناً من خسائر الآبار أمراً لا مفر منه، وأن كفاءة البئر من 70 إلى 80 تتحقق عادةً إذا تم تنفيذ التصميم والتطوير بشكل مثالي، أما في حالة أن حجم فتحات مصفاة البئر يكون متوافقاً مع الوسائط المسامية المحيطة فإن فقدان البئر يكون ناتجاً بشكل رئيسي

عن الحركة المحورية داخل البئر حتى مدخل المضخة، وفي هذه الحالة يكون فقدان البئر الناتج عن دخول المياه للبئر من خلال المصفاة صغير جداً، ولكن عند زيادة انسداد المصفاة يزداد فقد البئر مما يؤثر سلباً على كفاءة المضخة.

يعرف فقدان البئر CQ^n بأنه انخفاض مؤكد ناتج عن تدفق المياه من خلال مصفاة البئر والحركة المحورية داخل البئر، ورياضياً هو الفرق بين هبوط مستوى سطح الماء النظري والمقاس داخل البئر والهبوط الفعلي بالطبقة المائية المحيطة بالبئر شكل (3.4). تحدث ظاهرة فقدان البئر نتيجة للأخطاء التي تصاحب تصميم البئر أثناء الإنشاء والتي منها اختراق المصافي جزئياً للخران الجوفي وصغر أو كبر حجم فتحة المصافي والغلاف الحصوي والذي يؤدي إلى انسداد مصافي الآبار بواسطة الرواسب الرملية الدقيقة Running sand، كل هذه العوامل مجتمعة تقود إلى زيادة فقد البئر الذي يتبعه تدهور في كفاءة البئر خاصة في آبار المياه القديمة. ومن العوامل الطبيعية التي تعمل على زيادة فواقد البئر هو ضعف نفاذية التكوين المائي. ومما سبق ذكره نجد أن فقد البئر يمكن أن يكون جزءاً كبيراً من إجمالي الهبوط وذلك عندما تكون معدلات الضخ كبيرة شكل (3.5)، وإجمالاً يزيد فقد البئر مع زيادة التصريف، ولكن عند التصميم السليم وتطوير البئر/ الآبار الجديدة يمكن التقليل من فواقد البئر إلى أدنى حد ممكن.

1- قيمة الأس: Exponent value

أكد العالم Rorabaugh 1953 من دراسة اختبار السحب التدريجي أن فقدان البئر بسبب التدفق المضطرب يوصف بدقة أكبر على أنه يتناسب مع معدل الضخ الذي تم رفعه إلى أعلى طاقة ممكنة، وأيضاً أشار إلى أن قيمة n يمكن أن تنحرف بشكل يزيد عن 2 (أكبر من 2)، ولاحظ أنها تتراوح من 2.4 إلى 2.8، وبالتالي اقترح قيمة تمثيلية 2.5 ($s_w = CQ^{2.5}$). ووفقاً للعالم لينوكس 1966 Lennox يمكن أن

تختلف قيمة n بين 1.5 و 3.5، وقد تكون قيمتها أعلى في طبقات المياه الجوفية الصخرية المجوّه وفي مناطق الكسور، وأيضاً اقترح هذا العالم أن قوة معدل الضخ التي يكون فيها فقدان البئر متناسباً تعادل أو أكبر من 3.5 ($s_w = CQ^{3.5}$)، ولكن قد تكون هذه قيمة غير عادية. وفي معظم الحالات يمكن افتراض أن فقد البئر يتناسب مع مربع معدل الضخ ($s_w = CQ^2$). وعموماً، لا تزال قيمة الأس n تساوي 2 كما اقترح جاكوب 1947م، وهي قيمة ثابتة يمكن افتراضها بشكل معقول ومقبول على نطاق واسع. وعموماً لا يمكن تحديد القيمة الدقيقة لـ n بسبب اختلاف الآبار الفردية، وتُظهر التحقيقات التفصيلية للتدفقات داخل الآبار وخارجها حدوث تباينات كبيرة في توزيعات التدفق المفترضة مع الأخذ في الاعتبار فقدان البئر.

2- إجمالي خسائر الآبار:- Total well losses

تتطلب الإدارة السليمة لحقول آبار المياه الجوفية تقليل خسائر البئر وذلك عن طريق تقليل سرعة دخول المياه للوصول إلى الحد المسموح به، والتي يمكن القيام بها عن طريق تركيب الطول والفتحة المطلوبة والمناسبة للمصفاة هذا بالإضافة إلى الضخ بأقل معدل مقبول. يقسم إجمالي خسائر الآبار الرأسية إلى خسائر آبار خطية وأخرى غير خطية وهي بالتفصيل كما يلي:-

أ- خسائر الآبار الخطية:- Linear well losses

وفقاً لافتراضات دارسي قد يكون التدفق إلى البئر رقائقياً إذا كانت السرعة منخفضة نسبياً. وبالتفصيل تحدث فواقد الآبار الخطية s_{w2} أو $B_2 Q$ بسبب إتلاف طبقة الخزان الجوفي أثناء عملية الحفر الجوفي وإكمال البئر، وهي على سبيل المثال تحدث نتيجة للعوامل الآتية:-

- ضغط ودمك Compaction مواد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية أثناء الحفر.

- الفواقد الرأسية بسبب انسداد Plunging مسام الخزان الجوفي بمادة طين الحفر Drilling mud مما يقلل من النفاذية بالقرب من ثقب أو فتحة التجويف بالقرب من البئر.

- الفواقد الرأسية بسبب اغلاق حزمة الغلاف الحصوي الصناعي والفواقد الرأسية بمصفاة البئر.

يعبر عن الهبوط المقابل لفواقد البئر الخطية s_{w2} من المعادلة الرياضية (3.11)، ولإيجاد قيمة التدفق الصفاحي تستخدم المعادلة (3.12).

$$s_{w2} = B_2 Q \dots \dots \dots (3.11)$$

Linear well loss = Laminar loss – Aquifer loss

$$B_2 Q = BQ - B_1 Q \dots \dots \dots (3.12)$$

ب- خسائر الآبار غير الخطية:- Non-linear well losses

تعرف بخسائر الاحتكاك، ويرمز لها بالرمز s_{w3} ، وهي تحدث بسبب التدفقات المضطربة داخل البئر وخارجها مباشرةً بالقرب من حافة البئر من خلال مصفاة البئر أو بسبب الاحتكاك الذي يحدث داخل مصفاة البئر وفي أنبوب الشفط Suction pipe حيث يكون التدفق أو الانحراف مضطرباً، أما الخسائر الرأسية فهي تحدث داخل البئر وخارجها في المنطقة المجاورة للبئر حيث يكون التدفق أيضاً مضطرباً وذلك مع زيادة سرعة سريان المياه مباشرةً بالقرب من البئر أو جوارها، وفي هذه الحالة قد تصبح سرعة التدفق كبيرة بما يكفي لتكون مضطربة، الأمر الذي يبطل قانون دارسي. هناك عامل آخر يساهم في خسارة البئر وهو التدفق المضطرب داخل البئر بسبب المسافة البعيدة من المصفاة إلى مدخل المضخة Pump intake في الآبار المحفورة. وبالتفصيل تنتج خسائر البئر المضطربة في بئر الضخ بسبب العوامل التالية:-

1- التدفق المضطرب في المنطقة خارج البئر، أي في حزمة الحصى.

2- التدفق المضطرب عبر مصفاة البئر - سرعة دخول الماء.

3- التدفق المضطرب داخل البئر إلى مدخل المضخة.

مجموع هذه الخسائر في الآبار هي المسؤولة عن الانخفاض في منسوب الماء داخل الآبار وهي أكبر بكثير مما يتوقعه الباحث على أسس نظرية أو على أرض الواقع. وللتعبير عن الهبوط المضطرب s_{w3} المقابل لفواقد البئر غير الخطية تستخدم المعادلة (3.13)، أما لتقدير إجمالي خسائر الآبار أو الهبوط الكلي Total well drawdown الذي يشمل مجموع كل من الفواقد الخطية والفواقد المضطربة تستخدم المعادلة (3.14).

$$s_{w3} = CQ^n \dots \dots \dots (3.13)$$

Total well loss

$$= \text{Linear well loss } B_2 Q$$

$$+ \text{Turbulent well loss } CQ^2 \dots \dots (3.14)$$

ذكرنا فيما سبق أن العالم هنري دارسي افترض أن التدفق نحو البئر قد يكون رقائقياً إذا كانت السرعة منخفضة نسبياً ومطابقة لسرعة الجريان المثلى الموصى بها، غير أن جاكوب افترض أن الانخفاض في البئر يعتمد على معامل التدفق الصفائحي في منطقة الخزان الجوفي بالإضافة إلى المعامل غير الرقائقي في منطقة البئر. وعلى هذا الأساس تستخدم منهجية تقييم حالة الآبار على افتراضات جاكوب، حيث تفترض المنهجية أن قيمة خسائر الدخول تعتمد على معدل الضخ، فعندما تكون السرعة منخفضة نسبياً تكون العلاقة بين الانخفاض ومعدل الضخ خطية، ولكن عندما يزداد معدل الضخ تمتد منطقة التدفق غير الصفائحي إلى طبقة المياه الجوفية. ولتحديد

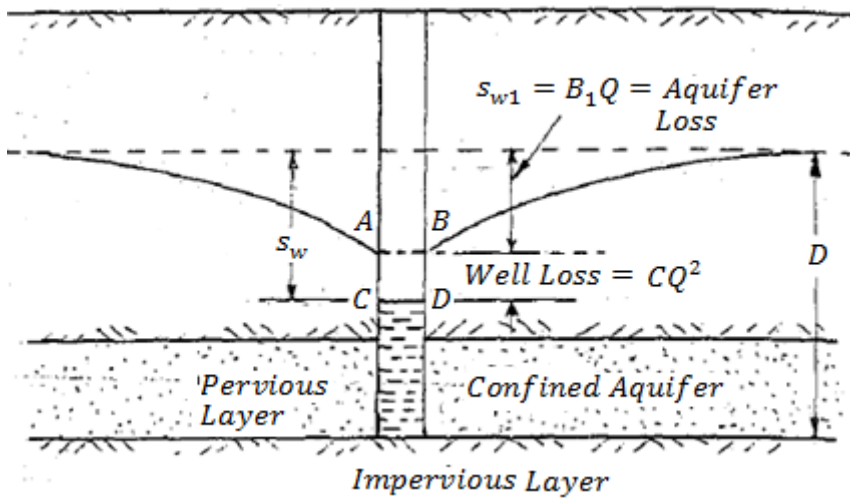
السرعات الصفائحية أو غير الصفائحية بالقرب من جدار البئر فإنه يلزم إجراء اختبارات هيدروليكية متعددة المراحل في معدل الضخ على نطاق واسع.

اقترح جاكوب أنه يمكن التعبير عن إجمالي السحب أو الهبوط في البئر بشكل أكثر دقة كمجموع مكون الهبوط من الدرجة الأولى (المستوى الصفائحي) ومكون الهبوط الترددي من الدرجة الثانية (المستوى المضطرب). ومع ذلك، فقد أظهر تحليل البئر الحقيقي أن هذا الارتباط غير صحيح ، لأن مصطلح فاقد طبقة المياه الجوفية BQ دائماً ما يشتمل على جزء كبير من خسائر البئر، ويتضمن مصطلح CQ^2 أحياناً بعض خسائر طبقة المياه الجوفية. لهذا السبب فإن حساب نسبة كفاءة البئر من اختبار السحب التدريجي ينتج عنه قيم خاطئة. ولكن لا يزال اختبار السحب التدريجي مفيداً في تقييم حجم الفواقد الرأسية المضطربة وذلك بغرض تحديد معدلات الضخ المثلى.

يمكن التمييز بين فواقد البئر الخطية وغير الخطية، فمثلاً التدفقات الخطية تحدث إذا كانت معدلات الضخ منخفضة بدرجة كافية وعندها ستكون سرعات التدفق بالقرب من بئر الإنتاج خطية، وفي هذه الحالة يكون مكون أو عنصر فقد البئر في الهبوط متناسباً بشكل مباشر مع معدل الضخ. يحدث هذا الشرط عندما تكون السعة المحددة ثابتة مع زيادة التصريف Q . وفي ظل هذه الحالة لا يمكن تقييم مكونات فقد البئر وفقدان طبقة المياه الجوفية في الانخفاض على حده، لذلك لا يمكن تحديد كفاءة البئر. ولكن عندما تتخفض السعة المحددة مع زيادة التصريف وهو ما يحدث في كثير من الأحيان عندئذٍ يجب استنتاج الظروف المضطربة. وفي ظل الظروف المضطربة ووفقاً لجاكوب 1947 يتناسب فقدان البئر مع مربع معدل الضخ $s_w = CQ^2$.

أثبتت العديد من الدراسات أنه عندما يتم ضخ الماء من البئر، فإن السحب أو الهبوط الناتج لا يشمل فقط السحب الذي يتم إعطاؤه من منحني السحب على وجه البئر، ولكنه يتضمن أيضاً سحباً معيناً ناجماً عن تدفق المياه عبر مصفاة البئر والحركة المحورية

داخل البئر بمعنى أن فقدان البئر يرتبط بالتدفقات المضطربة الناتجة عن التدفق عبر مصفاة البئر والتدفق داخل البئر إلى مدخل المضخة شكل (3.5). وبالتفصيل يؤدي الهبوط الناتج عن التدفق عبر المصفاة والحركة المحورية داخل البئر إلى خفض مستوى الماء في البئر من النقطة AB إلى CD شكل (3.5). ويُعرف هذا الهبوط التدريجي العمودي من B إلى D بفقدان البئر، وحجم هذه الخسارة يساوي CQ^2 وفيها يكون تدفق السطح البوري لوجه البئر مضطرباً، ويرجع السبب إلى أن فقدان البئر يرتبط بالتدفق المضطرب، وفي هذه الحالة يمكن الإشارة إلى أن فقدان البئر يتناسب مع القدرة التصريفية التي فيها تكون قيمة n ثابتة وهي أكبر من واحد، غير أن التصريفات العالية تعمل على زيادة عامل الاضطراب n مما يؤدي في النهاية إلى زيادة فاقد البئر.



شكل (3.5):- يميز التدفقات الخطية بالخران الجوفي عن التدفقات غير الخطية بالبئر.

Laminar losses

ج- الخسائر الطبقيّة:-

تدعى بالخسائر الصفحية وهي تعادل مجموع خسائر الخزان الجوفي وخسائر البئر

الخطية - $B_1Q + B_2Q$.

د- الخسائر المضطربة:- Turbulent losses

تسمى هذه الخسائر أيضاً بخسائر البئر غير الخطية وهي تحدث بسبب التدفقات المضطربة داخل البئر وخارجها مباشرةً بالقرب من البئر.

3- العوامل التي تساهم في خسارة الآبار:- Factors that contribute to the well losses

تؤدي تأثيرات فقدان البئر إلى تدفقات غير خطية والتي بدورها تسبب زيادة الهبوط في المنسوب. يتم تحديد تأثيرات فقدان الآبار بشكل أساسي من خلال تصميم البئر وحفرها وتطويرها. ومن أهم تلك التأثيرات هو ازدياد تدفق المياه الجوفية من خلال المصفاة وغلاف البئر خاصة بالنسبة للآبار العميقة ذات المصفاة المحدودة. علاوة على ذلك يمكن أن تتسبب تأثيرات أخرى في زيادة فقد البئر بشكل كبير بمرور الوقت. وبشكل عام يستدعي العدد الكبير من تأثيرات فقدان الآبار دراسة ومراجعة كل أثر يساهم في فقد البئر على حده وهي كما يلي:-

أولاً: تصميم البئر

يلعب تصميم بئر إنتاج المياه الجوفية دوراً كبيراً في التحكم في الهبوط أثناء الضخ. كمثال واحد المنطقة المفتوحة فهي مهمة لتنمية الآبار الفعالة، وتضمن المنطقة المفتوحة الكافية أن تكون سرعات دخول المياه الجوفية أقل من 3.1 سم/ ثانية للحفاظ على التدفق الصفائحي عبر المصافي، فإذا لم تكن هناك مساحة مفتوحة كافية فقد يصبح التدفق مضطرباً ويسبب فقدان البئر.

ثانياً: الحفر الجوفي

يمكن أن يساهم بشكل كبير في خسارة البئر في حالة تلف التكوينة الجيولوجية القريبة من البئر. تعتمد درجة ضرر التكوينة بشكل كبير على طريقة الحفر المستخدمة. ففي حالة آبار المياه الجوفية عالية السعة فإن أكثر طرق الحفر شيوعاً هي الدوران

الرحوي الطيني Rotary drilling حيث يكون ضغط السوائل في البئر أكبر من ضغط التكوين المجاور (الحفر غير المتوازن)، ونتيجة لذلك يمكن أن يُفقد مائع الحفر بسهولة في طبقة المياه الجوفية. وعموماً تعتبر التكوينة بالقرب من البئر تالفة في منطقة ذات نفاذية منخفضة.

خلال اجراء عمليات الحفر الجوفي يمكن تطوير تلك المنطقة التي تحيط بالبئر Skin zone حتى إذا كانت الآبار محفورة بدون سوائل حفر. لذلك فإن الهدف من إجراءات التطوير هو إزالة التكوينة الناعمة حول منطقة أو جسم البئر، على الرغم من صعوبة إزالة سوائل الحفر 100% ناهيك عن الحبيبات الناعمة. من أفضل الممارسات لتعزيز جهود التنمية قدر الإمكان هو استخدام تقنيات تطوير متعددة، أما إذا كان التطوير غير كافي فسيحدث فقد البئر من خلال حزمة المرشح والمنطقة المحيطة بالبئر.

ثالثاً: الضغط الميكانيكي

يساهم الضغط الميكانيكي لحزمة المرشح وانسداد حزمة المرشح ومصافي البئر بمرور الوقت في فقدان البئر الكبير. يؤدي هذا الضغط والانسداد إلى تقليل مسامية حزمة المرشح ومنطقة المصفاة المفتوحة مما قد يحد من مسارات التدفق، وفي النهاية يتسبب في فقد البئر أثناء الضخ. ومن أهم العمليات التي تسبب الانسداد هي: ترسب الأطوار المعدنية مثل أكاسيد الحديد، المنغنيز والكالسيوم.

رابعاً: التدفق

نادراً ما يحدث توزيع موحد للتدفق إلى البئر في الحقل، وبالنظر إلى التوزيع الطبيعي للتوصيل الهيدروليكي في الطبيعة فقد يختلف عن التدفق الداخل للبئر بترتيب أكبر من المتوسط بمعنى أن يأتي 90% من التدفق من 10% من قسم الخزان الجوفي Kaergaard, 1982. يؤدي عدم تجانس طبقة المياه الجوفية إلى إنشاء مسارات تدفق عشوائية متداخلة مع بعضها - غير خطية، مما يؤثر في النهاية على توزيع التدفق

العمودي عبر مصفاة البئر. وفي نفس الوقت يمكن أن يحدث تأثير مماثل إذا كان لمصفاة البئر توزيع ضعيف لفتحات المصفاة (إما من تصميم البئر غير المناسب أو انسداد مصفاة البئر) مما يتسبب في تدفق التقارب المفرط بالقرب من الفتحات الفردية للمصفاة.

مما سبق يتضح أن هناك العديد من المساهمين في فقد البئر ببئر الضخ. وأن فقدان البئر يزيد من الطاقة اللازمة لإنتاج المياه الجوفية، وبالتالي فإن تقدير خسارة الآبار وضمان تقليلها أصبح أمراً مهماً لتقليل التكاليف الاقتصادية والبيئية المرتبطة بإنتاج المياه الجوفية. وعلى هذا النحو فإن المنهجيات المقترحة في هذا الكتاب مهمة لتقدير الهبوط s_w بمعدل ضخ تصميم البئر لتكون بمثابة مقياس أداء البئر. ولكن في حالة أن تقديرات الهبوط تصبح كبيرة جداً عندها يجب اتباع المزيد من التطوير لبئر جديد أو إعادة تأهيل بئر موجود مسبقاً لضمان الحصول على بئر مياه جوفية فعالة.

4- أهم المناطق التي تحدث فيها خسائر الآبار:-

أ- خسائر الآبار بالقرب من وجه فتحة التجويف:- Well losses at near the

borehole face

تعتبر هذه الخسائر بمثابة خسائر رقائقية، ويقاس وجودها من اختبارات أداء البئر، وتحدث هذه الخسائر في المنطقة المتضررة (التالفة)، وترتبط بشكل كامل ببناء وتطویر الآبار. ففي منطقة الضرر قد يخترق طين الحفر الذي يحتوي على قدر أكبر أو أقل من الطين والحطام الصخري الناعم طبقة المياه الجوفية أثناء عملية الحفر الجوفي التي تكون موصليتها الهيدروليكية أقل بكثير من تلك الموجودة بالخران الجوفي، وإلى جانب ذلك وبسبب دوران السوائل قد يتم تغطية البئر بقشرة طينية مما يعيق تدفق المياه نحو البئر. بمرور الوقت قد يؤدي الانسداد الميكانيكي وترسب الرواسب الكيميائية وجزيئات التكوين الدقيقة إلى زيادة هذه الخسائر الصفائحية.

ب- خسائر الآبار بسبب التدفق خلال حزمة الحصى:-

Well losses due to flow through gravel pack

تحدث هذه الخسائر أحياناً في حالة وجود بئر معبأ بالحصى وذلك بسبب الطبيعة غير المنتظمة للتدفق المضطرب في الوسائط المسامية، فمن المحتمل أن يحدث التدفق الصفائحي وكذلك المضطرب في هذه المنطقة. تعتبر الخسائر النظرية في حزمة الحصى منخفضة جداً، ومع ذلك ونظراً لوجود بقايا طين الحفر فقد تصبح حزمة الحصى أقل نفاذية كما هو متوقع لتزيد من فقد الهبوط في منسوب الماء. وفي حالة أنه تم تزويد البئر بحزمة حصى اصطناعية مناسبة، فإن خسائر التدفق في منطقة عبوات الحصى تحسب على النحو التالي:-

$$CQ_g = \Delta W_g = \Delta W, g = \frac{Q}{2\pi K_g h_g} \ln \frac{r_d}{r_s} \dots \dots \dots (3.15)$$

حيث أن:-

ΔW_g = فواقد البئر بسبب التدفق خلال حزمة الحصى.

K_g = نفاذية حزمة الحصى.

h_g = سمك حزمة الحصى.

r_d = نصف قطر ثقب أو تجويف الحفر الجوفي.

r_s = نصف قطر مصفاة البئر.

ج- خسائر الآبار بسبب التدفق من خلال فتحات المصفاة إلى البئر:- Well losses

due to flow through the screen opening into the well

تعتبر بمثابة خسائر مضطربة، وهي تحدث بسبب اختبارات الضخ العالية، فالجزء السائد من هذه الخسائر يكون في المنطقة المتاخمة للبئر وبالتحديد عند مدخل المصفاة ومن خسائر الاحتكاك داخل البئر الرئيسي، وعموماً لا يمكن تجنب هذه الخسائر.

ويمكن حساب الفواقد الرأسية بسبب التدفق من خلال فتحات المصفاة على النحو التالي:-

$$CQ_s = \Delta W_s = \frac{v_e^2}{u^2 2g} \dots \dots \dots (3.16)$$

حيث أن:-

ΔW_s = خسائر الآبار بسبب التدفق من خلال فتحات المصفاة.

$Q/0.09 \pi d_0^2 = v_e$ = سرعة دخول المياه بالمصفاة متر/ ثانية.

u = معامل الانكماش Coefficient of contraction.

g = عامل الجاذبية متر/ ثانية مربعة.

نظراً لأن الفواقد الرأسية تتناسب مع مربع سرعة الدخول v_e^2 ، فقد تزداد الفواقد بشكل حاد عند انسداد منطقة المصفاة بسبب الأنشطة الميكانيكية والكيميائية المختلفة. هذه الفواقد من النوع المضطرب، ويمكن الإشارة إليها عن طريق اختبار التراجع التدريجي إذا كانت خسائر الاحتكاك معروفة.

د- فواقد البئر بسبب فاقد الاحتكاك عن طريق التدفق داخل المصفاة والصاعد الرئيسي:- Well losses due to friction losses by flow inside the screen and the rising main

بعد اجتياز المياه فتحات مصفاة البئر يتدفق الماء لأعلى من خلال المصفاة والغلاف إلى الطرف السفلي لأنبوب الشفط من أنبوب المضخة: وذلك بافتراض تقسيم التدفق الداخلي بالتساوي على الطول الكامل للمصفاة. وتعتبر هذه الخسائر من النوع المضطرب وتصبح جزءاً كبيراً عندما تكون البئر عميقة وذات سعة نوعية عالية.

Increment of well losses

3.12 زيادة خسائر الآبار:-

تحدث ظاهرة خسائر آبار المياه ربما بسبب تقليل المساحة المفتوحة للمصفاة نتيجة لظاهرة الانسداد. ويشير انخفاض قيمة السعة المحددة أو كفاءة البئر إلى أن الآبار تعاني من أنواع مختلفة من الانسداد. ففي حالة حدوث انخفاض مفرط لسعة نوعية معينة تساوي أو تزيد عن 25% فإن الآبار المختبرة تتطلب تطويراً فورياً. من أجل التصميم المناسب للبئر يجب بذل محاولات لتقليل فواقد البئر إلى أدنى حد ممكن، لذلك من الضروري معرفة العوامل التي تسبب خسائر الآبار الزائدة في الآبار المحفورة. وتعزى هذه العوامل إلى الآتي:-

- 1- الفجوات المسدودة جزئياً من حزمة الحصى (الخلفية) حول مصافي الآبار.
- 2- انسداد المنطقة المتاخمة لفتحات المصفاة.
- 3- المسافة العالية من نقطة دخول المياه في البئر إلى نقطة السحب في المضخة - موضع المضخة.

3.13 الأسباب الرئيسية التي تؤدي إلى حدوث فواقد البئر:- The main causes of well losses

- اختراق الخزان الجوفي جزئياً أي تغليف البئر جزئياً.
- رداءة نوعية مواد الغلاف الظلطي، فمثلاً نجد أن مواد الخزان الجوفي التي تحتوي على حديد يتفاعل مع المياه ليعطي أكسيد الحديد الذي يعمل على تآكل Corrosive وتحطم فتحات المصفاة، وأيضاً تعمل مواد الخزان الجوفي التي تحتوي على كربونات تتفاعل مع المياه لتترسب على فتحات المصفاة وتعمل على انسدادها.
- تداخل Intercalation طبقات الطين والسلت مع الطبقات الحاملة للمياه الجوفية.
- الغسيل غير الجيد الذي لا يعمل على خروج مواد الحفر الجوفي Mud cake من داخل البئر.

- الغسيل العكسي غير الجديد Back washing.
- ضخ الخزان الجوفي بكميات كبيرة تفوق التغذية.

معامل فاقد البئر:- Coefficient of well loss

هو ثابت يعبر عن الخسارة في البئر، ويحكمه نصف قطر البئر، فعالية تطوير البئر هذا بالإضافة إلى الحالة الراهنة لمصفاة البئر (وجه المصفاة – السطح الخارجي للمصفاة)، والمساحة المفتوحة الفعالة لمصفاة البئر أو الغلاف المثقب perforated casing وهنا يشار إلى أن انسداد مصافي الآبار يمكن أن يزيد من خسائر الآبار القديمة.

تُشير القيم السالبة لثابت الارتفاع غير الخطي لمعامل فقدان البئر C إلى التطور أثناء الاختبار، ويرتبط عامل فقد البئر ارتباطاً وثيقاً بحالة البئر، ومن تقريب جاكوب يمكن التعبير عنه بـ $\min^2/m^5$ لأن قيمة n دائماً ثابتة. وبناءً على التجارب الميدانية اقترح 1962 Walton معايير لمعامل فقدان البئر غير المنتظم، وهي التي يمكن معرفة وتقييم الحالة الراهنة للبئر من خلال حساب قيمة معامل فاقد البئر ومقارنتها مع القيم التي وضعها العالم والتون جدول (3.1). ففي حالة أن قيمة عامل فقد البئر سالبة فهو أمر لا معنى له، وغالباً يحدث على الأرجح بسبب عدم دقة تسجيل البيانات. جدول (3.1): يوضح الحالة الراهنة للبئر الجوفي من خلال القيم المختلفة لمعامل فاقد البئر (المصدر: 1962 Walton).

حالة البئر	معامل فقد البئر C (d^2/m^5)
مصممة بشكل صحيح ومطوره Properly designed and developed.	$< 2.5 \times 10^{-7}$
تدهور خفيفاً وانسداد Mild deterioration and clogging.	$2.5 \times 10^{-7} \text{ to } 5.1 \times 10^{-7}$

$5.1 \times 10^{-7} \text{ to } 2.0 \times 10^{-7}$	تدهور شديد أو انسداد or clogging.
$> 2.0 \times 10^{-7}$	من الصعوبة بمكان استعادة البئر لقدرتها الأصلية Difficult to restore well to original capacity.

3.14 المقاومة الهيدروليكية:- Hydraulic resistance

يعمل تشغيل الآبار عند تصريف أعلى بكثير من مواصفات التصميم إلى الانسداد الأولي الذي يزيد من سرعة الدخول. وعليه يعتمد تنظيم معدل الضخ وموقع منسوب المياه الجوفية على خاصية المضخة، وأيضاً على معامل مقاومة الخزان الجوفي ومعامل مقاومة البئر. ففي منطقة البئر تعتمد طبيعة التدفق على القطر الفعال لحصى الترشيح Filtering gravel. وفي هذه المنطقة يمكن تمييز عدد من التدفقات هي:-
أولاً: مع زيادة المسافة من جدار البئر نحو التكوينة الجيولوجية تقل سرعة التسرب الظاهرة ويصبح التدفق رقائقياً.

ثانياً: مع إنتاجية كبيرة من الآبار وقطر فعال صغير للحبيبات، عندها تزيد سرعة التدفق ويكون التدفق مضطرباً في منطقة البئر.

تساهم التدفقات المضطربة في انسداد المصفاة، ونتيجة لهذه العملية تحدث زيادة في معامل مقاومة الآبار الهيدروليكية وظهور خسارة كبيرة في البئر، وقد تتسبب هذه الظروف في زيادة تكاليف ضخ المياه، تسريع تقادم مصفاة البئر، والنتيجة النهائية هي انخفاض في إنتاج الوحدة من البئر. وعملياً يتم تحديد الخسارة الهيدروليكية hydraulic loss التي يرمز لها بالرمز D من خلال الفحص والتأكد من حالة انسداد المصفاة معادلة (3.17)، ويشير مقياس خسارة البئر إلى قيمة معامل مقاومة التدفق

المضطرب في البئر وبالتحديد في منطقة البئر CD شكل (3.5). فكلما انخفضت قيمة المعامل ارتفع عامل كفاءة البئر والعكس. ووفقاً لتصنيف والتون يجب ألا يتجاوز المعامل $0.0003 \text{ h}^2/\text{m}^5$.

تسمح طريقة اختبار الضخ متعدد المراحل بتحديد الحد الأقصى لمعدل الضخ الذي لا يحدث فيه الشيوخة المتسارعة وذلك عندما تكون سرعة التدفق صفائية في مصفاة البئر، وعليه تكون العلاقة بين الهبوط ومعدل الضخ خطية، ويمكن وصفها بالمعادلة (3.18).

$$D = \frac{s_w}{Q} \dots \dots \dots (3.17)$$

$$s_w = B_1 Q + B_2 Q = (B_1 + B_2) Q = D Q \dots \dots \dots (3.18)$$

حيث أن:-

s_w = الانخفاض الكلي في بئر الضخ (m) .

Q = تصريف البئر (m^3/d) .

B_1 = معامل خسارة الخزان الجوفي الخطي (d/m^2) .

B_2 = معامل خسارة البئر الخطي (d/m^2) .

D = معامل المقاومة البديل للتدفق الصفائي عبر الخزان الجوفي والبئر (d/m^2) .

3.14.1 أسباب حدوث المقاومة الهيدروليكية:- Causes of hydraulic

resistance

السبب الأكثر شيوعاً لانخفاض الأداء هو انسداد فتحات المصفاة، وللتمييز بين الأنواع

المختلفة من أسباب انسداد مصفاة البئر ما يلي:-

- المواد الكيميائية مثل الكربونات ومعادن الحديد.

- الميكانيكية والتي تحدث نتيجة ترسب جزيئات الصخور على فتحات مصفاة البئر.

يؤدي ترسب الجسيمات غير العضوية على المصفاة وفي منطقة البئر إلى زيادة المقاومة الهيدروليكية التي تعيق تدفق المياه إلى المصفاة، لذلك من المهم الحفاظ على حالة المصافي لتجنب انخفاض كفاءة التشغيل.

3.15 تحليل نتائج اختبارات الضخ المتدرج:- Analysis of the results of step pumping tests

من تحليل البيانات الحقلية لاختبار الانخفاض التدريجي يتم اختبار أداء البئر في حالة حدوث سريان عشوائي وذلك عند ضخ البئر لفترة زمنية وبمعدلات تصريف مختلفة. ومن هذا الاختبار يستطيع الباحث تحديد وضبط إجمالي مكونات الفواقد الرأسية بالبئر، ومكونات الفقد بالخران، ويتم إجراء الحسابات باستخدام معادلات مختلفة.

Procedure كيفية تطبيق الطريقة:-

لتطبيق هذه الطريقة هنالك عدد من الخطوات يجب اتباعها وهي كما يلي:-
- وقع قيم الانخفاض التراجعي في مستوى سطح الماء s_w رأسياً على مقياس رسم حسابي مع زمن الضخ t أفقياً على مقياس رسم لوغاريتمي للحصول منه على شكل منحنى عند كل مرحلة من مراحل الضخ وذلك باستخدام ورق رسم شبه لوغاريتمي Semi-log paper شكل (3.6).

- من منحنيات مراحل الضخ المختلفة أحسب معدل التغير في تصريف البئر ΔQ ومعدل التغير في الانخفاض التراجعي في المنسوب Δs .
- أحسب معامل فاقد البئر C لكل مرحلتي ضخ مثلاً المرحلة الأولى والثانية، الثانية والثالثة وهكذا ... الخ وذلك باستخدام المعادلة التالية:-

$$C_{1\&2} = \frac{\left[\left(\frac{\Delta s_2}{\Delta Q_2} \right) - \left(\frac{\Delta s_1}{\Delta Q_1} \right) \right]}{\Delta Q_1 + \Delta Q_2} \dots \dots \dots (3.19)$$

- أحسب متوسط فواقد البئر CQ^2 من خلال المرحلة الوسطي المختارة من مراحل الضخ وذلك بضرب قيمة مربع تصريف البئر في متوسط قيم معامل فاقد البئر في الخطوة السابقة.

- وقع قيم الانخفاض النوعي s_w/Q رأسياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم تصريف البئر Q أفقياً على نفس مقياس الرسم الحسابي السابق وذلك باستخدام ورقة رسم بياني شكل (3.7).

- صل النقاط إلى تم توقعها بخط مستقيم.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الرأسى لنقرأ قيمة معامل فاقد التكوينة B وذلك عندما تكون قيمة تصريف البئر تساوي صفر.

- أوجد قيمة معامل فاقد البئر من ميلان الخط المستقيم (فرق الصادات على السينات) أو من معادلة الخط المستقيم وهي طريقة أخرى للتأكد من صحة قيمة معامل فاقد البئر.

- أحسب مستوى الانخفاض الكلي في مستوى سطح الماء s_w لمرحلة الضخ الوسطي باستخدام معادلة جاكوب (3.2).

- أحسب قيمة فاقد التكوينة الجيولوجية وفواقد البئر من معادلة جاكوب (3.2).

- أحسب فعالية البئر الجوفي من المعادلة العامة (2.2).

مثال (3.1):-

في إحدى اختبارات الضخ المتدرج على أحد الآبار بحوض بارا الجوفي (بئر مغيسية) بولاية شمال كردفان تم إجراء اختبار الضخ التدريجي وسجلت البيانات اللازمة في الجدول (3.2). تضمن اختبار السحب التدريجي ضخ البئر بأربعة معدلات ضخ متتالية أو خطوات كل منها 120 دقيقة. علماً بأن معدل الضخ في المرحلة الأولى والثانية والثالثة والرابعة يساوي 6.13، 12.50، 16.50 و 26.30

لتر لكل ثانية على التوالي. تم تحليل البيانات التي تم تطويرها من هذا الاختبار لتحديد حجم الهبوط بسبب الخزان الجوفي أو فقدان التكوين BQ وفقدان البئر CQ^2 ومعدل الضخ المستدام لاختبار ضخ الخزان الجوفي بمعدل ثابت. حلل هذه البيانات باستخدام المعادلات وطريقة منحنى الانخفاض النوعي ومن ثم أحسب الآتي:-

- 1- فاقد البئر الجوفي.
- 2- فاقد التكوينة الجيولوجية.
- 3- فعالية البئر خلال المرحلة الثانية والثالثة من الضخ.

جدول (3.2):- يوضح بيانات اختبار الضخ المتدرج.

t (min)	depth w. (m)	s_w (m)	t (min)	depth w. (m)	s_w (m)	t (min)	depth w. (m)	s_w (m)
0	14.76	0.00	135	18.24	3.48	315	19.59	4.83
2	15.23	0.46	140	18.25	3.49	330	19.61	4.85
4	16.18	1.42	150	18.31	3.55	345	19.62	4.86
6	16.23	1.47	160	18.34	3.58	360	19.62	4.86
8	16.24	1.48	170	18.37	3.61	<i>End of III step</i>		
10	16.26	1.50	180	18.37	3.61	362	22.65	7.89
15	16.30	1.54	195	18.38	3.62	364	22.73	7.97
20	16.32	1.56	210	18.39	3.63	366	22.81	8.05
30	16.34	1.58	225	18.40	3.64	368	22.87	8.11
40	16.34	1.58	240	18.41	3.65	370	22.90	8.14
50	16.36	1.60	<i>End of II step</i>			375	22.93	8.17
60	16.36	1.60	242	19.45	4.69	380	22.95	8.19

75	16.38	1.64	244	19.52	4.76	390	23.01	8.25
90	16.40	1.64	246	19.52	4.76	400	23.09	8.33
105	16.40	1.64	248	19.51	4.75	410	23.10	8.34
120	16.41	1.65	250	19.51	4.75	420	23.15	8.39
<i>End of I step</i>			255	19.51	4.75	435	23.23	8.47
122	17.99	3.23	260	19.52	4.76	450	23.26	8.50
124	18.09	3.33	270	19.52	4.76	465	23.27	8.51
126	18.15	3.39	280	19.54	4.78	480	23.27	8.51
128	18.18	3.42	290	19.55	4.79	<i>End of IV step</i>		
130	18.20	3.44	300	19.57	4.81			

خطوات الحل:-

تم تحليل بيانات الاختبار بواسطة الطريقة الرسومية حيث تم رسم الهبوط الملحوظ في بئر الإنتاج s_w مقابل الوقت المقابل t لكل خطوة ضخ على ورق الرسم البياني شبه اللوغاريتمي شكل (3.6). ثم تم استقراء المنحنى عبر البيانات المرسومة لكل خطوة حتى نهاية الخطوة التالية في الاختبار. الهبوط التدريجي لكل خطوة Δs_w هو الفرق بين الهبوط في نهاية خطوة معينة والهبوط المستقرأ من الخطوة السابقة كما هو موضح في الشكل (3.6). إجمالي الهبوط s_w هو مجموع عمليات الهبوط التدريجي. ثم تم حساب نسبة s_w/Q لكل خطوة فردية n وتم تلخيص البيانات المشتقة من الاختبار بالتفصيل على النحو التالي:-

- بعد مرور 120 دقيقة من كل مرحلة من مراحل الضخ يتم حساب التغير في تصريف البئر ΔQ والانخفاض التراكمي في مستوى سطح الماء Δs_w كما بالشكل (3.6) ليتم وضع هذه القيم في الجدول (3.3).

- أحسب معامل فاقد البئر C للمرحلتين الأولى والثانية، الثانية والثالثة وأيضاً الثالثة والرابعة وذلك باستخدام المعادلة (3.19). ومن العمليات الحسابية يكون ناتج متوسط معامل فاقد البئر يساوي $4.55 \times 10^{-7} d^2/m^5$ كما في الجدول (3.4).

- قيمة فاقد البئر CQ^2 خلال المرحلة الثانية والثالثة من الضخ تتراوح بين 0.53 إلى 0.93 متر على التوالي جدول (3.4).

- بطريقة أخرى تم رسم القيم المحسوبة لـ s_w/Q مقابل القيم المقابلة لـ Q على ورق الرسم البياني الحسابي Arithmetic paper شكل (3.7). ينتج من مخطط البيانات هذا خطاً مستقيماً بميل يساوي C (ثابت خسارة البئر) والتقاطع مع المحور الرأسي يساوي B (ثابت خسارة الخزان الجوفي). تم اشتقاق قيم $C = 4.5 \times 10^{-7} d^2/m^5$

وهي قريبة من القيمة التي تم الحصول عليها بواسطة المعادلة (3.19). ومن نفس

الشكل أيضاً يتم حساب معامل فاقد التكوينة بقيمة $B = 2.9 \times 10^{-3} d/m^2$.

- قيمة فاقد التكوينة BQ لكل من المرحلة الثانية والثالثة من الضخ تتراوح ما بين

3.13 و 4.13 متر على التوالي جدول (3.4).

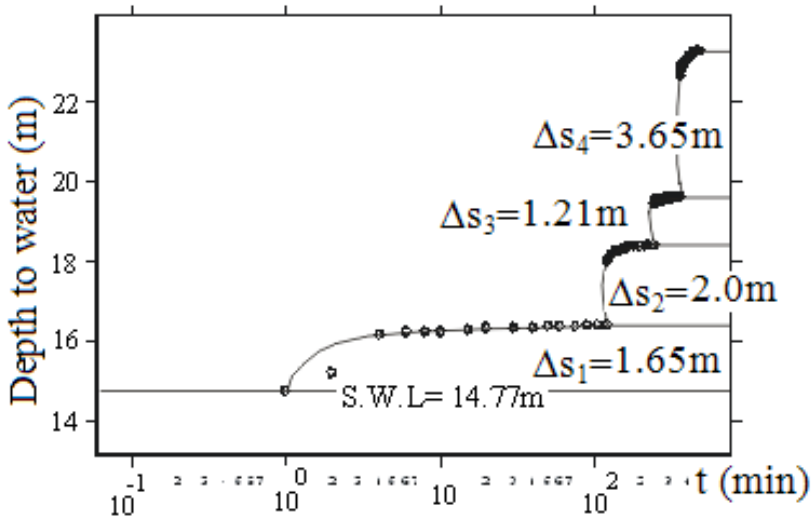
- متوسط فعالية البئر الجوفي يساوي 83.6%.

- متوسط عدم كفاءة البئر Inefficiency خلال مراحل الضخ المختلفة هو: 16.4%.

جدول (3.3):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة

القدرة النوعية ومقلوب القدرة النوعية.

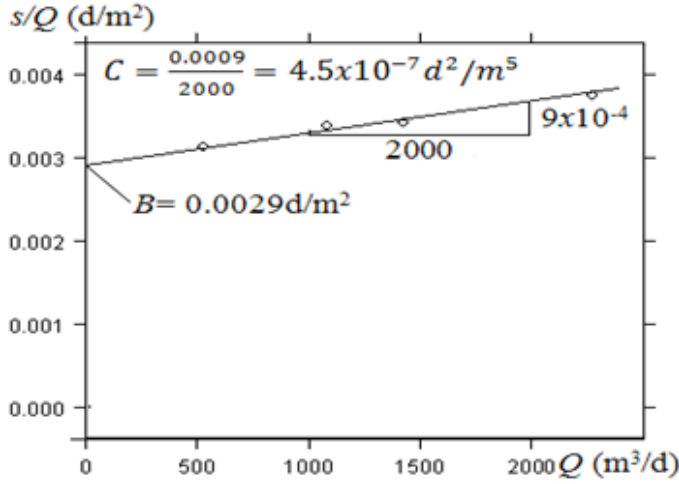
المرحلة	$Q (m^3/d)$	$\Delta Q (m^3/d)$	$s_w (m)$	$\Delta s_w (m)$	$s_w/Q (d/m^2)$	$Q/s_w (m^2/d)$
1	529.6	529.6	1.65	1.65	0.00312	321.0
2	1080.0	550.4	3.65	2.00	0.00338	295.9
3	1425.6	345.6	4.86	1.21	0.00341	293.3
4	2272.3	846.7	8.51	3.65	0.00375	267.0
المتوسط					0.00342	294.3



الشكل (3.6):- منحنى الانخفاض التراجعي في مستوى سطح الماء مع زمن الضخ.

جدول (3.4):- يوضح تحليل نتائج الضخ المتدرج.

E_w %	$BQ(m)$	$CQ^2(m)$	$B(d/m^2)$	$C(d^2/m^5)$	$s_w(m)$	$Q(m^3/d)$	المرحلة
			2.9×10^{-3}	4.6×10^{-7}		529.6	1
85.5	3.13	0.53		-1.1×10^{-7}	3.66	1080.0	2
81.6	4.13	0.93	2.9×10^{-3}	6.7×10^{-7}	5.06	1425.6	3
				4.55×10^{-7}		2272.3	4
83.6							المتوسط



الشكل (3.7):- منحنى الانخفاض النوعي (مقلوب القدرة النوعية) مع زيادة تصريف البئر.

للتأكد من صحة كفاءة البئر يمكن الاستعانة بالقدرة النوعية Q/s_w في حساب كفاءة البئر، وفي هذا المثال كانت كفاءة البئر خلال المرحلة الثانية والثالثة من الضخ على التوالي كما هو موضح بالمعادلة أدناه.

$$E_{w2} = \frac{1080/3.66}{1080/3.13} \times 100 = \frac{295.1}{345} \times 100 = 85.5\%$$

$$E_{w3} = \frac{1425.6/4.86}{1425.6/4.13} \times 100 = \frac{293.3}{345.2} \times 100 = 85.0\%$$

$$E_{av.} = \frac{85.5 + 85.0}{2} = 85.3\%$$

لحسن الحظ وصلت أغلب خطوات الضخ التدريجي في هذا المثال إلى الانخفاض الثابت قبل البدء في معدل الضخ التالي. ومن المرجح أن ينتج من هذه الخطوات الثابتة تقديراً مناسباً لاختبار الهبوط التدريجي الخاص بقيمة المعامل C ، لأن الانحدار المنبسط Gentle سيجعل من قيم التغير في الهبوط Δs_w مساوي للقيمة الفعلية. وفي

هذه الحالة يجب أن تكون كمية الضخ المقترحة مساوية لاختبار الهبوط التدريجي لـ C والبالغ $4.6 \times 10^{-7} d^2/m^5$ ، والذي يشير إلى تدهور طفيف وانسداد بالبئر عبر والتون 1962 جدول (3.1).

الفصل الرابع

اختبار الضخ الثابت

Constant Pumping Test

4.1 تجربة اختبار الضخ المستمر:- Constant drawdown pumping test

تفيد هذه التجربة في تقدير فعالية البئر دون الحاجة إلى إجراء اختبار الهبوط المتدرج. وللتعبير عن مدى كفاءة وصلاحية البئر ومدى الفقد الحاصل بها هنالك عدد من الطرق البارامترية التي توضح الحالة الهيدروليكية للبئر بالخرانات الجوفية المغلفة تغليف كامل، ومن أهم هذه الطرق ما يلي:-

4.2 طريقة الهبوط النظري والفعلي في منسوب الماء:-

تعرف بطريقة جاكوب الثانية والتي تعطي العلاقة ما بين المسافة والهبوط في المنسوب، وهي تعتمد على الرسم البياني لأبعاد المسافة الفاصلة ما بين بئر الضخ وآبار المراقبة مقابل الانخفاض في المنسوب. وعملياً يتم قياس الانخفاض في المنسوب نظرياً بالبئر المنتجة وذلك خلال إجراء اختبار الخزان الجوفي عند الزمن المحدد t والضخ بمعدل ثابت Q ، وبهذه الكيفية يتم تقدير فواقد البئر CQ^2 من المعادلة (4.1) وذلك خلال إيجاد الفرق ما بين الانخفاض النظري في منسوب المياه داخل بئر الضخ s_T Theoretical والانخفاض الحقيقي في المنسوب بالخزان الجوفي s_a Actual، وبالتحديد بالقرب من مصافي البئر شكل (2.2)، ورياضياً يحسب على النحو التالي:-

$$Well\ loss\ CQ^2 = s_T - s_a \dots \dots \dots (4.1)$$

يتم تطبيق تجربة اختبار الضخ المستمر بالخرانات المحصورة في حالة ثبات مستوى الماء الجوفي وفي حالة المنسوب المتحرك. ومن هذا الاختبار يمكن الحصول على عاملين أساسيين، ومنهما يمكن التمييز بين الهبوط في مستوى سطح الماء بالخزان الجوفي والبئر كما يلي:-

- 1- الهبوط التدريجي النظري في مستوى سطح الماء داخل البئر وذلك من خلال انسياب الماء نحو البئر عبر فتحات التكوينة الجيولوجية ومروراً بنطاق الحصى والمصافي ومنها إلى خارج البئر عبر المضخة، والذي يعرف بفقد البئر.
 - 2- الهبوط الفعلي في مستوى سطح الماء والنتائج عن فقد الطبقة الحاملة للماء عبر مصافي البئر، والذي يعرف بفقد التكوينة الجيولوجية.
- عند تطبيق هذه الطريقة لابد أن نفترض الآتي:-
- أن يكون الخزان محصور وممتد إلى ما لانهاية.
 - أن تكون الطبقة المائية متجانسة ومتساوية الخواص في جميع الاتجاهات.
 - أن يكون منسوب الماء الخيالي أفقياً.
 - أن يضخ الماء من الخزان بمعدل ثابت.
 - أن يتم تغليف البئر المنتجة كلياً حتى تكون حركة المياه الجوفية أفقياً.
 - المياه التي يتم ضخها من الخزان يجب أن لا تعود إلى الخزان مرة أخرى.
 - يجب أن يكون قطر البئر صغير وبالتالي تكون كمية المياه المنتجة من البئر قليلة.
- كيفية تطبيق الطريقة:-
- على ورقة رسم شبه لوغاريتمي وقع القيم الخاصة بأعلى انخفاض في كل بئر مراقبة/ آبار المراقبة رأسياً على مقياس رسم حسابي مقابل المسافة أفقياً على مقياس رسم لوغاريتمي وهي المسافة التي تبعتها آبار المراقبة عن بئر الضخ.
 - أرسم أقرب خط مستقيم يجمع قيم الانخفاض في مناسيب آبار المراقبة المختلفة.
 - مد الخط المستقيم حتى يصل إلى المسافة التي تمثل نصف قطر تأثير بئر الضخ، والذي يُظهر الهبوط الحقيقي في الخزان الجوفي خارج البئر.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الرأسي (الصادي) عند النقطة التي تكون فيها قيمة المسافة من بئر الضخ تساوي واحد قدم وعندها نقرأ قيمة الانخفاض الفعلي في المنسوب بالخزان الجوفي.

- يُظهر تقاطع الخط المستقيم مع نصف قطر تأثير بئر الضخ انخفاضاً فعلياً s_a في فعالية البئر يقدر بنسبة 100%، وفي هذه الحالة تكون النتيجة صالحة لطبقة المياه الجوفية المحصورة فقط وذلك عندما يتم وضع المصافي على كامل سماكة الخزان الجوفي، وأيضاً هذه النتيجة عادة ما تكون أقل من القيم النظرية للانخفاض في بئر الضخ s_T .

- أقرأ قيمة الانخفاض في المنسوب رأسياً على مقياس الرسم الحسابي، هذه القيمة تمثل الانخفاض النظري في منسوب المياه داخل البئر وبالمناطق المتاخمة Adjacent لمصافي البئر المنتج s_T .

من هذه التجربة يمكن مقارنة السحب النظري للبئر التي تم ضخها مع السحب الحقيقي والمحسوب بالتكوينية الجيولوجية (داخل آبار المراقبة) وذلك من خلال امرار الخط المستقيم على الرسم التخطيطي لأبعاد المسافة أفقياً مقابل الانخفاض في منسوب الماء رأسياً إلى النقطة التي ينتهي فيها نصف قطر التأثير بالبئر أفقياً عند الوجه الخارجي للبئر شكل (4.1).

- أحسب كفاءة البئر من مقدار التغير في الانخفاض في المنسوب الحقيقي بالخزان الجوفي إلى الانخفاض في المنسوب النظري داخل البئر كما جاء في المعادلة (2.4)، راجع الفصل الثاني.

يناقش هذا الفصل طريقة تقدير كفاءة البئر بطريقتين هما:-

- قياس الانخفاض في مستوى سطح الماء ببئر الضخ مقابل المسافة من حافة البئر بمقدار واحد قدم.

- الزاوية التي يصنعها الانخفاض في المنسوب خارجياً مع حافة البئر على بعد واحد قدم وداخلياً بالبئر المنتج، وهي بالتفصيل كما يلي:-

أولاً: طريقة قياس مستويات الانخفاض في مناسيب المياه

يحتاج تطبيق هذه الطريقة أن يكون لدينا على الأقل ثلاثة آبار مراقبة وأن تتم التجربة في زمن واحد. وتعتمد هذه التجربة عند تطبيقها على مستويات الانخفاض ببئر الضخ والخزان الجوفي وبالتحديد جوار بئر الضخ مباشرة وهي المنطقة المتاخمة أو بالقرب من مصافي البئر المنتج.

مثال (4.1):-

عند التنبؤ بأن الانخفاض في منسوب الماء يعادل 45 قدم على بعد واحد قدم من بئر الضخ. فما هو مقدار الانخفاض الداخلي للبئر مع افتراض أن كفاءة البئر 70%.

الحل:-

$$s_a = 45 \text{ ft} \quad E_w \% = 70\%$$

$$s_T = \frac{s_a}{(E_w/100)} = \frac{45}{70} \times 100 = 64.3 \text{ ft}$$

مثال (4.2):-

ثلاثة آبار مراقبة تم حفرها على مسافات مختلفة الأبعاد من بئر الضخ، وعند ضخ البئر المنتجة تم قياس الانخفاض في المنسوب بهذه الآبار الثلاثة جدول (4.1)، وعند قياس الانخفاض النظري في المنسوب داخل بئر الضخ وجد أنه 26 قدم، وفعلياً الانخفاض في المنسوب بالخزان الجوفي بالمنطقة المتاخمة لمصافي البئر حوالي 22.3 قدم. أحسب الآتي:-

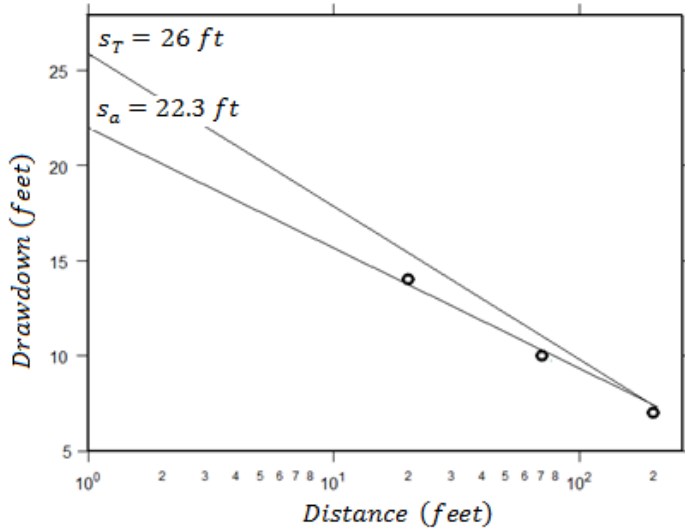
- فواقد البئر.

- كفاءة البئر.

جدول (4.1):- يوضح المعلومات الفنية لثلاث آبار مراقبة.

بئر المراقبة	الانخفاض في المنسوب (قدم)	المسافة (قدم)
1	14	20
2	10	70
3	7	200

الحل:-



شكل (4.1):- يوضح امتداد مسافة انحدار السحب خلف مسافة تقدر بحوالي واحد قدم من بئر الضخ.

$$s_T = 26 \text{ ft} \quad s_a = 22.3 \text{ ft}$$

- فاقد الخزان الجوفي

$$BQ = s_a = 22.3 \text{ ft}$$

- الانخفاض الكلي في المنسوب

$$s_w = 26.0 \text{ ft}$$

- فواقد البئر

الفرق في المسافة ما بين الانخفاض النظري والفعلي

$$Well\ loss\ CQ^2 = s_T - s_a = 26.0 - 22.3 = 3.7\ ft$$

- كفاءة البئر الجوفي

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{22.3}{22.3 + 3.7} \times 100 = 85.8\%$$

ثانياً: طريقة الزاوية:-

تعتبر من الطرق الجديدة التي يدرسها هذا الكتاب، وهي تعتمد على مستويات الانخفاض ببئر الضخ والبئر التخيلية وعلى المسافة الفاصلة بينهما عند أي نقطة s_x بالخران الجوفي وبالتحديد جوار بئر الضخ مباشرة وهي المنطقة المتاخمة لمصافي البئر.

يحتاج تطبيق هذه الطريقة إتباع الخطوات التالية:-

- صل نقاط مناسيب المياه بآبار المراقبة بخط مستقيم ينتهي عند حافة بئر الضخ.
- مد خط مستقيم آخر يبدأ من منسوب أبعد بئر مراقبة وينتهي عند منسوب المياه داخل بئر الضخ.
- قس زاوية سقوط المياه داخل بئر الضخ وهو مؤشر يوضح فاقد البئر.
- قس زاوية سقوط المياه بالخران الجوفي وبالتحديد جوار حافة بئر الضخ وهو مؤشر يوضح فاقد الخزان الجوفي.
- أحسب كفاءة البئر من النسبة المئوية لقيمة زاوية سقوط المياه بالخران الجوفي على زاوية سقوط المياه ببئر الضخ كما موضح بالمعادلة أدناه.

$$Well\ efficiency\ E_w\% = \frac{\sphericalangle s_a}{\sphericalangle s_T} \times 100 \dots \dots \dots (4.2)$$

مثال (4.3):-

تم تقدير الهبوط (السحب) في نهاية فترة الاختبار بحوالي 22 قدم، وكان الهبوط النظري المقاس داخل البئر 51 قدم. أحسب كفاءة البئر.

الحل:-

$$E_w \% = \frac{22}{51} \times 100 = 43.1\%$$

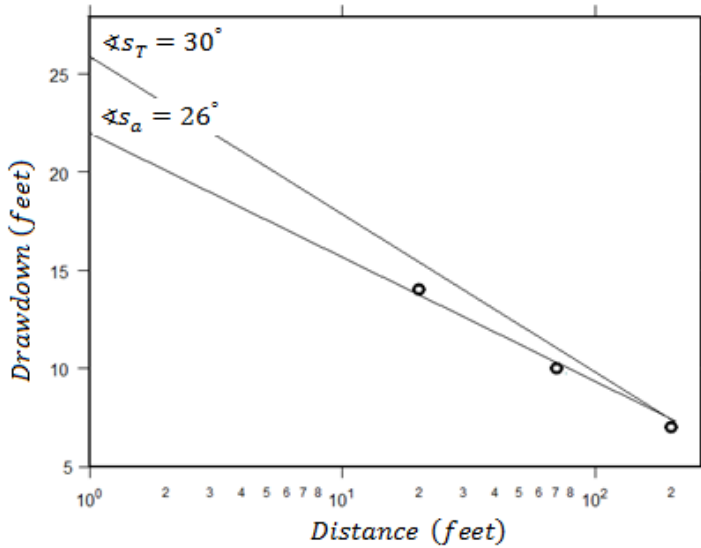
تبلغ الكفاءة التقديرية 43.1 بالمائة.

مثال (4.4):-

من معلومات المثال (4.2) بالجدول (4.1) المطلوب تحديد كفاءة البئر.

الحل:-

لتقدير كفاءة البئر نحسب زاوية سقوط المياه بالخران الجوفي بالقرب من حافة البئر وزاوية سقوط المياه داخل البئر كما موضح بالشكل أدناه.



شكل (4.2):- يوضح قيمة الزاوية الحاصرة بين الهبوط في المنسوب ببئر الضخ وآبار المراقبة الثلاث.

قيمة زاوية الهبوط الفعلي 26°

قيمة زاوية الهبوط النظري 30°

من النسبة المئوية لقيمة الزاوية المحصورة بين s_a و s_T يمكن تقدير كفاءة البئر على النحو التالي:-

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{s_a^\circ}{s_T^\circ} \times 100 = \frac{26^\circ}{30^\circ} \times 100 = 86.7\%$$

الفصل الخامس

فوائد الخزان الجوفي

Aquifer Losses

characteristics of the aquifer

يقدم هذا الفصل طرقاً بارامترية جديدة تهتم بتحديد الحالة الهيدروليكية للبئر وبالتحديد حول مصفاة البئر وذلك بغرض معرفة الحالة الراهنة للبئر. ويحتاج تحديد فاقد الخزان الجوفي إلى الاهتمام بالخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي والتي فيها يكون التدفق نحو البئر رقائقياً ولكنه أحياناً قد يتأثر ببعض الظروف الخاصة بالحفر الجوفي مثال اختراق البئر للخزان الجوفي اختراقاً جزئياً. ومن هذه الخصائص يمكن تقدير الكفاءة الهيدروليكية للبئر عند تطبيق الطرق التالية:-

1- طريقة الزاوية

2- طريقة نقطة الانفلات

3- طريقة ارتفاع عمود الماء

Angle method**5.2:- طريقة الزاوية:-**

أهم ما يميز هذه الطريقة هو امكانية تقدير كفاءة البئر عند كل مرحلة ضخ على حده وتقييم ومقارنة الحالة الراهنة للبئر في كل مرحلة ضخ. وفي هذه الطريقة يتم قياس الزاوية عند نقطة تلاقي بيانات فاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية الخيالية مع المحور الأفقي لتصريف البئر عند نقطة تلاقي المحورين الأفقي والرأسي عند النقطة صفر. وتشير قيمة زاوية فاقد الخزان الجوفي إلى الحالة الراهنة للبئر - كفاءة البئر، فإذا كانت قيمة هذه الزاوية كبيرة فهو مؤشر يدل على سيادة التدفق الرقاقي وقلة التدفق المضطرب وأن البئر في أحسن حالتها وأنها تتمتع بكفاءة عالية، والعكس تقل كفاءة البئر عند زيادة قيمة زاوية فقد البئر، وهي الزاوية المحصورة بين خط مسار فاقد الخزان الجوفي وخط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب، وعندما تفوق هذه الزاوية

قيمة زاوية فاقد الخزان الجوفي ففي هذه الحالة يسود عامل الاضطرابات ويتفوق على العامل الرقائقي حول محيط البئر والذي بسببه تقل كفاءة البئر.

لتطبيق هذه الطريقة نتبع الخطوات التالية:-

1- وقع قيم الضخ المتدرج أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم كل من فاقد الخزان الجوفي والانخفاض في المنسوب رأسياً على نفس المقياس السابق.

2- صل نقاط فاقد الخزان الجوفي والانخفاض في المنسوب كل على حده بخط مستقيم ينتهي كل منهما عند النقطة الصفر وهي نقطة تلاقي المحورين السيني والصادي شكل (5.1).

3- قس زاوية فاقد الخزان الجوفي α_{BQ} ، وهي زاوية محصورة بين الخط الأفقي لقيم تصريف البئر Q مع خط مسار فاقد طبقة المياه الجوفية BQ .

- قس زاوية فواقد البئر α_{CQ^2} وهي زاوية محصورة بين كل من خط فاقد الخزان الجوفي وخط الانخفاض في المنسوب s_w .

4- أحسب كفاءة البئر من قيمة زاوية فاقد الخزان الجوفي مضروباً في مائة ومقسوماً على قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (مجموع كل من زاويتي فواقد البئر والخزان الجوفي) كما في المعادلة التالية:-

$$E_w = \frac{\alpha_{BQ}}{\alpha_{BQ} + \alpha_{CQ^2}} \times 100 = \frac{\alpha_{BQ}}{\alpha_{s_w}} \times 100 \dots \dots \dots (5.1)$$

مثال (5.1):- من معلومات بيانات البئر بالجدول أدناه. المطلوب تحديد كفاءة البئر.

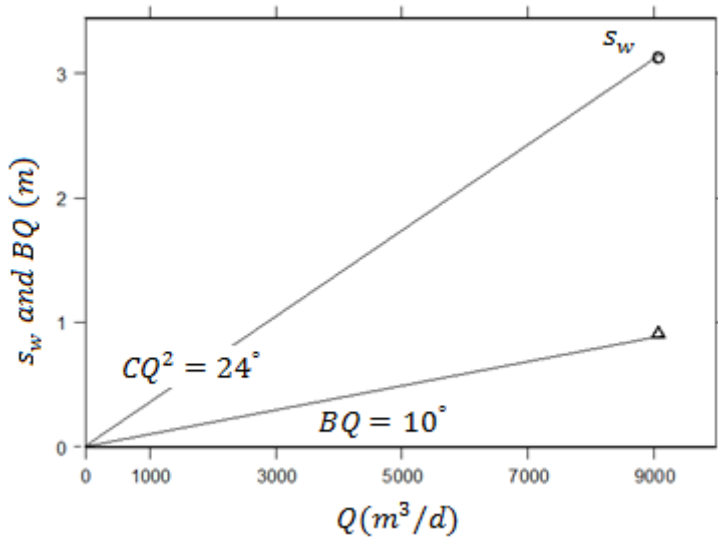
جدول (5.1):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة

الانخفاض النوعي، فواقد الخزان الجوفي وفقد البئر (المصدر: Yosef Aregaw (2018).

$E_w\%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	$C(d^2$ / m^5)	$B(d$ / m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
29.1	2.06	0.91	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.13	9072	1
28.9	2.69	1.04	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.6	10368	2
24.4	3.40	1.17	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.1×10^{-4}	4.8	11664	3
23.0	4.31	1.31	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-4}	5.7	13132.8	4

الحل:-

مرحلة الضخ الأولى:



شكل (5.1):- يوضح قيمة فاقد الخزان الجوفي والهبوط عند مرحلة الضخ الأولى.

قيمة زاوية خسارة التدفق الرفائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 24^\circ$$

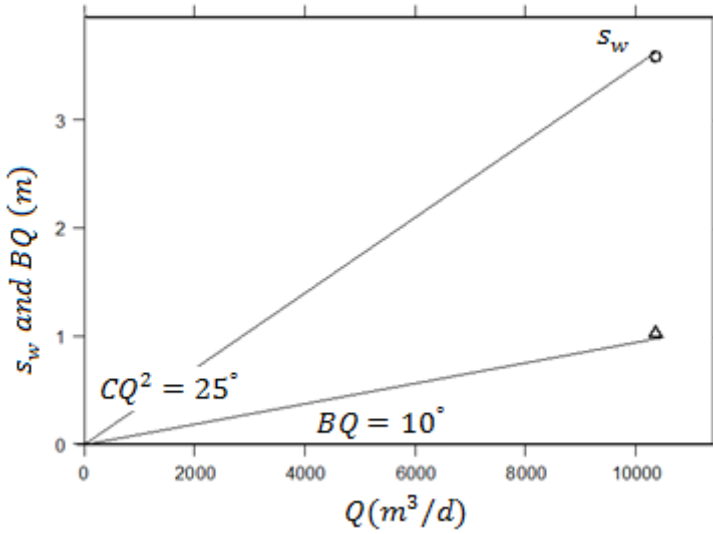
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (الفواقد الكلية)

$$\text{Total losses } \angle s_w = 34^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{10^\circ}{34^\circ} \times 100 = 29.4\%$$

مرحلة الضخ الثانية:



شكل (5.2):- يوضح قيمة فاقد الخزان الجوفي والهبوط عند مرحلة الضخ الثانية.

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 25^\circ$$

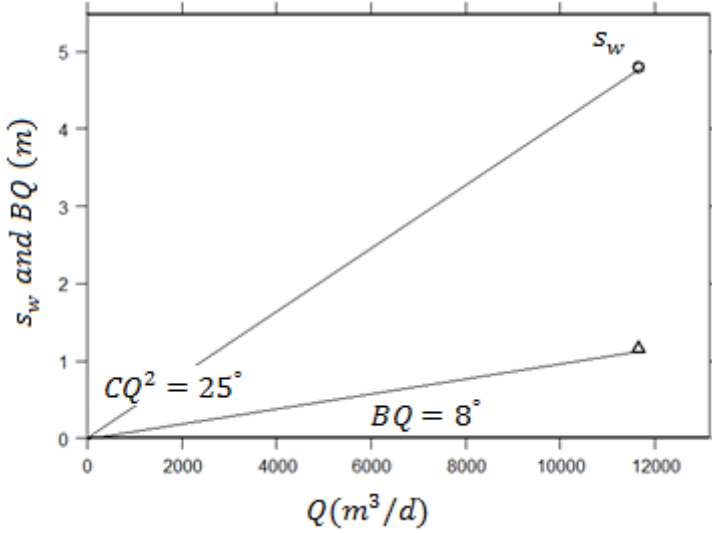
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (الفواقد الكلية)

$$\text{Total losses } \angle s_w = 35^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{10^\circ}{35^\circ} \times 100 = 28.6\%$$

مرحلة الضخ الثالثة:



شكل (5.3):- يوضح قيمة فاقد الخزان الجوفي والانخفاض الكلي في المنسوب عند مرحلة الضخ الثالثة.

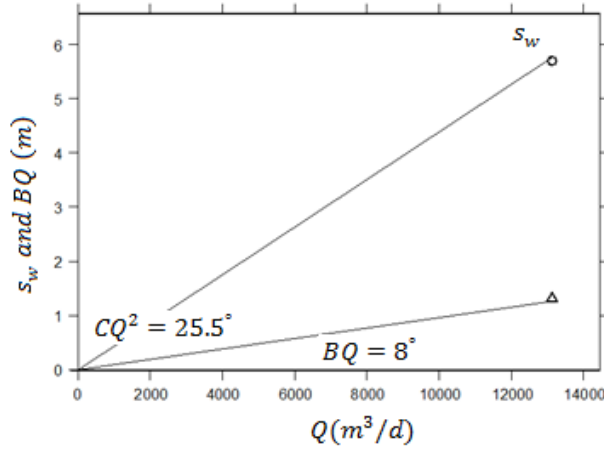
قيم فاقد الخزان الجوفي، فواقد البئر والانخفاض الكلي في المنسوب على التوالي.

$$BQ = 8^\circ \quad CQ^2 = 25^\circ \quad s_w = 33^\circ$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{8^\circ}{33^\circ} \times 100 = 24.2\%$$

مرحلة الضخ الرابعة:



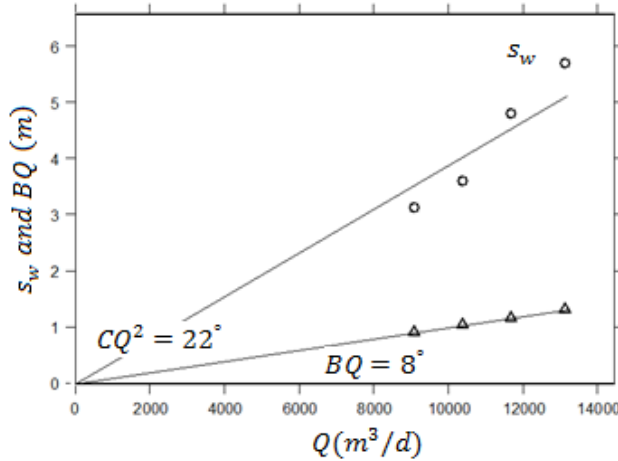
شكل (5.4):- يوضح قيمة فاقد الخزان الجوفي والهبوط عند مرحلة الضخ الرابعة.

$$BQ = 8^\circ \quad CQ^2 = 25.5^\circ \quad s_w = 33.5^\circ$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{8^\circ}{33.5^\circ} \times 100 = 23.8\%$$

متوسط جميع مراحل الضخ:



شكل (5.5):- يوضح قيمة فاقد الخزان الجوفي والهبوط عند جميع مراحل الضخ.

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 8^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 22^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (الفواقد الكلية)

$$\text{Total losses } \angle s_w = 30^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{8^\circ}{30^\circ} \times 100 = 26.7\%$$

من تحليل بيانات اختبار أداء هذه البئر وجد أن الكفاءة تقل تدريجياً مع زيادة معدلات تصريف البئر جدول (5.1)، وعليه يمكن تقييم الحالة الراهنة البئر من خلال الرجوع إلى قيمة زاوية خسارة الخزان الجوفي (التدفقات الخطية). وفي هذا المثال نجد أن قيمة زاوية خسارة الخزان الجوفي أقل مقارنة بزاوية فقد البئر وبنسبة تصل إلى 36.4%، وفي هذه الحالة فإن متوسط خسائر البئر خلال مراحل الضخ المختلفة تقدر بحوالي 73.3% من إجمالي الخسائر في البئر مباشرة بعد البناء والتشييد. ويشير متوسط كفاءة البئر 26.7% إلى أن أعمال تطوير البئر لم تتم بشكل صحيح.

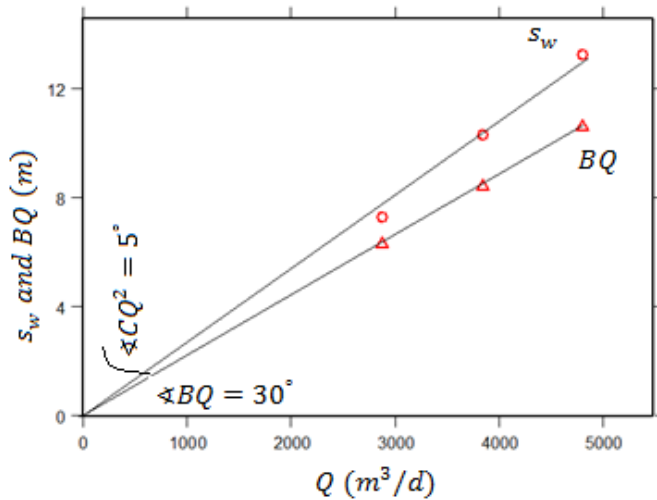
مثال (5.2):-

تم ضخ بئر جوفي على ثلاث مراحل مختلفة التصريف وتم رصد معلومات الضخ بالجدول (5.2)، فكانت قيمة الانتقالية والسعة النوعية 725.4 و 349 متر مربع لكل يوم على التوالي. المطلوب تعيين كفاءة البئر.

جدول (5.2):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة القدرة النوعية ومقلوب القدرة النوعية هذا بالإضافة إلى فواقد الخزان الجوفي وفقد البئر (المصدر: 2012 Maged El Osta).

$E_w \%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	C (d^2/m^5)	B (d/m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
88.7	0.83	6.3	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	7.3	2880	1
84.8	1.5	8.4			2.7×10^{-3}	10.3	3840	2
82.2	2.3	10.6			2.8×10^{-3}	13.25	4800	3

الحل:-



شكل (5.6):- متوسط بيانات قيم الزوايا خلال مراحل الضخ المختلفة.

$$BQ = 30^\circ \quad CQ^2 = 5^\circ \quad s_w = 35^\circ$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{30^\circ}{35^\circ} \times 100 = 85.7\%$$

من تحليل بيانات هذا الاختبار تم العثور على متوسط إجمالي الخسائر في البئر مباشرة بعد البناء والتشييد والتي وصلت إلى حوالي 14.0% ، وفي نفس السياق يشير متوسط كفاءة البئر 86.0% إلى أن أعمال تطوير البئر تمت بشكل صحيح وسليم وهو خلاف ما تم من تطوير في البئر السابق.

5.3 طريقة نقطة الانقلاب:- Inflection point

في كثير من الأحيان قد تتغير طبيعة الرسم البياني للانخفاض الكلي في المنسوب والخاص بتسلسل مراحل الضخ وذلك عند نقطة معينة تدعى بنقطة الانفلات (A)، والتي عندها يفترق خط التدفق الرقائقي عن خط التدفق المضطرب شكل (5.7). وعليه يمكن تفسير وتقسيم رسومات نتائج اختبار الضخ المتدرج إلى المراحل التالية:-
- التدفق الرقائقي عبر وسط الخزان الجوفي.
- التدفق المضطرب للمياه في منطقة البئر.

تحكم أرقام رينولد تفاصيل لحظة انتقال سريان المياه من التدفق الصفائحي إلى المضطرب، وتتراوح أرقام رينولد من 2.3 إلى 10، فعندما يكون رقم رينولد أقل من 2.3 يكون التدفق صفائحي ولكن عندما يفوق رقم رينولد الرقم 4.0 عندئذٍ نتوقع أن يكون التدفق مضطرب.

يتم تحديد نقطة الانفلات من نقطة ما بخط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب، بحيث تكون هذه النقطة مقابلة لآخر قراءة بخط مسار فاقد الخزان الجوفي (أكبر انخفاض ممكن في مستوى الماء بالخزان الجوفي - BQ_{max}). ومن نقطة الانفلات يستطيع الجيولوجي تصنيف الفواقد إلى ثلاثة أنواع حسب معادلة جاكوب (3.7) وكمية الضخ. وعملياً أثناء التدفقات القليلة عبر مصفاة البئر قد يكون تدفق المياه رقائقياً في كل من الخزان الجوفي وفي البئر، والعكس قد يحدث فقد البئر المضطرب في مراحل الضخ الأعلى. ووفقاً لهذا الافتراض يتم إجراء الحسابات باستخدام معادلات مختلفة

للعالم جاكوب. من الناحية العملية، يمكن فقط تحديد تأثير خسائر البئر غير الخطية على الكفاءة، لأنه نادراً ما يمكن أخذ معامل فقدان الخزان الجوفي الخطي B_1 و معامل خسارة البئر الخطي B_2 في الاعتبار بشكل منفصل إلا في بعض الحالات النادرة. وعموماً، تتسبب المقاومة الهيدروليكية الناتجة عن التدفق الصفائحي أو المضطرب في طبقة المياه الجوفية وفي منطقة البئر في هبوط منسوب الماء. وفي هذا الشأن أعطى جاكوب معادلة الهبوط في بئر تم ضخها كما يلي:-

$$s_w = B(r_w, t)Q + CQ^2 \dots \dots \dots (5.2)$$

$$B(r_w, t) = B_1(r_w, t) + B_2 \dots \dots \dots (5.3)$$

$$B_2Q = B(r_w, t)Q - B_1(r_w, t)Q \dots \dots \dots (5.4)$$

حيث أن:-

$$B_1(r_w, t)Q = \text{فوائد الخزان الجوفي الخطية.}$$

$$B_2Q = \text{فوائد البئر الخطية.}$$

$$C = \text{معامل خسارة البئر غير الخطي.}$$

$$CQ^2 = \text{خسارة البئر غير الخطية.}$$

$$B_2Q + CQ^2 = \text{فوائد البئر الكلية، وهي تساوي فوائد البئر الخطية مضاف إليها فوائد البئر غير الخطية.}$$

$$r_w = \text{نصف قطر تأثير البئر.}$$

خطوات تطبيق الطريقة:-

- وقع بيانات كمية الضخ لكل مرحلة ضخ أفقياً مقابل قيم خسارة الخزان الجوفي والانخفاض الكلي في المنسوب رأسياً على مقياس رسم حسابي.

- صل بيانات خسارة الخزان الجوفي B_1Q بخط مستقيم يمر بأغلب أو كل النقاط بحيث يبدأ من نقطة تقاطع المحورين (السني والصادي) وينتهي عند أقصى قيمة للتدفق الرقائقي.

- صل نقاط الانخفاض الكلي في المنسوب بخط مستقيم يبدأ من نقطة تلاقي المحورين وينتهي عند نقطة معينة تدعى نقطة الانفلات أو الانحراف (A) Inflection point وهي النقطة التي يحصل فيها التمايز ما بين السريان الخطي والسريان غير الخطي، وتمثل هذه النقطة: قيمة التصريف الأمثل للبئر الذي يجب أن تضخ به البئر وأقصى خسارة للخزان الجوفي BQ .

- من نقطة الانفلات يبدأ الخط ينحرف عن مساره في اتجاه خلاف المسار السابق، ليمثل بداية السريان المضطرب CQ^2 الذي يمتد إلى نهاية عملية الضخ وذلك على استقامة مغايرة تماماً لاستقامة خط التدفق الخطي شكل (5.7).

من ناحية ثانية يمكن تقدير كفاءة البئر من مجمل الفوائد الثلاثة التي اقترحها جاكوب في المعادلة (3.7 و 5.4) والتي منها يتم حساب فقدان الخزان الجوفي الخطي B_1Q وخسارة البئر الخطية B_2Q فضلاً عن خسارة البئر غير الخطي CQ^2 وذلك في حالة عدم ثبات الجريان بالخزان المحصور، وفي هذه الحالة يمكن التعبير عن الهبوط في البئر التي تخترق كامل سمك الخزان مع إهمال مكونات فاقد البئر لأنها قليلة ولا تكاد تذكر.

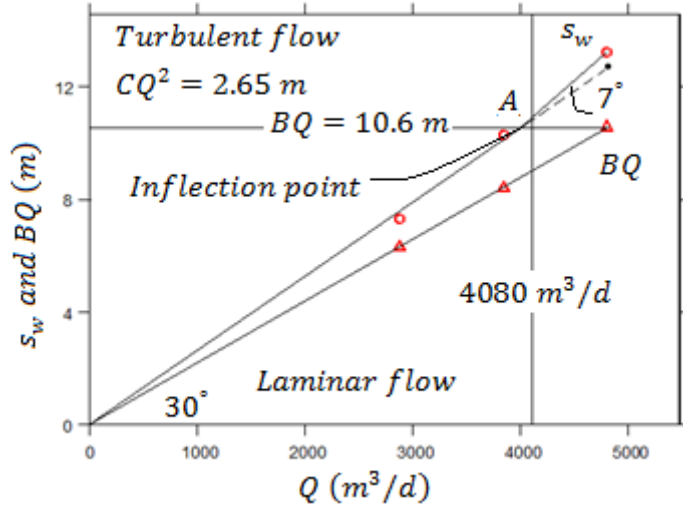
من أهم مميزات هذه الطريقة أنها توضح أدق تفاصيل لحظة الانتقال من التدفق الصفائحي إلى التدفق المضطرب، وهو يعني طابع تدفق المياه الخطي عبر وسط الخزان الجوفي والتدفق المضطرب - غير الخطي للمياه في منطقة البئر حول محيط المصفاة وداخل البئر، حيث تؤدي زيادة سرعة التدفق إلى حدوث اضطراب في

منطقة البئر مما يزيد بدوره من المقاومة الهيدروليكية. وقد تتسبب هذه الظروف في زيادة تكاليف ضخ المياه وكذلك في تسريع تقادم مصفاة البئر. ملاحظة:-

- خلال الفترات الأولى من التجربة وبالتحديد عند الضخ بكميات تصريف قليلة تنعدم فواقد البئر بحيث تكون السيادة فقط لخسائر طبقة المياه الجوفية. - في الفترات الأخيرة من الضخ ومع استمرار زيادة كمية الضخ تبدأ فواقد البئر وبالتحديد عند نقطة الانفلات (A) والتي فيها ينحرف مسار خط السريان غير الخطي لفواقد البئر عن امتداد خط التدفق الرقائقي وذلك حسب الزيادة المفرطة في كمية الضخ والتي تؤدي بدورها إلى زيادة مفاجئة في الخسائر الهيدروليكية لمصفاة البئر. مثال (5.3):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول (5.2)، المطلوب تقدير كفاءة البئر والسعة النوعية. الحل:-

من الشكل أدناه نقطة الانفلات من خط الانخفاض الكلي في المنسوب تقابلها أعلى قيمة لفاقد الخزان الجوفي وهي حوالي 10.6 متر وبقيمة تصريف 4080 م³/يوم، مما يعني طابع تدفق المياه الخطي عبر وسط الخزان الجوفي، أما التدفق المضطرب للمياه فهو الآخر سوف يبدأ مباشرة بعد هذه المرحلة وعند استمرار عملية الضخ.



شكل (5.7):- نقطة الانفلات عند التصريف 4080 متر مكعب/ يوم والهبوط بمقدار 10.6 متر.

من الشكل أعلاه تحسب كفاءة البئر والسعة النوعية من المعلومات التالية:-

$$\text{Laminar loss } BQ = 10.6 \text{ m}$$

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{10.6}{10.6 + 2.65} \times 100 = 80.0\%$$

السعة النوعية

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{4800}{13.25} = 362.3 \text{ m}^2/d$$

السعة النوعية عند نقطة الانفلات

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{4080}{10.6} = 385.0 \text{ m}^2/d$$

تم تنفيذ اختبار هذه البئر من خلال عملية الضخ على ثلاثة مراحل مختلفة التصريف، وفيها تم إجراء القياسات من الصفر إلى معدل التدفق الأقصى $Q_{max.} = 4800 \text{ m}^3/\text{d}$ وأظهر التفسير الرسومي لنتائج اختبار الضخ شكل (5.7)، ومن خلال التحليل الإحصائي لنتائج القياسات في المراحل اللاحقة للضخ أنه في ظل قيم $Q = 4080 \text{ m}^3/\text{d}$ و $s_w = 10.6 \text{ m}$ ، توجد علاقة خطية بين Q و s_w . وهذا يشير إلى حدوث تدفق رقائقي عبر وسط الخزان الجوفي، وأن السعة النوعية في هذه المرحلة من الضخ تفوق السعة النوعية عند الضخ بأقصى معدل. ولكن بمجرد تجاوز مرحلة التدفق الرقائقي تغيرت طبيعة الرسم البياني من الخطي إلى الأسّي Exponential مما يعني سيادة الطابع المضطرب لتدفق المياه في المنطقة قرب حافة البئر. بالنسبة للتدفق الرقائقي $Q \leq 4080 \text{ m}^3/\text{d}$ ، والتي فيها يكون معامل المقاومة D هو:-

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{10.6}{4080} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

فيما يختص بالتدفق المضطرب $Q > 4080 \text{ m}^3/\text{d}$ ، والذي فيه تؤخذ المنطقة على معاملات المصفاة للقيم: $B = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$ و $C = 1.0 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$ جدول (5.2)، ومن المعادلة أدناه تم تقدير معامل المقاومة في حالة التدفق المضطرب فكان $2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$ وهو متقارب في القيمة مع معامل المقاومة في حالة التدفق الرقائقي ويعزى السبب إلى أن البئر ذات كفاءة عالية. ومن تحليل بيانات نتائج الضخ بالشكل أعلاه أظهر الاختبار أن البئر تصل إلى معيارها الهيدروليكي الأمثل إذا كان العائد أقل من $4080 \text{ m}^3/\text{d}$ ، بينما يؤدي ضخ المياه بكفاءة أكبر من هذه القيمة إلى تسريع تقادم البئر.

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{13.25}{4800} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

ثانياً: من معادلة جاكوب (3.7) يمكن التمييز بين أنواع خسائر الضخ الثلاثة كما يلي:-

خسارة الخزان الجوفي الخطية B_1Q عند نقطة الانفلات (A)

$$B_1Q = \frac{2.3Q}{4\pi KD} \log \frac{2.25KDt}{r_w^2 S} = \frac{2.3 \times 4800}{\pi \times 4 \times 725.4} \log \frac{2.25 \times 725.4 \times 1}{(0.25)^2 \times 8.3 \times 10^{-5}}$$

$$= 10.2 \text{ m}$$

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 10.2 \text{ m}$$

خسارة البئر الخطية B_2Q

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 10.6 - 10.2 = 0.4 \text{ m}$$

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 10.2 + 0.4 = 10.6 \text{ m}$$

خسارة البئر غير الخطية CQ^2

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

$$\text{Total well loss} = B_2Q + CQ^2 = 0.4 + 2.65 = 3.05 \text{ m}$$

$$\text{Total drawdown } s_w$$

$$= \text{Laminar loss } BQ + \text{Turbulent loss } CQ^2$$

$$= 10.6 + 2.65 = 13.25 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{10.6}{10.6 + 2.65} \times 100 = \frac{1060}{13.25} = 80.0\%$$

ثالثاً: طريقة الزاوية

للتأكد من صحة الطريقة الأولى لابد من الاستعانة بقيم الزوايا بالرسم أعلاه

$$\angle BQ = 30^\circ \quad \angle CQ^2 = 7^\circ \quad \angle s_w = 37^\circ$$

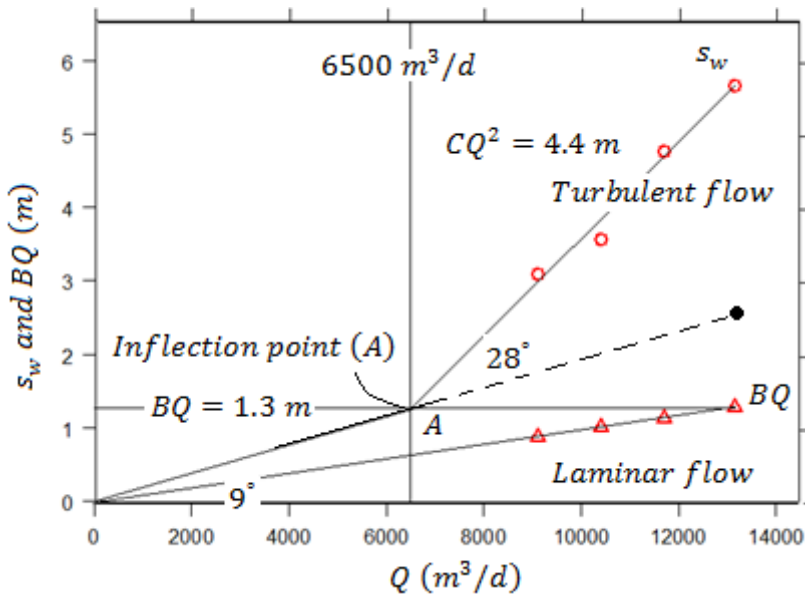
كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{30^\circ}{37^\circ} \times 100 = 81.1\%$$

مثال (5.4):- من معلومات الضخ المتدرج بالجدول (5.1) أحسب كفاءة البئر والسعة النوعية باستخدام طريقة نقطة الانفلات.

الحل:-

نقطة الانفلات من خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب يقابلها فاقد الخزان الجوفي بقيمة انخفاض تعادل 1.3 متر وذلك عند ضخ البئر بمعدل 6500 م³/يوم شكل (5.8).



شكل (5.8) :- نقطة الانفلات عند معدل التصريف 6500 متر مكعب/يوم والهيوط بمقدار 1.3 متر.

$$\text{Laminar loss } BQ = 1.3 \text{ m}$$

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = 5.7 - 1.3 = 4.4 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{1.3}{1.3 + 4.4} \times 100 = \frac{130}{5.7} \times 100 = 22.8\%$$

- السعة النوعية

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{6500}{5.7} = 1140.4 \text{ m}^2/d$$

ثانياً: طريقة الزاوية

كفاءة البئر من قيم الزوايا التالية:-

$$\angle BQ = 9^\circ \quad \angle CQ^2 = 28^\circ \quad \angle s_w = 37^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{9^\circ}{37^\circ} \times 100 = 24.3\%$$

يظهر الشكل أعلاه التفسير الرسومي لنتائج اختبار الضخ، حيث يوضح التحليل الإحصائي لنتائج القياسات في المراحل اللاحقة للضخ أنه في ظل قيم $Q = 6500 \text{ m}^3/d$ و $s_w = 1.3 \text{ m}$ ، توجد علاقة خطية بين Q و s_w . وهذا يشير إلى تدفق رقائقي عبر وسط الخزان الجوفي. ولكن بمجرد تجاوز هذه القيم تغيرت طبيعة الرسم البياني من الخطي إلى الأسّي مما يعني الطابع المضطرب لتدفق المياه في منطقة البئر نتيجة للضخ المفرط. في حالة التدفق الرقائقي ($Q < 6500 \text{ m}^3/d$) والتي فيها يكون معامل المقاومة D هو: $2.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$.

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{1.3}{6500} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

فيما يختص بالتدفق المضطرب ($Q > 6500 \text{ m}^3/\text{d}$)، والذي فيه تؤخذ المنطقة على معاملات المصفاة للقيم: $B = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$ و $C = 2.5 \times 10^{-8} \text{ d}^2/\text{m}^5$ جدول (5.1). وتبلغ قيمة معامل المقاومة في حالة التدفق المضطرب $4.3 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$ وهي أكبر أو ضعف قيمة معامل المقاومة في حالة التدفق الرقائقي ويعزى السبب إلى أن البئر ذات كفاءة قليلة. ومن تحليل بيانات نتائج الضخ بهذه البئر بالشكل (5.8) أظهر الاختبار أن البئر تصل إلى معيارها الهيدروليكي الأمثل إذا كان العائد أقل من $6500 \text{ m}^3/\text{d}$ ، بينما يؤدي ضخ المياه بكفاءة أكبر من هذه القيمة إلى تسريع تقادم البئر.

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{5.7}{13132.8} = 4.3 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

يلاحظ أن نتائج الفترات الأولى من الضخ تتطابق فيها مناسيب المياه بالخزان الجوفي وداخل البئر نتيجة للتدفق الرقائقي ودون حدوث مكونات خسائر مضطربة بالبئر، وذلك في حالة ضخ البئر بمعدل تصريف يقدر بأقل من 6500 متر مكعب لكل يوم وهو الذي يصاحبه انخفاض في المنسوب بقيمة تساوي 1.3 متر. ومع استمرار الضخ وزيادة كمية تصريف البئر تبدأ ظاهرة التدفق المضطرب بالبئر خاصة عند الضخ بمعدل يفوق 6500 م³/يوم، وفيه ينحرف مسار فواقد البئر المضطرب عن امتداد خط التدفق الرقائقي ناحية اليسار وللأعلى وذلك نتيجة للزيادة المفردة والمفاجئة في الخسائر الهيدروليكية لمصفاة البئر والناجمة عن الزيادة الكبيرة في كمية الضخ Over pumping والتي بسببها حدث هبوط مفاجئ في منسوب الماء يقدر بحوالي 3.1 متر شكل (5.8).

وعند مقارنة نتائج الفترات الأولى من الضخ مع نتائج الفترات الأخيرة من الضخ نجد أن الأخيرة تنحرف عن مسار خط التدفق الخطي، ويفسر انحراف هذا الخط عن

مساره عند نقطة الانفلات A على أن البئر يعمل بطاقة جهد أكبر (تصريف كبير) يصاحبه المزيد من الانخفاض في المنسوب، ويرجع ذلك إلى عدم انتظام عملية التغذية بالخران الجوفي أو ربما حدثت خطأ فنية أثناء تصميم البئر. ولتعيين كمية الضخ المثلى التي يقابها أقل انخفاض ممكن في المنسوب عندها يجب تعديل وإعادة تصميم البئر إلى الأفضل وذلك بافتراض عدم وجود مكون للتدفقات المضطربة، وفي هذه الحالة يتم تمديد خط التدفق الرقائقي على استقامة بالخطوط المتقطعة ليمر أسفل خط التدفق المضطرب، وعند تتبع مسار الخط المتقطع للتدفق الخطي حتى النهاية نجد أنه يقابل القيم: $Q = 13132.8 \text{ m}^3/\text{d}$ و $s_w = 2.6 \text{ m}$ وذلك بدلاً عن 5.7 متر وبزيادة تبلغ 3.1 متر قبل تعديل تصميم هذا البئر شكل (5.8)، وتمثل هذه الزيادة 3.1 متر التدفق المضطرب داخل البئر، أما قيمة التصريف فهي نفس القيمة 13132.8 م³/يوم مما يعني أن البئر يحتاج إلى إعادة تأهيل وتعديل في التصميم. وللتأكد من صحة هذا الافتراض نقارن قيمة معامل المقاومة في حالة التدفق الرقائقي عند الضخ بمعدل 6500 متر مكعب لكل يوم والتي تعادل قيمة معامل المقاومة للتدفق المفترض داخل البئر بعد تعديل تصميم البئر وهي كما يلي:-

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{2.6}{13132.8} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الخلاصة:-

من خلال تحليل نتائج المثالين السابقين يمكن تعيين قيمة الضخ المثلى والانخفاض الأمثل في المنسوب مع وجود تباين في نتائج المثالين. ويلاحظ أنه تنحرف قيم الانخفاض الكلي في المنسوب للأعلى ناحية اليسار بعيداً عن خط مسار خسارة الخزان الجوفي وذلك في حالة الضخ بمعدل أكبر، حيث تؤدي زيادة سرعة التدفق إلى حدوث اضطراب في منطقة البئر مما يزيد بدوره من المقاومة الهيدروليكية. ففي

المثال الأول (5.3) يمكن التمييز ما بين خسارة الخزان الجوفي وخسائر البئر عند الضخ بمعدل أكبر من $4080 \text{ m}^3/\text{d}$ ، والذي فيه تصبح كفاءة البئر أقل موثوقية. ومن هذا المثال وجد أن المقاومة الهيدروليكية للتدفق المضطرب بالبئر تتوافق مع قيمة المقاومة الهيدروليكية في حالة التدفق الرقائقي بالخزان الجوفي، هذه النتيجة تدل على أن البئر ذات كفاءة عالية. أما في المثال الثاني (5.4) والذي فيه تكون المقاومة الهيدروليكية للتدفق المضطرب ضعف قيمة المقاومة الهيدروليكية في حالة التدفق الرقائقي، هذه النتيجة تشير إلى أن البئر ذات كفاءة قليلة وهو خلاف ما جاء في المثال الأول. وفي هذه الحالة يمكن التمييز بكل سهولة ما بين خسارة الخزان الجوفي وخسائر البئر. ويعتبر الضخ بمعدل: $Q \leq 6500 \text{ m}^3/\text{d}$ و $s_w = 1.3 \text{ m}$ مثالي وأكثر موثوقية مقارنة مع عمل البئر بطاقة جهد تشغيلية أكبر من $6500 \text{ m}^3/\text{d}$ والذي يصاحبه المزيد من الانخفاض في المنسوب داخل البئر، والتي عندها تبدأ الخسائر غير الخطية في السيادة عند زيادة كمية التصريف وبالتالي تعتبر هذه قيمة الخسائر $Q > 6500 \text{ m}^3/\text{d}$ أقل موثوقية من سابقتها. ولضمان استمرار تشغيل البئر لفترة طويلة يقترح ضخ البئر بمعدل أقل من 6500 متر مكعب لكل يوم.

5.4 طريقة ارتفاع عمود الماء:- Water column height method

وهي طريقة مبسطة وسهلة ومنها يتم تقدير كفاءة البئر، وفي هذه الطريقة يتم قياس الهبوط في مستوى الماء من نقطة مستوى الماء الثابت قبل الضخ SWL إلى آخر نقطة وصل إليها الهبوط في مستوى الماء في حالة الثبات أو عدم الثبات. وبالتحديد يتم قياس ارتفاع عمود خط التدفق الرقائقي الخيالي بالخزان الجوفي بالقرب من جدار (حافة) البئر ومقارنتها بارتفاع عمود خط التدفق المضطرب داخل البئر. وعملياً يتم حساب الانخفاض الفعلي رأسياً داخل الخزان الجوفي وبالتحديد بالمنطقة جوار البئر، بينما يبدأ قياس الهبوط النظري ابتداءً من منسوب الماء الثابت SWL حتى نهاية

الانخفاض داخل البئر، وفي المقابل يعطي الفرق ما بين الانخفاض النظري بالبئر والانخفاض الفعلي في المنسوب داخل الخزان الجوفي قيمة الهبوط بالبئر CQ^2 . وللتأكد من صحة ودقة هذه الطريقة لابد من مقارنة نتائج الانخفاض في مستوى سطح الماء مع الزاوية التي يصنعها فاقد طبقة المياه الجوفية وزاوية فقد البئر. تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر أفقياً مقابل قيم فاقد الخزان الجوفي والانخفاض في المنسوب رأسياً على ورق رسم بياني.

- صل نقاط فاقد الخزان الجوفي والانخفاض في المنسوب كل على حده بخط مستقيم ينتهي عند النقطة الصفر وهي نقطة تقاطع المحور الأفقي والرأسي.

- أحسب الهبوط في مستوى الماء بالخزان الجوفي والزاوية التي يصنعها فاقد الخزان الجوفي مع الخط الأفقي عند أقصى قيمة لتصريف البئر.

- أحسب الهبوط في مستوى الماء بالبئر والزاوية التي تصنعها فواقد البئر مع الخط الأفقي عند أقصى قيمة لتصريف البئر.

- أحسب كفاءة البئر من النسبة المئوية لقيمة الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي بالقرب من جدار البئر مقسوماً على قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب داخل البئر أو من قيمة الزاوية التي يصنعها كل من فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر.

مثال (5.5):- من معلومات بيانات ضخ البئر بالجدول (5.1). المطلوب تقدير الآتي:-

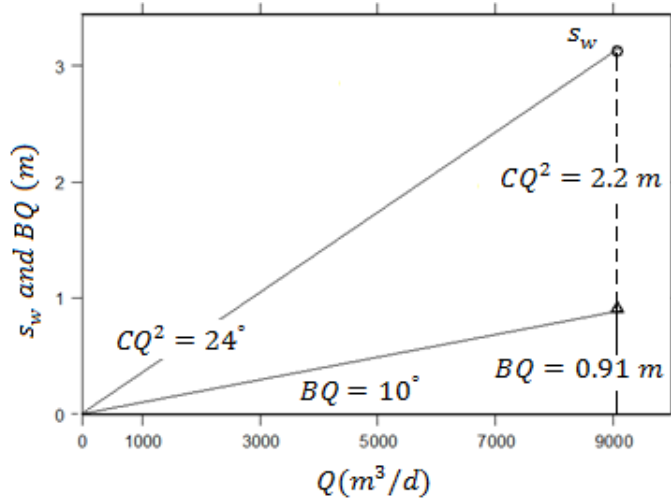
- كفاءة البئر

- عامل فعالية تطوير البئر (DF) Development factor

- درجة تدهور البئر Well deterioration

الحل:-

أولاً: كفاءة البئر لكل مرحلة ضخ على حده ومقارنتها مع قيمة زاوية الهبوط.



شكل (5.9):- معلومات البئر خلال مرحلة الضخ الأولى.

مقدار الانخفاض في عمود الماء بالخزان الجوفي BQ 0.91 متر

مقدار الانخفاض في عمود الماء داخل البئر CQ^2 2.2 متر

الانخفاض الكلي لعمود الماء s_w 3.1 متر

- كفاءة البئر

$$E_w = \frac{0.91}{0.91 + 2.1} \times 100 = \frac{0.91}{3.1} \times 100 = 29.4\%$$

- عامل فعالية تطوير البئر

لتقييم عامل فعالية تطوير البئر تستخدم المعادلة الرياضية (2.5)، وفي نفس السياق

يمكن تقييم درجة تدهور البئر اللاحق للاستخدام باستخدام قيم ثابت فقدان البئر C

كمعيار ومقياس وهي كما يلي:-

$$Q = 9072 \text{ m}^3/\text{d} \quad B = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^2$$

$$BQ = 0.91 \text{ m} \quad C = 2.5 \times 10^{-8} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$DF = \frac{C}{B} = \frac{2.5 \times 10^{-8}}{1.0 \times 10^{-4}} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^3$$

$$DF = \frac{CQ}{BQ} = \frac{2.3 \times 10^{-4}}{0.91} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ d/m}^3$$

طريقة الزاوية:-

للتأكد من صحة هذه الطريقة تعقد مقارنة لطيفة بين قيمة الزاوية التي يصنعها فاقد الخزان الجوفي وزاوية فقد البئر.

قيمة زاوية الهبوط بالخزان الجوفي $BQ = 10^\circ$

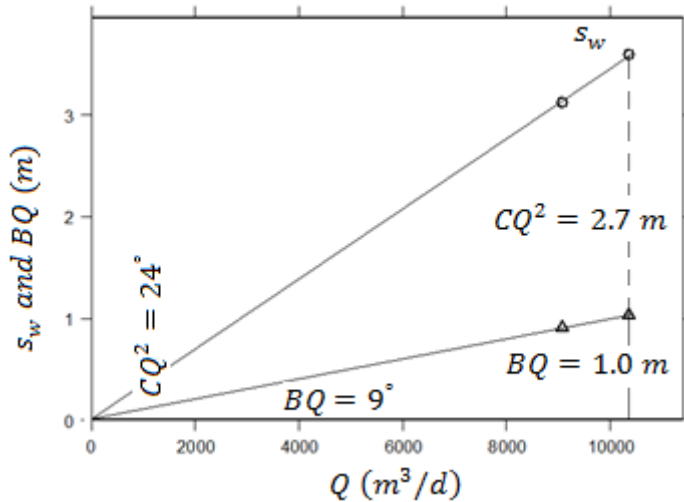
قيمة زاوية الهبوط داخل البئر $CQ^2 = 24^\circ$

قيمة زاوية الهبوط الكلية لعمود الماء $s_w = 34^\circ$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{10^\circ}{10^\circ + 24^\circ} \times 100 = \frac{10^\circ}{34^\circ} \times 100 = 29.4\%$$

ثانياً: كفاءة البئر عن طريق حساب متوسط مرحلة الضخ الأولى والثانية ومقارنتها مع قيمة زاوية سقوط عمود الماء الكلية.



شكل (5.10):- متوسط بيانات الضخ خلال المرحلة الأولى والثانية.

مقدار الانخفاض في عمود الماء داخل الخزان الجوفي BQ 1.0 متر

مقدار الانخفاض في عمود الماء داخل البئر CQ^2 2.7 متر

الانخفاض الكلي لعمود الماء s_w 3.7 متر

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{1.0}{3.7} \times 100 = 27.0\%$$

طريقة الزاوية:-

قيمة زاوية الهبوط بالخزان الجوفي BQ 9°

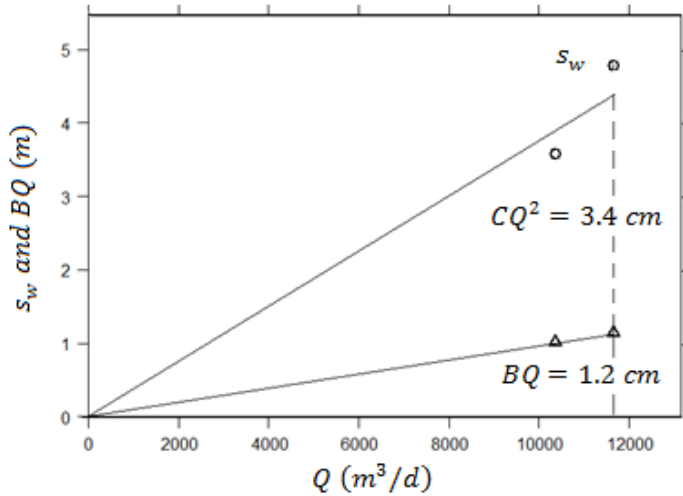
قيمة زاوية الهبوط داخل البئر CQ^2 24°

قيمة زاوية الهبوط الكلية لعمود الماء s_w 33°

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{9^\circ}{9^\circ + 24^\circ} \times 100 = \frac{9^\circ}{33^\circ} \times 100 = 27.3\%$$

ثانياً: كفاءة البئر خلال مرحلة الضخ الثانية والثالثة



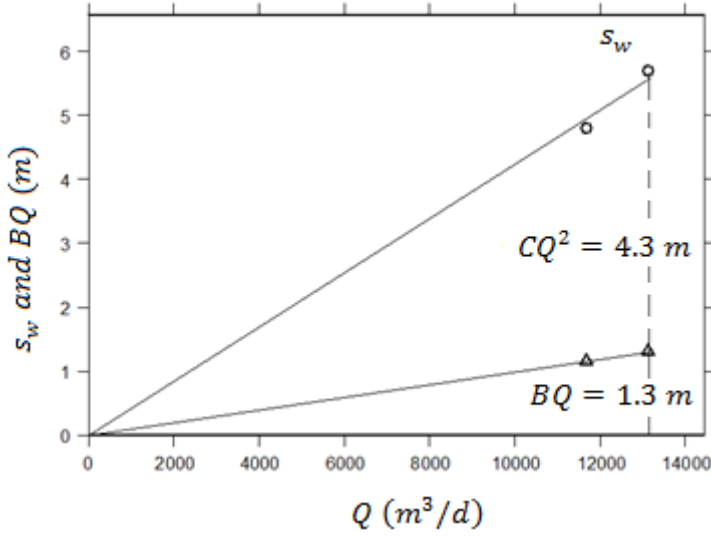
شكل (5.11):- متوسط بيانات الضخ خلال المرحلة الثانية والثالثة.

$$BQ = 1.2 \text{ m} \quad CQ^2 = 3.4 \text{ m} \quad s_w = 4.6 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{1.2}{4.6} \times 100 = 26.1\%$$

رابعاً: كفاءة البئر خلال مرحلتي الضخ الثالثة والرابعة



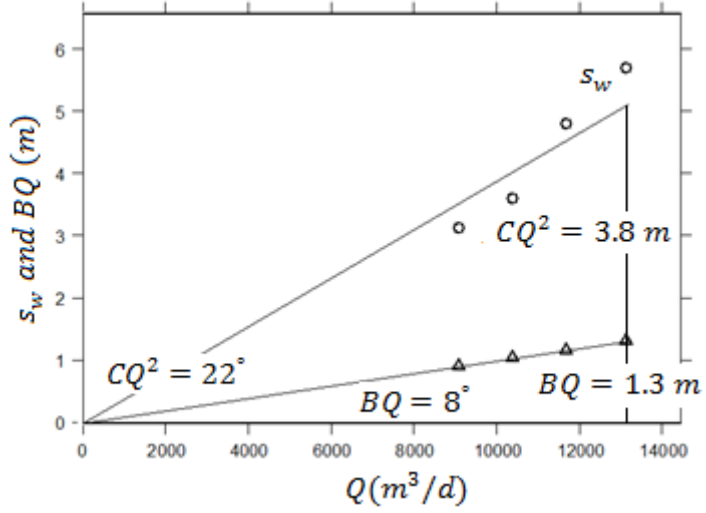
شكل (5.12):- متوسط بيانات الضخ خلال المرحلة الثالثة والرابعة.

$$BQ = 1.3 \text{ m} \quad CQ^2 = 4.3 \text{ m} \quad s_w = 5.6 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{1.3}{5.6} \times 100 = 23.2\%$$

خامساً: الحالة الراهنة لأداء البئر خلال متوسط مراحل الضخ المختلفة



شكل (5.13):- متوسط نتائج البئر خلال المراحل المختلفة من الضخ.

مقدار الانخفاض في عمود الماء بالخزان الجوفي BQ 1.3 سم

مقدار الانخفاض في عمود الماء داخل البئر CQ^2 3.8 سم

الانخفاض الكلي لعمود الماء s_w 5.1 سم

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{1.3}{1.3 + 3.8} \times 100 = \frac{1.3}{5.1} \times 100 = 25.5\%$$

طريقة الزاوية:-

تقدير كفاءة البئر عن طريق حساب متوسط قيمة الزاوية عند جميع مراحل الضخ

المختلفة:-

قيمة زاوية الهبوط بالخزان الجوفي BQ 8°

قيمة زاوية الهبوط داخل البئر CQ^2 22°

قيمة زاوية الهبوط الكلية لعمود الماء s_w 30°

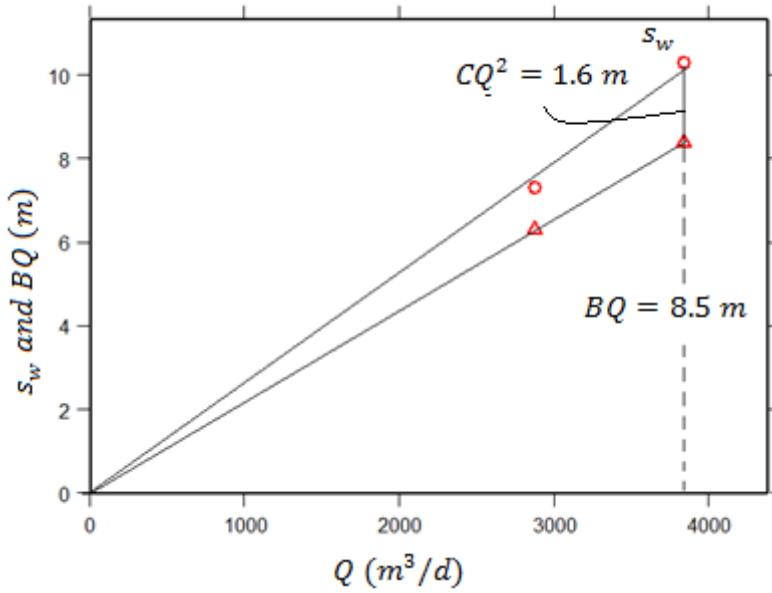
كفاءة البئر

$$E_w = \frac{8^\circ}{8^\circ + 22^\circ} \times 100 = \frac{8^\circ}{30^\circ} \times 100 = 26.7\%$$

مثال (5.6):-

تم ضخ بئر جوفي على ثلاث مراحل مختلفة التصريف وتم رصد معلومات الضخ بالجدول (5.2)، فكانت قيمة الانتقالية والسعة النوعية 725.4 و 349 متر مربع لكل يوم على التوالي. المطلوب تعيين كفاءة البئر.

الحل:-

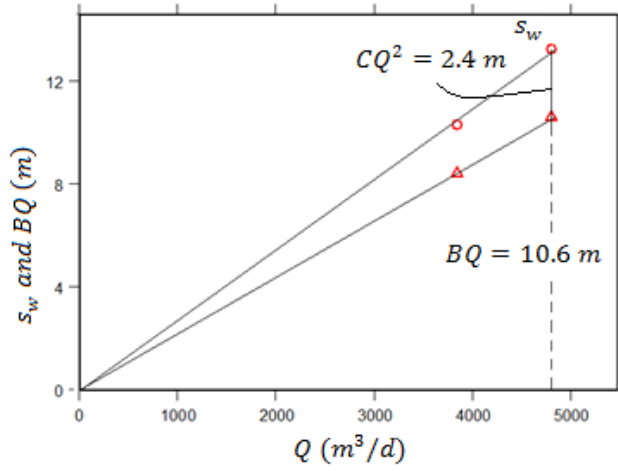


شكل (5.14):- بيانات الضخ خلال المرحلة الأولى والثانية.

$$BQ = 8.5 \text{ m} \quad CQ^2 = 1.6 \text{ m} \quad s_w = 10.3 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{8.5}{10.1} \times 100 = 84.2\%$$



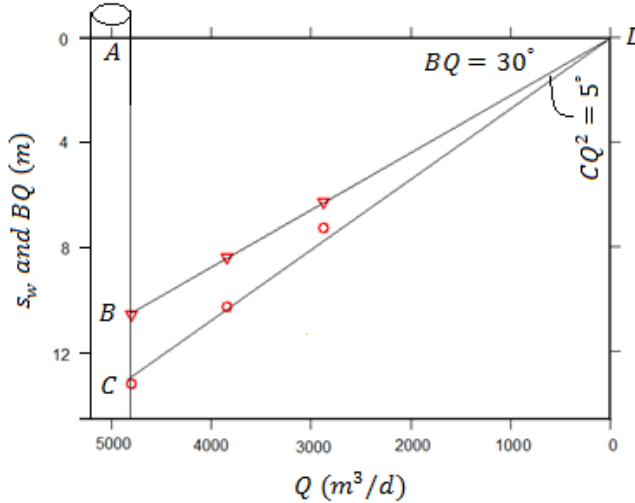
شكل (5.15):- بيانات الضخ خلال المرحلة الثانية والثالثة.

$$BQ = 10.6 \text{ m} \quad CQ^2 = 2.4 \text{ m} \quad s_w = 13.2 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{10.6}{13.2} \times 100 = 80.3\%$$

- كفاءة البئر خلال المراحل المختلفة من الضخ



شكل (5.16):- يوضح حالة التدفق الرقائقي بالخران الجوفي عند المنطقة المتاخمة

لمحيط البئر عند النقطة B أما حالة التدفق المضطرب داخل البئر توضيحها النقطة C .
 مقدار الهبوط الخيالي بالخران الجوفي - طول عمود خط التدفق الرقائقي $A - B =$
 10.6 سم

مقدار الهبوط بالبئر - طول عمود خط التدفق المضطرب $B - C = 2.3$ سم
 مقدار الهبوط الكلي في المنسوب - طول عمود الهبوط الكلي $A - C = 12.9$ سم
 كفاءة البئر

$$s_w = \frac{AB}{AB + BC} = \frac{10.6}{12.9} \times 100 = 82.2\%$$

ثانياً: كفاءة البئر من قيم زوايا الهبوط في المنسوب بالخران الجوفي والبئر.
 يعتمد تقييم كفاءة البئر على قيمة الزاوية التي يصنعها خط نصف قطر التأثير مع
 مستوى سطح الماء الثابت - قبل الضخ. وللتأكد من صحة النتائج أعلاه يتم تقدير كفاءة
 البئر عن طريق حساب متوسط قيمة الزوايا بالخران الجوفي وداخل البئر كما يلي:-
 - زاوية هبوط منسوب الماء بالخران الجوفي (فاقد التدفق الرقائقي BQ) محصورة
 بين A ، D و B تساوي 30°

- زاوية هبوط منسوب الماء داخل البئر (فوائد البئر المضطربة CQ^2) محصورة بين
 B ، D و C وهي تساوي 5°
 - زاوية الهبوط الكلية لعمود الماء s_w وهي زاوية محصورة ما بين A ، D و C
 وتساوي:

$$s_w = 30^\circ + 5^\circ = 35^\circ$$

من الواضح أن قيمة فاقد البئر تمثله أصغر زاوية B ، D و C وهو دليل على أن البئر
 ذات كفاءة عالية. ومن قيمة زاويتي التدفق الرقائقي والمضطرب يمكن إيجاد قيمة
 فعالية البئر على النحو التالي:-

$$E_w \% = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} = \frac{30^\circ}{35^\circ} \times 100 = 85.7\%$$

من قيمة زاوية فواقد البئر يمكن تقدير عجز البئر كما يلي:-

$$InE_w \% = \frac{5^\circ}{35^\circ} \times 100 = 14.3\%$$

للتحقق من جودة تصميم وكفاءة البئر يعطي الشكل العام لمعلومات البئر فكرة عامة عن الحالة الراهنة للبئر من حيث الهبوط في المنسوب، وهنا لابد من إيجاد قيمة المسافة الفاصلة ما بين قيمة الهبوط في المنسوب بالخران الجوفي وداخل البئر، فإذا كانت المسافة أو الفرق في قيمة الهبوط صغيرة كانت البئر ذات كفاءة عالية كما هو الحال في هذه البئر شكل (5.16). أيضاً يمكن التأكد من كفاءة البئر من قيمة الزاوية التي يصنعها خط مسار نصف قطر التأثير مع المستوى الأفقي لسطح الماء الثابت - قبل الضخ SWL بالخران الجوفي والبئر على التوالي. وبالتفصيل إذا كان خط التدفق الرقائقي قريب من مستوى سطح الماء الثابت وقريب من خط التدفق المضطرب عند حافة البئر بمعنى أن قيمة الزاوية التي يصنعها هذا الخط مع مستوى سطح الماء الثابت صغيرة القيمة عندها يكون خط الهبوط في المنسوب منبسط - غير حاد Gentle وهو مؤشر يدل على أن البئر ذات كفاءة عالية، والعكس إذا كان الهبوط في المنسوب يصنع زاوية شديدة الانحدار Steeper عند حافة جدار البئر بمعنى أن الزاوية داخل الخزان الجوفي وبالقرب من جدار البئر بعيدة عن مستوى سطح الماء الثابت وأنها ذات قيمة كبيرة فإن البئر تكون ذات كفاءة قليلة.

الفصل السادس

فوائد البئر

Well Losses

Component of well losses

6.1 مكونات خسائر البئر:-

يتأثر الهبوط في آبار المياه بشكل أساسي بمكون فقد البئر مقارنةً بمكون فقد الخزان الجوفي، ومن جانب آخر قد يتأثر الهبوط بشكل أساسي بمكون فقدان الخزان الجوفي. وعموماً تحدث خسائر البئر بسبب زيادة سرعة سريان المياه داخل البئر وخارجها عند حافة مصفاة البئر أو بسبب الاحتكاك الذي يحدث داخل مصفاة البئر وفي أنبوب الشفط حيث يكون التدفق أو الانحراف مضطرباً. واجمالاً يتناسب فقدان البئر بسبب التدفق المضطرب مع معدل الضخ الذي تم رفعه إلى أعلى طاقة تصريف. وأهم ما يميز هذه الطريقة أنها تهتم بتقدير عجز البئر الذي عن طريقه يتم تعيين كفاءة البئر وهو خلاف ما جاء في بقية الطرق الأخرى.

6.2 تقدير فواقد البئر عن طريق فاقد الخزان الجوفي:-

يوضح اختبار السحب التدريجي تلك العلاقة التي تربط بين فواقد البئر وفاقد الخزان الجوفي والتي منها يمكن تقدير كفاءة البئر، فمثلاً كلما ابتعد خط مسار خسارة الخزان الجوفي عن المحور الأفقي الخاص بقيم تصريف البئر كلما كانت البئر ذات كفاءة عالية والعكس.

خطوات تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم كمية الضخ المتدرج أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم كل من فاقد الخزان الجوفي والبئر رأسياً على نفس المقياس السابق.

- صل قيم فاقد الخزان الجوفي وفواقد البئر كل على حده بخط مستقيم ينتهي كل منهما عند نقطة تلاقي المحورين السيني والصادي، عند القيمة صفر لكل من التصريف وفواقد البئر وفاقد الخزان الجوفي شكل (6.1).

- أوجد قيمة الهبوط في فاقد الخزان الجوفي وفواقد البئر، ومجموع هذه القيم يعطي قيمة الهبوط الكلي في المنسوب.

- قس زاوية فاقد الخزان الجوفي BQ وزاوية فقد البئر CQ^2 ، علماً بأن مجموع الزاويتين يعطي قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب s_w .

- أحسب كفاءة البئر من قيمة فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر والهبوط الكلي في المنسوب، وللتأكد من صحة ذلك يمكن عقد مقارنة مع قيمة زاوية فاقد الخزان الجوفي مضروباً في مائة ومقسوماً على قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (مجموع زاويتي فواقد كل من البئر والخزان والجوفي) كما في المعادلة (5.1).

مثال (6.1):-

بئر جوفي يخترق كامل سمك الخزان المحصور مصمم للعمل 24 ساعة، ويضخ بمعدل 200 متر مكعب/ ساعة لينخفض منسوب الماء إلى حد 12.39 متر، المساحة المفتوحة لكل المصفاة تساوي 2.23 متر مربع، ويبلغ طول المصفاة 42.17 متر وسرعة دخول المياه الفعلية لمصفاة البئر 89.72 متر/ ساعة. ويبلغ قطر البئر 0.50 متر، وقيمة التخزينية 8.3×10^{-5} . أوجد كفاءة البئر.

جدول (6.1):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة مقلوب القدرة النوعية (المصدر: (2012 Maged El Osta).

$E_w \%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	C (d^2/m^5)	B (d/m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
88.7	0.83	6.3	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	7.3	2880	1
84.8	1.5	8.4			2.7×10^{-3}	10.3	3840	2
82.2	2.3	10.6			2.8×10^{-3}	13.25	4800	3

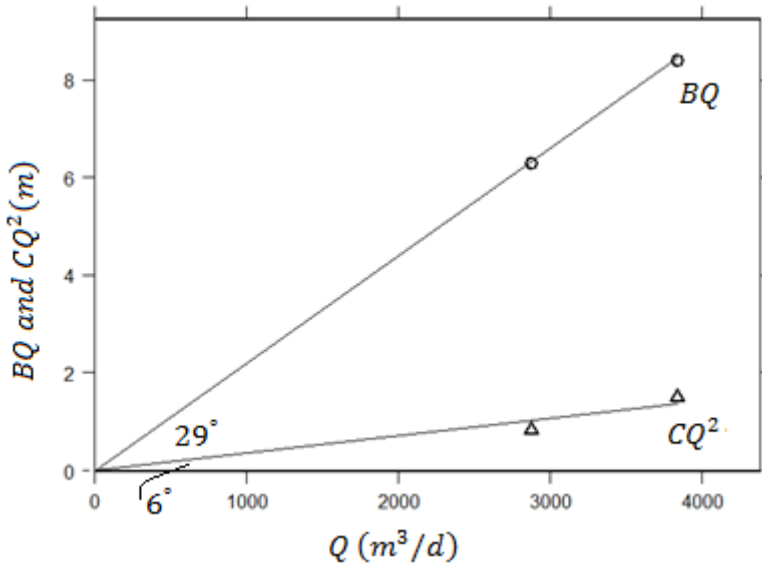
$$Q = 200 \text{ m}^3/h = 4800 \text{ m}^3/d \quad s_w = 12.9 \text{ m}$$

$$A = 2.23 \text{ m}^2 \quad L_s = 42.17 \text{ m} \quad r_w = 0.25 \text{ m}$$

$$t = 24 h = 1 \text{ day}$$

$$v_s = 89.72 \text{ m/h} = 0.025 \text{ m/sec}$$

مرحلة الضخ الأولى والثانية:



شكل (6.1):- قيم خسائر الخزان الجوفي والبيئر خلال مرحلة الضخ الأولى والثانية.

أولاً:- الهبوط في منسوب الماء بالخزان الجوفي والبيئر

$$BQ = 8.4 \text{ m} \quad CQ^2 = 1.6 \text{ m} \quad s_w = 10.0 \text{ m}$$

كفاءة البيئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{8.4}{10.0} \times 100 = 84.0\%$$

ثانياً:- زاوية فاقد الخزان الجوفي وفقد البيئر وعلاقتها بالهبوط في المنسوب

$$\angle BQ = 29^\circ \quad \angle CQ^2 = 6^\circ \quad \angle s_w = 35^\circ$$

خسائر البيئر

$$\angle CQ^2 = 6^\circ = \frac{6^\circ}{35^\circ} \times 100 = 17.1\%$$

$$CQ^2 = 0.17 s_w = 0.17 \times 10.0 = 1.7 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي

$$\alpha BQ = 29^\circ = \frac{29^\circ}{35^\circ} \times 100 = 83.0\%$$

$$BQ = 0.83s_w = 0.83 \times 10.0 = 8.3 \text{ m}$$

مجموع الخسائر

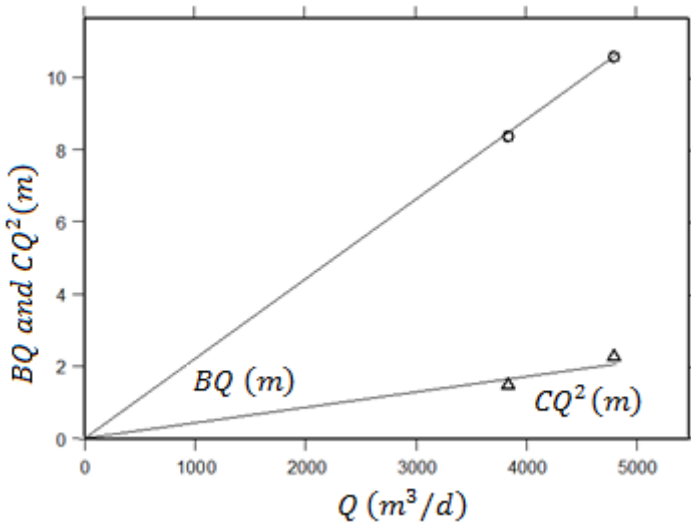
$$\alpha s_w = \alpha BQ + \alpha CQ^2 = 29^\circ + 6^\circ = 35^\circ$$

$$s_w = BQ + CQ^2 = 8.3 + 1.7 = 10.0 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha s_w} \times 100 = \frac{29^\circ}{35^\circ} \times 100 = 83.0\%$$

مرحلة الضخ الثانية والثالثة



شكل (6.2):- يوضح خسائر الخزان الجوفي والبئر خلال مرحلة الضخ الثانية والثالثة.

$$\alpha BQ = 28^\circ = 80.0\% \quad \alpha CQ^2 = 7^\circ = 20.0\% \quad \alpha s_w = 35^\circ$$

خسائر البئر

$$\alpha_{CQ^2} = 7^\circ = \frac{7^\circ}{35^\circ} \times 100 = 20.0\%$$

$$CQ^2 = 0.2 \times 13.25 = 2.6 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي

$$\alpha_{BQ} = 28^\circ = \frac{28^\circ}{35^\circ} \times 100 = 80.0\%$$

$$BQ = 0.8 \times 13.25 = 10.6 \text{ m}$$

مجموع الخسائر

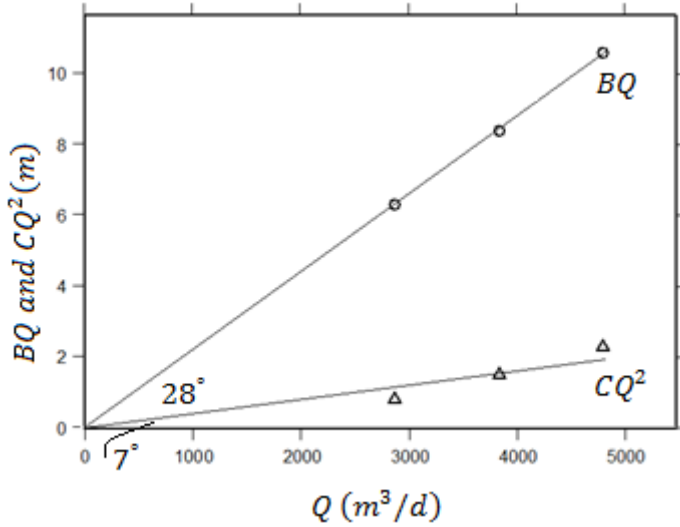
$$\alpha_{S_w} = \alpha_{BQ} + \alpha_{CQ^2} = 28^\circ + 7^\circ = 35^\circ$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{\alpha_{BQ}}{\alpha_{S_w}} \times 100 = \frac{28^\circ}{35^\circ} \times 100 = 80.0\%$$

يلاحظ أنه مع تقدم عملية الضخ وزيادة كمية التصريف تقل كفاءة البئر ويزداد الإجهاد على طبقة المياه الجوفية الذي قد يكون له الأثر السلبي على إغلاق مصفاة البئر وتقليل كفاءتها بسبب الجريان المضطرب الذي يعمل على تحريك المواد الناعمة بالخزان الجوفي في اتجاه مصفاة البئر.

متوسط جميع مراحل الضخ



شكل (6.3):- متوسط قيم خسائر الخزان الجوفي والبنر خلال مراحل الضخ المختلفة.

$$\alpha BQ = 28^\circ \quad \alpha CQ^2 = 7^\circ \quad \alpha s_w = 35^\circ$$

خسائر البنر

$$\alpha CQ^2 = 7^\circ = \frac{7^\circ}{35^\circ} \times 100 = 20.0\%$$

$$CQ^2 = 0.2 \times 13.25 = 2.6 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي

$$\alpha BQ = 28^\circ = \frac{28^\circ}{35^\circ} \times 100 = 80.0\%$$

$$BQ = 0.8 \times 13.25 = 10.6 \text{ m}$$

مجموع الخسائر

$$\alpha s_w = \alpha BQ + \alpha CQ^2 = 28^\circ + 7^\circ = 35^\circ$$

$$s_w = BQ + CQ^2 = 10.6 + 2.6 = 13.2 \text{ m}$$

يشير التحليل إلى أن فقد البئر هو عنصر ثانوي من الانخفاض الكلي في منسوب المياه بهذه البئر، وهو مؤشر جيد يوضح أن كفاءة البئر عالية.
كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{\Delta BQ}{\Delta s_w} \times 100 = \frac{28^\circ}{35^\circ} \times 100 = 80.0\%$$

أو

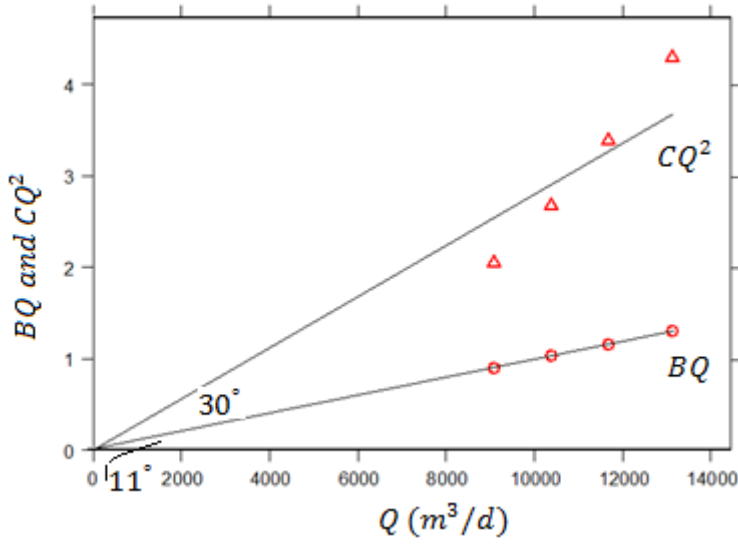
$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{10.6}{13.2} \times 100 = 80.3\%$$

مثال (6.2):-

من معلومات الجدول أدناه المطلوب تقدير كفاءة البئر.
جدول (6.2):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة الانخفاض النوعي (المصدر: (2018 Yosef Aregaw).

م	Q (m ³ /d)	s _w (m)	s _w /Q (d/m ²)	B(d /m ²)	C(d ² /m ⁵)	BQ (m)	CQ ² (m)	E _w %
1	9072	3.13	3.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	0.91	2.06	29.1
2	10368	3.6	3.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.04	2.69	28.9
3	11664	4.8	4.1x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.17	3.40	24.4
4	13132.8	5.7	4.3x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.31	4.31	23.0

الحل:-



شكل (6.4):- متوسط قيم خسائر الخزان الجوفي والبئر خلال مراحل الضخ المختلفة.

$$\alpha BQ = 11^\circ \quad \alpha CQ^2 = 30^\circ \quad \alpha s_w = 41^\circ$$

خسائر البئر

$$\alpha CQ^2 = 30^\circ = \frac{30^\circ}{41^\circ} \times 100 = 73.1\%$$

$$CQ^2 = 0.731 \times 5.7 = 4.2 \text{ m}$$

تشير تحليلات الاختبار إلى أن خسائر البئر تلغي جزءاً كبيراً (يزيد عن 50 في المائة) من إجمالي السحب في بئر تم ضخها، ويجب أن تؤخذ في الاعتبار عند وضع تقديرات العائد الآمن والمستدام. تعتبر الحالات الشاذة في بيانات اختبار الضخ التدريجي مفيدة لتفسير ظروف الخزان الجوفي مثل التسرب وظروف الحدود السلبية.

خسارة الخزان الجوفي

$$\alpha BQ = 11^\circ = \frac{11^\circ}{41^\circ} \times 100 = 26.8\%$$

$$BQ = 0.268 \times 5.7 = 1.5 \text{ m}$$

مجموع الخسائر

$$\alpha_{s_w} = \alpha_{BQ} + \alpha_{CQ^2} = 11^\circ + 30^\circ = 41^\circ$$

$$s_w = BQ + CQ^2 = 1.5 + 4.2 = 5.7 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{\alpha_{BQ}}{\alpha_{s_w}} \times 100 = \frac{11^\circ}{41^\circ} \times 100 = 26.8\%$$

أو

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{1.5}{5.7} \times 100 = 26.3\%$$

في هذا المثال تم حساب الكفاءات الهيدروليكية بمعدلات تصريف مختلفة. ومن الجدول (6.2) يلاحظ أن الكفاءة تقل تدريجياً وبصورة واضحة مع زيادة معدلات تصريف البئر. وإجمالاً تزيد فواقد البئر مع زيادة كمية تصريف البئر وهو السبب في زيادة عامل الاضطرابات حول محيط البئر فضلاً عن زيادة معامل المقاومة.

تم العثور على الخسائر الرقائقية بقيمة 1.3 متر عند تنفيذ عملية الضخ على أربعة مراحل مختلفة التصريف، والتي كانت بشكل عام خسائر في منطقة الحفر الجوفي، وهي التي أدت إلى تراكم حطام الحفر الجوفي الناعم وكتلة الجدار وما إلى ذلك في منطقة الحفر وذلك عند تنفيذ عمليتي الحفر الجوفي والضخ، وإلى انخفاض كبير في النفاذية بالقرب من البئر. وفي المقابل تم العثور على خسائر البئر المضطربة بقيمة 4.3 متر عند تصريف تشغيلي على أربعة مراحل مختلفة، وهي التي كان لها الأثر الواضح في تحريك وتراكم حطام الحفر الجوفي الناعم وكتلة الجدار وما إلى ذلك في منطقة الحفر عند ضخ البئر، وإلى انخفاض كبير في النفاذية بالقرب من البئر. وساعد تطوير البئر غير الكافي إلى عدم إمكانية غسل واستخراج هذه المواد من منطقة الحفر

مما كان له الأثر السلبي في عدم إثراء النفاذية. يتشكل الجزء الخاص بخسائر البئر المضطربة عند مدخل المصفاة وخسائر الاحتكاك داخل البئر الرئيسي، وبسبب تصميم البئر الذي تشوبه بعض الأخطاء الفنية لا يمكن تجنب هذه الخسائر التي كان لها الأثر الواضح في قلة كفاءة البئر. وعموماً تشير مراجعة نتائج اختبار الضخ التدريجي إلى ما يلي:-

- 1- تشكل خسائر البئر نسبة كبيرة من إجمالي السحب في هذه البئر التي تم اختبارها.
- 2- تعتبر طبيعة فقد البئر نتيجة للتدفق غير الدارسي Non Darcian في طبقة المياه الجوفية بالقرب من البئر الذي تم ضخه.

6.3 تقدير فواقد البئر عن طريق الانخفاض في المنسوب:-

من هذه الطريقة يتم تقدير عجز البئر ومن ثم كفاءة الآبار وذلك في حالة ضخ البئر بمعدلات تصريف مختلفة. ولتقييم الحالة الراهنة للبئر لابد من إيجاد قيمة الهبوط وزاوية خسائر البئر، فإذا كانت قيمة الهبوط والزاوية كبيرة عندها يزيد التدفق المضطرب داخل وحول محيط البئر وهو مؤشر يدل على أن البئر ذات كفاءة قليلة والعكس. وعند تطبيق هذه الطريقة تتبع الخطوات التالية:-

- وقع قيم الضخ المتدرج أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم كل من فواقد البئر والانخفاض في المنسوب رأسياً على نفس المقياس السابق.

- مد الخط المستقيم الذي يمر بنقاط خسائر البئر والانخفاض في المنسوب كل على حده لينتهي عند نقطة تلاقي المحورين السيني والصادي، أي عند القيمة صفر لكل من التصريف وفواقد البئر والانخفاض الكلي في المنسوب.

- أوجد قيمة الهبوط في المنسوب من قيمة فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر والهبوط الكلي في المنسوب.

- قس زاوية فواقد البئر $\angle CQ^2$ وزاوية فاقد الخزان الجوفي $\angle BQ$ وهي زاوية محصورة بين كل من خط مسار فواقد البئر وخط مسار الانخفاض في المنسوب شكل (6.5).

- أحسب عجز البئر من النسبة المئوية لفقد البئر مقسوماً على مجموع فاقد الخزان الجوفي زائداً فقد البئر.

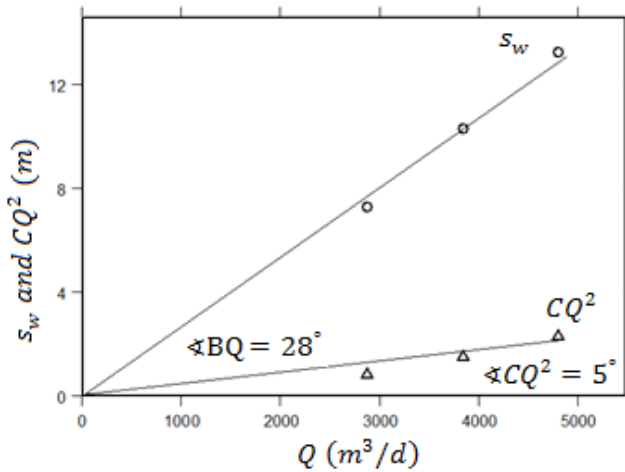
- أحسب عجز البئر من قيمة زاوية فواقد البئر مضروباً في مائة ومقسوماً على قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب معادلة (6.1).

- أحسب كفاءة البئر عند طرح مائة من نسبة عجز البئر أو من المعادلة (5.1).

$$InE_w = \frac{\angle CQ^2}{\angle s_w} \times 100 \dots \dots \dots (6.1)$$

مثال (6.3):-

من معلومات البئر الجوفي بالجدول (6.1) المطلوب تقدير كفاءة البئر.
الحل:-



شكل (6.5):- يوضح قيم فواقد البئر والانخفاض في المنسوب في حالة ضخ البئر بمعدلات تصريف مختلفة.

$$BQ = 10.6 \text{ m} \quad CQ^2 = 2.3 \text{ m} \quad s_w = 12.9 \text{ m}$$

$$\angle BQ = 28^\circ \quad \angle CQ^2 = 5^\circ \quad \angle s_w = 33^\circ$$

أولاً: كفاءة البئر من قيم الهبوط في المنسوب

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{10.6}{12.9} \times 100 = 82.2\%$$

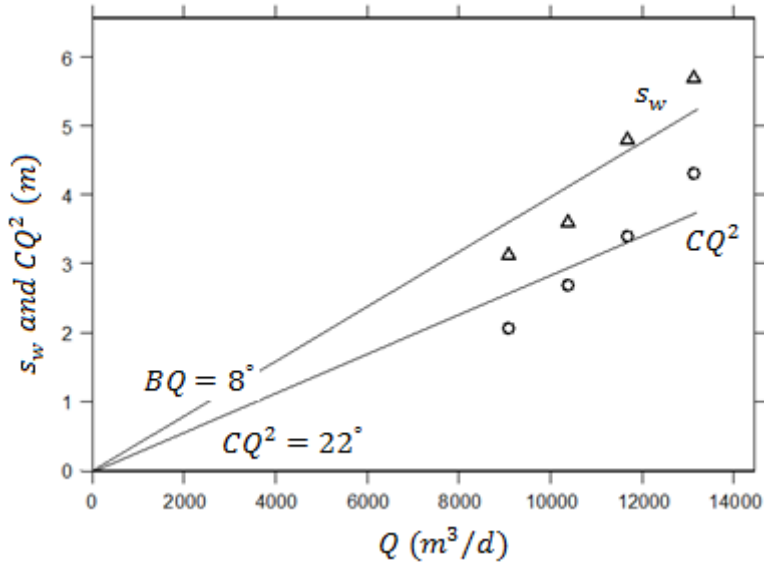
ثانياً: كفاءة البئر من قيم الزوايا

$$E_w = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{28^\circ}{33^\circ} \times 100 = 84.8\%$$

في هذا المثال نجد أن قيمة الهبوط وزاوية خسائر البئر قليلة جداً مقارنة بالهبوط وزاوية فاقد طبقة المياه الجوفية وهو مؤشر جيد يوضح أن البئر ذات كفاءة عالية والمؤشر الآخر هو ابتعاد خط مسار فواقد البئر عن خط مسار الهبوط الكلي في منسوب الماء، بمعنى آخر أن مسافة فقد البئر قريبة جداً من الخط الأفقي للتصريف، بينما تزداد مسافة فاقد طبقة المياه الجوفية بعداً عن الخط الأفقي شكل (6.5).

مثال (6.4):- من معلومات بيانات ضخ البئر بالجدول (6.2) أدناه. أوجد كفاءة البئر.

الحل:-



شكل (6.6):- يوضح متوسط قيم فواقد البئر والانخفاض في المنسوب وذلك عند ضخ البئر بمعدلات تصريف مختلفة.

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 22^\circ = 4.3 \text{ m}$$

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 8^\circ = 1.3 \text{ m}$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب (الفواقد الكلية)

$$\text{Total losses } \angle s_w = BQ + CQ^2 = 8^\circ + 22^\circ = 30^\circ$$

$$s_w = BQ + CQ^2 = 4.3 + 1.3 = 5.6 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{8^\circ}{30^\circ} \times 100 = 26.7\%$$

$$E_w \% = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{1.3}{5.6} \times 100 = 23.2\%$$

في هذا المثال يلاحظ أن خط مسار خسائر البئر أقرب إلى خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب وهو دليل على أن البئر ذات كفاءة قليلة عكس المثال السابق، هذا بالإضافة إلى أن قيمة زاوية خسائر البئر أكبر من زاوية فاقد طبقة المياه الجوفية وهي زاوية محصورة بين فواقد البئر والانخفاض في المنسوب.

الفصل السابع

طريقة الميل

Slope Method

7.1 تقييم الحالة الراهنة للبئر: - Assessment of the current condition of the well

تهتم هذه الطريقة بتحديد عدد من المعاملات الهيدروليكية الخاصة بالخرزان الجوفي والبئر، ومن هذه المعاملات يتم تقدير عامل فعالية تطوير البئر ودرجة تدهور البئر. ولتقييم الوضع الراهن للبئر يتعين علينا بتطبيق الطرق التالية:-

1- طريقة ميل الخط المستقيم.

2- طريقة تقدير الميل من نقطة ما على الخط المستقيم.

7.2 طريقة ميل الخط المستقيم:- Straight line slope method

من ميل خط بيانات الضخ المتدرج يتم تقدير كفاءة آبار المياه الجوفية وذلك بعد ايجاد عدد من المعاملات الهيدروليكية الخاصة بنتائج الضخ المتدرج، ومن هذه المعاملات الهيدروليكية ما يلي:-

- قيمة الانخفاض النوعي s_w/Q من ميل خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب.

- قيمة معامل التدفق الرقائقي B من ميل خط بيانات التدفق الخطي بطبقة المياه الجوفية.

- قيمة معامل التدفق المضطرب C من ميل خط بيانات التدفقات غير الخطية بالبئر. تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر المختلفة أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل ثلاثة معاملات هيدروليكية هي: قيم الانخفاض الكلي في المنسوب، فاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية وفقدان البئر رأسياً على مقياس رسم حسابي.

- صل بيانات نتائج اختبار الضخ المتدرج بخط مستقيم مستقل لكل معاملة هيدروليكية على حده، لينتهي كل خط عند النقطة التي تكون فيها قيم كل من المحورين الأفقي والرأسي يساوي صفر شكل (7.1).

- أحسب ميلان كل خط مستقيم على حده ومنه استخراج المعلومات التالية:-
 - من ميلان خط معلومات فاقد طبقة المياه الجوفية BQ استخراج قيمة معامل فاقد طبقة المياه الجوفية B .

- من ميلان خط معلومات فقد البئر CQ^2 استخراج قيمة معامل فقد البئر C .
 - من ميلان خط معلومات الانخفاض الكلي في المنسوب s_w استخراج قيمة الانخفاض النوعي s_w/Q .

- للتأكد من صحة قيم هذه المعاملات أحسب معامل خسارة طبقة المياه الجوفية، معامل خسائر البئر والانخفاض الكلي في المنسوب رياضياً من المعادلات (7.1) إلى (7.4)، ومنها يمكن تقدير كفاءة البئر من المعادلة (7.5).

معامل فاقد الخزان الجوفي Aquifer-loss coefficient

$$\text{The coefficient of aquifer loss } B = \frac{BQ}{Q} \dots \dots \dots (7.1)$$

معامل فقدان البئر Non-linear well-loss coefficient

$$\text{The coefficient of well loss } C = \frac{CQ^2}{Q^2} \dots \dots \dots (7.2)$$

$$CQ = \frac{CQ^2}{Q} \dots \dots \dots (7.3)$$

الانخفاض النوعي Specific drawdown

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \dots \dots \dots (7.4)$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{B}{B + CQ} \times 100 \dots \dots \dots (7.5)$$

- أحسب السعة النوعية من معكوس قيمة الانخفاض النوعي الناتجة من ميل الخط المستقيم - معادلة (2.1).

وللتأكد من صحة هذه الطريقة الخاصة بتعيين كفاءة آبار المياه الجوفية يتم قياس الزوايا الخاصة بقيم: فاقد طبقة المياه الجوفية، فواقد البئر والانخفاض الكلي في المنسوب، مع ادخال هذه النسب في المعادلة (5.1) وذلك عند قسمة النسبة المئوية لزاوية فاقد الخزان الجوفي على زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب.

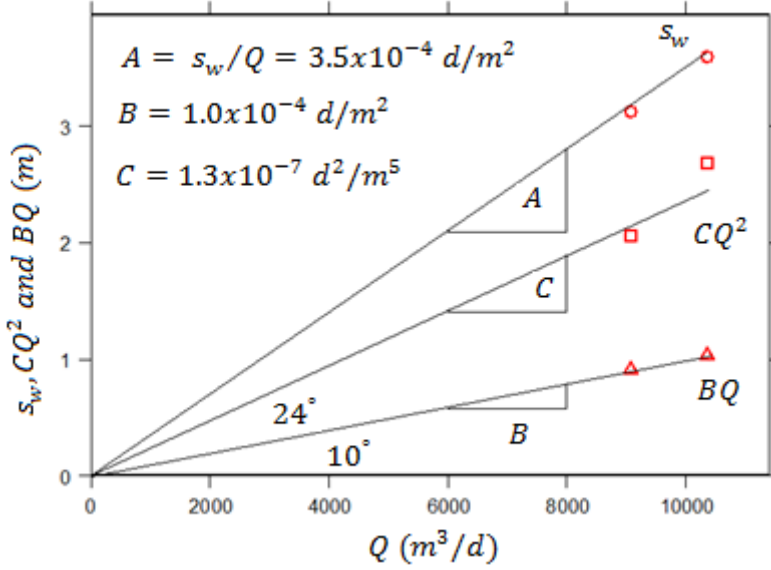
مثال (7.1):- من معلومات بيانات ضخ البئر بالجدول أدناه. المطلوب تحديد كفاءة البئر من طريقة الخط المستقيم.

جدول (7.1):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة الانخفاض النوعي (المصدر: (2018 Yosef Aregaw).

م	Q (m ³ /d)	s _w (m)	s _w /Q (d/m ²)	B(d /m ²)	C(d ² /m ⁵)	BQ (m)	CQ ² (m)	E _w %
1	9072	3.13	3.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	0.91	2.06	29.1
2	10368	3.6	3.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.04	2.69	28.9
3	11664	4.8	4.1x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.17	3.40	24.4
4	13132.8	5.7	4.3x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	2.5x10 ⁻⁸	1.31	4.31	23.0

الحل:-

بيانات مرحلة الضخ الأولى والثانية



شكل (7.1):- يوضح بيانات الهبوط خلال مرحلتي الضخ الأولى والثانية.

أولاً: طريقة ميل الخط المستقيم

من الشكل أعلاه تم رصد قيم ميل خطوط كلٍ من الانخفاض الكلي في المنسوب ومعامل فاقد الخزان الجوفي فكانت النتائج: 3.5×10^{-4} و 1.0×10^{-4} يوم لكل متر مربع على التوالي، أما معامل فقد البئر $1.3 \times 10^{-7} d^2/m^5$. ولتقدير كفاءة البئر تستخرج النسبة المئوية من قيمة معامل ميل فاقد الخزان الجوفي مقسوماً على قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب.

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{0.2}{2000} = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$$

معامل فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.52}{(2000)^2} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 1.3 \times 10^{-7} \times 2000 = 2.6 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{0.7}{2000} = 3.5 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 1.0 \times 10^{-4} + 2.6 \times 10^{-4} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{3.6 \times 10^{-4}} \times 100 = 27.8\%$$

$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{3.5 \times 10^{-4}} \times 100 = 28.6\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2000}{0.7} = 2857.1 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثانياً: طريقة الزاوية

للتحقق من صحة طريقة ميل الخط المستقيم تستخدم طريقة الزاوية، والتي منها يتم تقدير كفاءة البئر في حالة استخراج النسبة المئوية من قيمة زاوية فاقد الخزان الجوفي مقسوماً على زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب كما جاء في المعادلة (5.1).

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 24^\circ$$

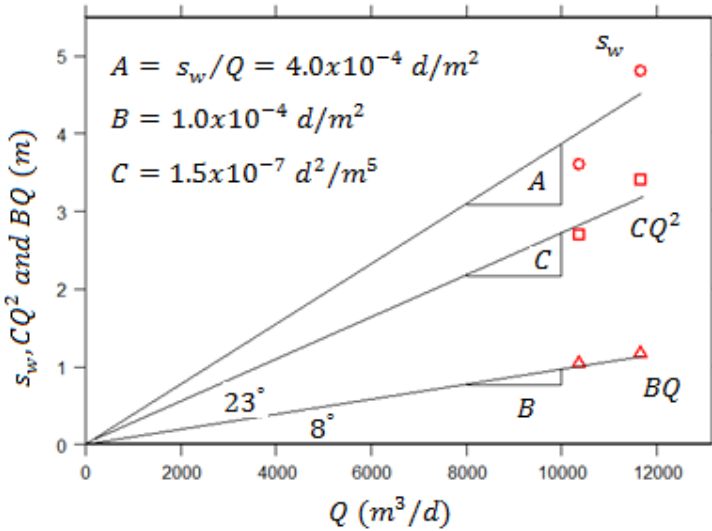
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \angle s_w = 34^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{10^\circ}{34^\circ} \times 100 = 29.4\%$$

بيانات مرحلة الضخ الثانية والثالثة



شكل (7.2):- بيانات الهبوط خلال مرحلتي الضخ الثانية والثالثة.

أولاً: طريقة ميل الخط المستقيم

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$$

معامل فواقد البئر

$$C = 1.5 \times 10^{-7} d^2 / m^5$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{0.8}{2000} = 4.0 \times 10^{-4} d / m^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{s_w / Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{4.0 \times 10^{-4}} \times 100 = 25.0\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2000}{0.8} = 2500 m^2 / d$$

ثانياً: طريقة الزاوية

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = BQ = 8^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = CQ^2 = 23^\circ$$

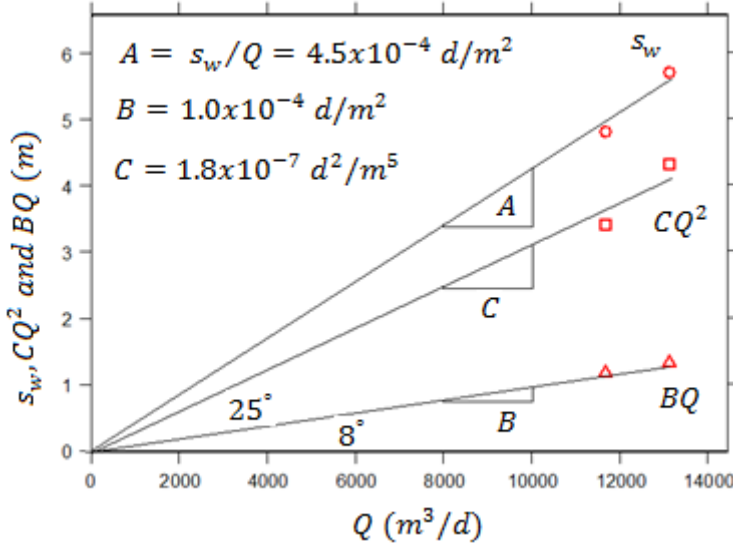
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } s_w = 31^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{8^\circ}{31^\circ} \times 100 = 25.8\%$$

بيانات مرحلة الضخ الثالثة والرابعة



شكل (7.3):- بيانات الهبوط خلال مرحلتي الضخ الثالثة والرابعة.

أولاً: طريقة الميل الخط المستقيم

من الشكل أعلاه تم رصد قيم ميل خطوط كلٍ من الانخفاض الكلي في المنسوب ومعامل فاقد الخزان الجوفي فكانت النتائج: 4.5×10^{-4} و 1.0×10^{-4} يوم لكل متر مربع على التوالي، أما معامل فقد البئر $1.8 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$. ولتقدير كفاءة البئر نستخرج النسبة المئوية من قيمة معامل ميل فاقد الخزان الجوفي مقسوماً على قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب كما في المعادلة الآتية:-

$$E_w = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{4.5 \times 10^{-4}} \times 100 = 22.2\%$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{0.9}{2000} = 4.5 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2000}{0.9} = 2222.2 \text{ m}^2/d$$

ثانياً: طريقة الزاوية

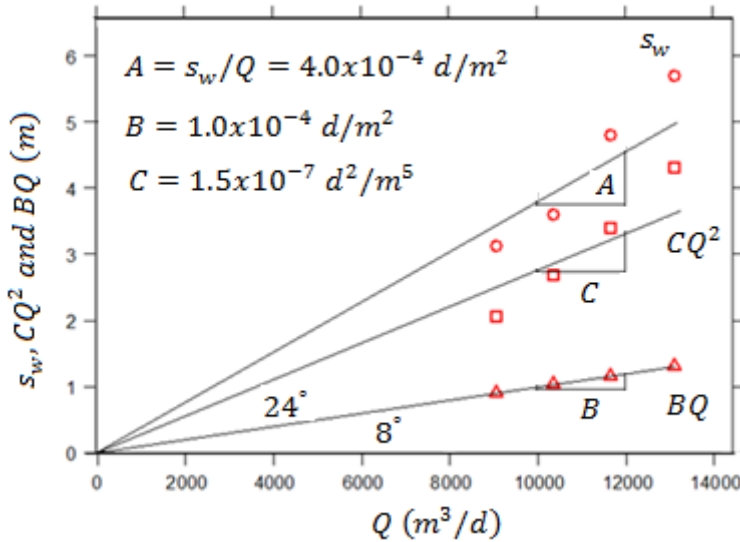
$$\angle BQ = 8^\circ \quad \angle CQ^2 = 25^\circ \quad \angle s_w = 33^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{8^\circ}{33^\circ} \times 100 = 24.2\%$$

يلاحظ أنه ومع تقدم عملية الضخ وزيادة كمية التصريف تقل كفاءة البئر ويزداد الإجهاد على طبقة المياه الجوفية الذي قد يكون له الأثر السلبي على إغلاق مصفاة البئر وتقليل كفاءتها.

متوسط بيانات مراحل الضخ المختلفة



شكل (7.4):- بيانات الهبوط خلال مراحل الضخ المختلفة.

أولاً: طريقة الميل الخط المستقيم
معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

معامل فواقد البئر

$$C = 1.5 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 1.5 \times 10^{-7} \times 2000 = 3.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{0.8}{2000} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 1.0 \times 10^{-4} + 3.0 \times 10^{-4} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

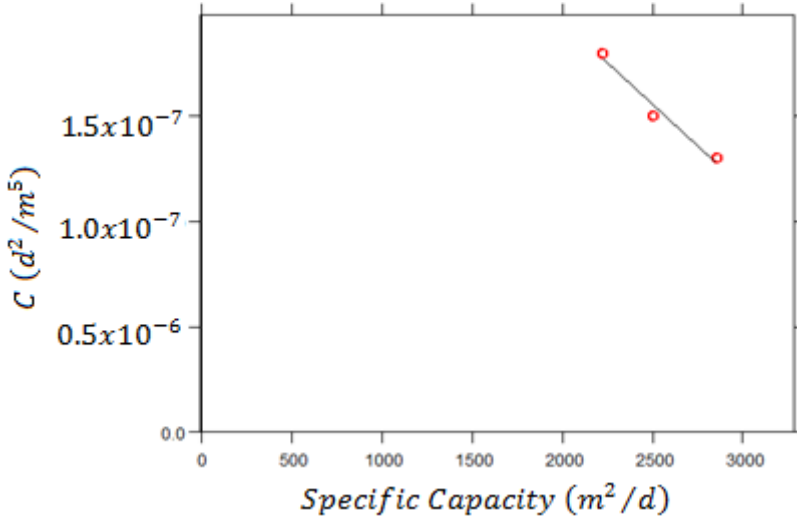
كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{4.0 \times 10^{-4}} \times 100 = 25.0\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2000}{0.8} = 2500 \text{ m}^2/\text{d}$$

يعد الانخفاض الكبير في السعة المحددة أثناء الاختبار التدريجي أمراً شائعاً في الآبار التي تظهر خسائر كبيرة في الآبار High well losses. وهنا لابد من الإشارة إلى تحليلات البيانات المستمدة من تحليلات الاختبارات إلى وجود علاقة ما بين مخطط السعة المحددة Q/s_w ومعامل خسارة البئر C ، هذه العلاقة يمثلها نمط تناقص ثابت فقد البئر مع زيادة السعة المحددة شكل (7.5).



شكل (7.5):- السعة المحددة ضد معامل فقد البئر.

الحالة الراهنة للبئر:-

إذا تم إجراء اختبارات الضخ المتدرج على آبار الضخ بعد مضي فترة زمنية فيمكن تحديد ما إذا كان البئر قد تدهور أم لا، وما إذا كانت إعادة التأهيل مطلوبة. ولتقييم حالة البئر يستلزم تحديد قيم ثابت فاقد طبقة المياه الجوفية وثابت فقد البئر وبناءً على تصنيف Bierschenk 1963 جدول (2.2) والعالم Walton 1962 جدول (3.1) تصنف حالة البئر اعتماداً على تقدير المعاملات التالية:-

- عامل فعالية تطوير البئر (DF) Development factor

- درجة تدهور البئر Well deterioration

أولاً: عامل فعالية تطوير البئر

$$B = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2 \quad C = 1.5 \times 10^{-7} d^2/m^5$$

$$DF = \frac{C}{B} = \frac{1.5 \times 10^{-7}}{1.0 \times 10^{-4}} = 1.5 \times 10^{-3} d/m^3$$

يتم التحكم في تقييم عامل فعالية تطوير البئر من خلال قيم المعامل B و C ، وبالرجوع إلى قيمة عامل الفعالية بالبئر $DF = 1.5 \times 10^{-3} d/m^3$ ووفقاً لتصنيف 1963 Bierschenk جدول (2.2) فإن درجة تطور البئر المختبرة فعالة للغاية.

ثانياً: درجة تدهور البئر

اقترح العالم والتون أن يتم تقييم درجة تدهور البئر باستعمال قيم ثابت فقدان البئر C كمعيار ومقياس، وبالتالي فإن قيمة C للبئر المستقر والمطور بشكل صحيح تقل عموماً عن $5 \times 10^{-6} ftgpm^2$ أو ثانية²/قدم⁵، بينما تُشير قيم C ما بين 1 إلى 10 ثانية²/قدم⁵ إلى تدهور بسيط مع انسداد فتحات المصفاة بعد الضخ الثقيل، وعندما تكون قيمة C أكبر من 10 ثانية²/قدم⁵ يكون الانسداد شديداً.

يتم التحكم في ثابت فقد البئر C من خلال نصف قطر البئر وتطورها وحالتها الفنية، ووفقاً لتصنيف ثابت فقد البئر عبر والتون 1962 Walton بالجدول (3.1)، وبالنظر إلى الارتباط بين ظروف البئر وقيم المعامل $d^2/m^5 < 2.5 \times 10^{-7} C$ يبدو أن الحالة الراهنة للبئر المختبرة قد تم تصميمها وتطويرها بشكل مناسب.

ثانياً: طريقة الزاوية

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$Laminar\ loss\ BQ = \angle BQ = 8^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$Turbulent\ loss\ CQ^2 = \angle CQ^2 = 24^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$Total\ losses\ \angle s_w = 32^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{8^\circ}{32^\circ} \times 100 = 25.0\%$$

لتقييم أداء البئر تم تحليل البيانات باستخدام الطريقة الرسومية وتقنية الانحدار وبناءً على نتائج دراسة الهبوط المرتبط بمعدلات الضخ المرحلية يمكن الاستنتاج بأن:-

- للبئر قيمة متوسطة لمعاملات فقد الخزان الجوفي B تقدر بحوالي $1.0 \times 10^{-4} d$ / m^2 ، بينما متوسط معاملات فقد البئر C هي: $1.5 \times 10^{-7} d^2 / m^5$.

- يتأثر الهبوط بشكل رئيسي بمكون خسارة البئر مقارنة بمكون خسارة الخزان الجوفي. ومن جانب آخر يلاحظ في هذه البئر أن السحب يتأثر بمكون فقد البئر وذلك عند الضخ بمعدل تصريف مرتفع خاصة خلال مرحلة الضخ الرابعة.

- تتباين قيم السعة النوعية والكفاءة من 2857 إلى 2222 م²/يوم، ومن 27% إلى 22% على التوالي.

مثال (7.2):-

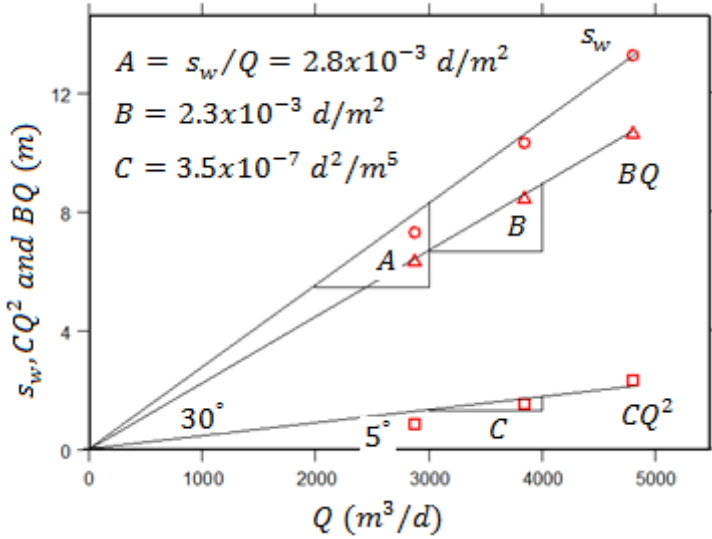
من معلومات بئر الضخ المسجلة بالجدول أدناه، المطلوب تعيين كفاءة البئر.

جدول (7.2):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة القدرة النوعية ومقلوب القدرة النوعية (المصدر: (2012 Maged El Osta).

$E_w \%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	C (d^2/m^5)	B (d/m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
88.7	0.83	6.3	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	7.3	2880	1
84.8	1.5	8.4			2.7×10^{-3}	10.3	3840	2
82.2	2.3	10.6			2.8×10^{-3}	13.25	4800	3

الحل:-

متوسط بيانات مراحل الضخ المختلفة



شكل (7.6):- متوسط قيم نتائج الضخ على ثلاثة مراحل مختلفة التصريف.

أولاً: طريقة معامل الميل

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{2.3}{1000} = 2.3 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

معامل فواقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.35}{(1000)^2} = 3.5 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 5.0 \times 10^{-7} \times 1000 = 5.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{2.8}{1000} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{S_w}{Q} = B + CQ = 2.3 \times 10^{-3} + 5.0 \times 10^{-4} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{S_w/Q} \times 100 = \frac{2.3 \times 10^{-3}}{2.8 \times 10^{-3}} \times 100 = 82.1\%$$

$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{2.3 \times 10^{-3}}{2.3 \times 10^{-3} + 5.0 \times 10^{-4}} = 82.1\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{S_w} = \frac{1000}{2.8} = 357.1 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثانياً: طريقة الزاوية

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 30^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 5^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \angle S_w = 35^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{30^\circ}{35^\circ} \times 100 = 85.7\%$$

7.3 طريقة تقدير الميل من نقطة ما على الخط المستقيم:-

لقد تم في هذا الفصل شرح طريقة ميل الخط السابقة بصورة تختلف بعض الشيء عن هذه الطريقة، والتي فيها يتم تحديد قيم الميل من نقطة تقاطع التصريف المحدد مع كل من خط مسار الانخفاض الكلي، خسارة طبقة المياه الجوفية وخسائر البئر على التوالي. وللتحقق من صحة هذه الطريقة يجب قياس الزوايا المكونة لبيانات فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر.

من هذه الطريقة يمكن عقد مقارنة بين عدد من التصريفات التي تعمل بها البئر خلال تجربة الضخ المتدرج متعدد المراحل والتي منها يستطيع الباحث اختيار التصريف الأمثل الذي يجب أن تعمل وتضخ به البئر للوصول إلى نظام الكفاءة التشغيلية المثلى وذلك مع أقل انخفاض ممكن في المنسوب، وبهذه الكيفية نتجنب إجهاد طبقة المياه الجوفية وخسائر مكونات البئر التي سوف يأتي شرحها في الفصل التاسع. تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر أفقياً مقابل قيم الانخفاض في المنسوب، فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر رأسياً على ورق رسم بياني.

- صل نقاط البيانات المذكورة في الفقرة الأولى بخط مستقيم ينتهي عند نقطة الصفر وهي نقطة تقاطع المحور الأفقي والرأسي شكل (7.7).

- اختر من الخط الأفقي نقطة ما تحدد تصريف البئر المقترح، ومنها نقيم خط عمودي يوازي المحور الرأسي لقيم الانخفاض الكلي، خسارة طبقة المياه الجوفية وخسائر البئر.

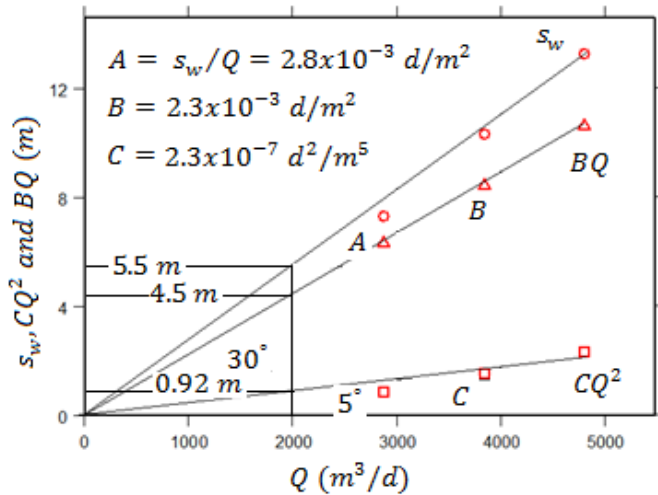
- حدد من المحور الرأسي قيم الانخفاض الكلي في المنسوب، خسارة طبقة المياه الجوفية وخسائر البئر وذلك من نقطة تقاطع الخط العمودي مع الخط المستقيم لبيانات الضخ المتدرج.

- أحسب قيمة معامل خسارة طبقة المياه الجوفية وخسارة البئر، هذا بالإضافة إلى قيمة الانخفاض النوعي من قيمة تصريف البئر المختارة.
 - أحسب كفاءة البئر من قسمة قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي على الانخفاض التراجعي النوعي في مستوى سطح الماء (معكوس السعة النوعية)، وتقرأ الكفاءة عندما يتم التعبير عنها كنسبة مئوية من المعادلة (7.5).
- مثال (7.3):-

من معلومات البئر بالجدول (7.2)، المطلوب تقدير كفاءة البئر والسعة النوعية.

الحل:-

أولاً: عند ضخ البئر بمعدل تصريف 2000 متر³/يوم عندها تبلغ قيمة الهبوط الخيالي بالخزان الجوفي حوالي 4.5 متر والهبوط الكلي في المنسوب بالبئر 5.5 متر مما يعني أن فقد البئر 0.92 متر وهو ذات قيمة قليلة مقارنة مع الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي مما يعني أن البئر ذات كفاءة عالية.



شكل (7.7):- متوسط معلومات البئر خلال مراحل الضخ المختلفة وذلك عند ضخ البئر بمعدل 2000 متر مكعب لكل يوم.

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$\begin{aligned} \text{The coefficient of aquifer loss } B &= \frac{BQ}{Q} = \frac{4.5}{2000} \\ &= 2.3 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2 \end{aligned}$$

معامل فاقد البئر

$$\begin{aligned} \text{The coefficient of well loss } C &= \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.92}{(2000)^2} \\ &= 2.3 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5 \end{aligned}$$

$$CQ = \frac{CQ^2}{Q} = \frac{0.92}{2000} = 4.6 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{5.5}{2000} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

$$s_w/Q = B + CQ = 2.3 \times 10^{-3} + 4.6 \times 10^{-4} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

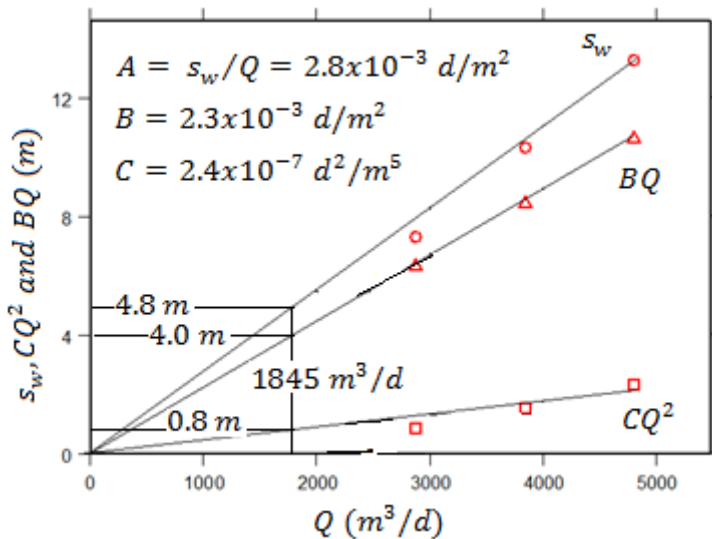
$$E_w = \frac{B}{B + C} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{2.3 \times 10^{-3}}{2.8 \times 10^{-3}} \times 100 = 82.1\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2000}{5.5} = 363.6 \text{ m}^2/\text{d}$$

يتضح أنه عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي 2000 م³/يوم عندها تبلغ كفاءة البئر 82.1% وهي أقل من الكفاءة المثلى، وعليه يجب تقليل كمية تصريف البئر لتزداد كفاءة البئر.

ثانياً: عند ضخ البئر بمعدل تصريف 1845 متر³/يوم عندها تبلغ قيمة الهبوط بالخران الجوفي 4.0 متر والهبوط الكلي في المنسوب بالبئر 4.8 متر مما يعني أن قفد البئر 0.8 متر وهو ذات قيمة قليلة مقارنة مع الهبوط في المنسوب بالخران الجوفي وهو مؤشر جيد يدل على أن البئر ذات كفاءة عالية.



شكل (7.8):- متوسط معلومات البئر خلال مراحل الضخ المختلفة وذلك عند ضخ البئر بمعدل 1845 متر مكعب لكل يوم.
معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{4}{1845} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

معامل فاقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.8}{(1845)^2} = 2.4 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = \frac{CQ^2}{Q} = \frac{0.8}{1845} = 4.3 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{4.8}{1845} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 2.2 \times 10^{-3} + 4.3 \times 10^{-4} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{B + C} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{2.6 \times 10^{-3}} \times 100 = 84.6\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{1845}{4.8} = 384.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

الخلاصة:-

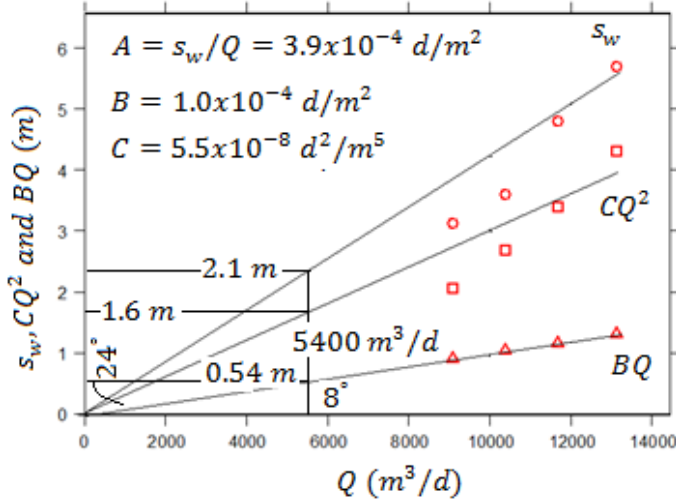
يلاحظ أنه عند ضخ البئر بمعدل تصريف 2000 م³/يوم كانت الكفاءة والسعة النوعية 82.0% و 363.6 م²/يوم على التوالي، بينما زادت الكفاءة والسعة النوعية عند تقليل كمية التصريف إلى حد 1845 م³/يوم، ولكن ومع ذلك لم تصل البئر إلى كفاءتها المثلى . هذه النتيجة توضح أنه يجب تقليل كمية التصريف إلى حد معقول أقل من 1845 م³/يوم، ولتحديد كمية التصريف المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر لتصل إلى كفاءتها المثلى راجع الفصل التاسع.

مثال (7.4):-

من معلومات البئر المسجلة بالجدول (7.1) المطلوب تقدير كفاءة البئر والسعة النوعية.

الحل:-

متوسط بيانات مراحل الضخ المختلفة



شكل (7.9):- يوضح بيانات متوسط الهبوط خلال مراحل الضخ المختلفة وذلك عند ضخ البئر بمعدل 5400 متر مكعب لكل يوم.

$$BQ = 0.54 \text{ m} \quad CQ^2 = 1.6 \text{ m} \quad s_w = 2.1 \text{ m}$$

أولاً: طريقة الميل عند نقطة مختارة على الخط المستقيم

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$= \frac{0.54}{5400} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

معامل فواقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{(Q)^2} = \frac{1.6}{(5400)^2} = 5.5 \times 10^{-8} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 5.5 \times 10^{-8} \times 5400 = 3.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{2.1}{5400} = s_w/Q = 3.9 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 1.0 \times 10^{-4} + 3.0 \times 10^{-4} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{\text{Coefficient of aquifer loss } B}{\text{Specific drawdown } s_w/Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{3.9 \times 10^{-4}} \times 100 = 25.6\%$$

$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{3.9 \times 10^{-4}} \times 100 = 25.6\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{5400}{2.1} = 2571.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثانياً: طريقة الزاوية

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = BQ = 8^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = CQ^2 = 24^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } s_w = 32^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w \% = \frac{8^\circ}{32^\circ} \times 100 = 25.0\%$$

الفصل الثامن

الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي والبنر

Hydraulic Properties of Aquifer and Well

8.1 تحليل بيانات اختبار الضخ:- Analysis of pumping test data

في حالة انخفاض كفاءة البئر يتطلب إجراء فحص الحالة الفنية للبئر، ولهذا الغرض يتم استخدام الطرق والاختبارات الهيدروليكية، وهي طريقة معاملة تعتمد على اختبارات الضخ التي يتم إجراؤها في البئر بهدف تقييم أخطاء البناء أو التغييرات التي حدثت أثناء استغلال البئر، وتسمح هذه الاختبارات بتحديد الآبار التالفة.

يقدم هذا الفصل طرقاً بارامترية جديدة تهتم بتحديد الحالة الهيدروليكية المثلى للخران الجوفي والبئر وبالتحديد حول مصفاة البئر. وتهتم هذه الطرق بتقدير معاملات الخزان الجوفي وذلك عند وصول البئر إلى مرحلة الثبات التي عندها تنعدم فواقد البئر ويكون التدفق نحو البئر رقائقياً، وفي المرحلة من الضخ يحتم على جيولوجي الحقل التحكم في تحديد القيمة المثلى لفقد الخزان الجوفي وكمية التصريف المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر وهو مؤشر يوضح أن البئر وصلت إلى كفاءتها العظمى، هذا بالإضافة إلى تحديد قيم معامل فاقد الخزان الجوفي ومعامل فقد البئر. وفي نفس الوقت تتجنب هذه الطرق الخسائر المرتبطة بالتدفق المضطرب.

تسمح هذه الطرق الجديدة بتقييم أخطاء البناء أو التغييرات التي حدثت أثناء استغلال المدخول وتسمح بتحديد الآبار التالفة، وأيضاً تدرس هذه الطرق الحالة الراهنة للبئر، ففي حالة انخفاض الكفاءة يتم إجراء فحص للحالة الفنية الجيدة باستخدام الطرق والاختبارات الهيدروليكية، وفيها تتم مراقبة الحالة الفنية للآبار باستخدام طرق معاملة تعتمد على اختبارات الضخ التي يتم إجراؤها في البئر. يسمح تفسير النتائج بتحديد كل من المعاملات الهيدروجيولوجية لطبقة المياه الجوفية والمعاملات الهيدروليكية للبئر، ويسمح اختبار الضخ بما يلي:-

- تحديد خصائص التفاعل: البئر - الخزان الجوفي.
- فحص البئر من حيث الاستغلال الأمثل.

- تقييم كمي لخصائص الطبقة الحاملة للمياه الجوفية.
- يتم استخدام تطبيق نتائج هذه الطرق الجديدة واختبار الآبار الهيدروليكية لاختيار طرق ترميم البئر.

في هذا الفصل جرت عدة محاولات لمعرفة العلاقة بين هذه المعاملات الهيدروليكية لغرض الإدارة السليمة للخزان الجوفي والبئر. ومن اختبارات السحب التدريجي يتم تحليل البيانات الهيدروجيولوجية لآبار المياه، ففي حالة أن قيم فقد البئر CQ^2 تكون أصغر مقارنةً بقيم فقد التكوين BQ عندها يكون الخزان الجوفي تحت ضغط له سلوك الخزان الجوفي المتسرب Leaky aquifer، لذلك فإنه يظهر اتصال هيدروليكي مع التكوينة المحيطة. وعلاوة على ذلك ومن بيانات الضخ يتم حساب معامل فاقد الخزان الجوفي B وثابت خسائر الآبار C ، ففي حالة أن قيم B تكون أصغر من قيم C ، فهذا دليل يشير إلى أن الطبقة الحاملة للمياه الجوفية تحت ضغط يشابه سلوك طبقة المياه الجوفية المتسربة لذلك فإنه يظهر سلوك اتصال هيدروليكي مع التكوينة المحيطة.

8.2 تقدير كمية التصريف المثلى:- Estimation of the optimal amount of discharge

يؤدي الاختيار الصحيح لمعدل الضخ الأمن إلى زيادة عمر البئر والحد من تكاليف الضخ من خلال تقليل خسائر دخول المياه في مصفاة البئر الذي يحد من حدوث مكونات فقدان البئر. تسعى هذه الطريقة إلى ضخ البئر بمعدل تشغيلي تكون فيه حركة المياه نحو البئر في خطوط مستقيمة ومتوازية وغير متداخلة مع بعضها، وفي هذه اللحظة من الضخ تنعدم فواقد البئر. وللتأكد من صحة هذه الطريقة تستخدم قيم معامل الخسارة B و C بالإضافة إلى قيمة السحب الأمن أو فاقد الخزان الجوفي الأمثل بهدف تقدير أي معدل ضخ أو معدل الضخ الأمن من المعادلة الرياضية على النحو التالي:-

$$Q = \frac{S_{wopt.}}{B + CQ} = \frac{BQ_{opt.}}{B + CQ} \dots \dots \dots (8.1)$$

حيث أن:-

$S_{wopt.}$ = القيمة المثلى للهبوط في المنسوب بالمتر.

$BQ_{opt.}$ = القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي بالمتر.

ومن أهم الطرق التي يتم تطبيقها لتقدير كمية التصريف المثالية ما يلي:-

أولاً: طريقة التصريف والهبوط الكلي في المنسوب:-

تعتمد هذه الفكرة على نقطة تقاطع بيانات الهبوط في المنسوب مع محور التصريف الأفقي عند النقطة B التي تكون فيها قيمة الانخفاض في المنسوب تساوي صفر شكل (8.1). من الناحية المثالية، ترشدنا هذه الطريقة على ثبات مستوى سطح الماء بسبب وصول الطبقة المائية إلى مرحلة من الانسياب المتوازن والمتساوي بالخزان الجوفي وداخل البئر. ومن تحليل المعلومات الحقلية عن طريق تصحيح بيانات تصريف البئر والانخفاض في المنسوب فإنه يمكن تقدير واحد من أهم المعاملات الهيدروليكية وهي أن ضخ البئر بمعدل التصريف الأمثل $Q_{opt.}$ تنعدم مكونات فقد البئر مما يعني وصول البئر إلى كفاءتها العظمى.

متطلبات تطبيق الطريقة:-

لتحديد نقطة تقاطع بيانات تصريف البئر مع القيمة المثلى للهبوط في المنسوب نتبع الخطوات الآتية:-

- وقع قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم لوغاريتمي مقابل قيم الهبوط رأسياً على مقياس رسم حسابي شكل (8.1).
- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الأفقي للتصريف ونقرأ فيه قيمة التصريف المثلث عند نقطة التقاطع B التي عندها تكون قيمة الهبوط تساوي صفر $(0 - Q_{opt.})$.

ملاحظة:-

تساعد هذه الطريقة في تقدير القيمة المثالية لتصريف البئر حتى نتفادى حدوث مكونات فقد البئر التي تقلل من كفاءة البئر وتزيد من تكلفة التشغيل، ولكن ينقص هذه الطريقة هو عدم إمكانية تعيين قيمة الهبوط المثلث التي تتوافق مع كمية التصريف المثلث.

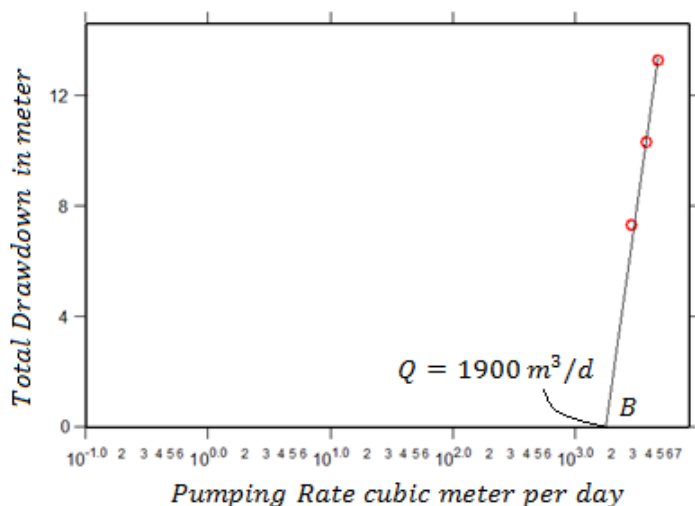
مثال (8.1):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول أدناه، أوجد كمية الضخ المثلث التي يجب أن تعمل بها البئر.

جدول (8.1):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة مقلوب القدرة النوعية (المصدر: (2012 Maged El Osta).

المرحلة	$Q (m^3/d)$	$s_w (m)$	$BQ (m)$	$CQ^2(m)$	$E_w\%$
1	2880	7.3	6.3	0.83	88.7
2	3840	10.3	8.4	1.5	84.8
3	4800	13.25	10.6	2.3	82.2

الحل:-



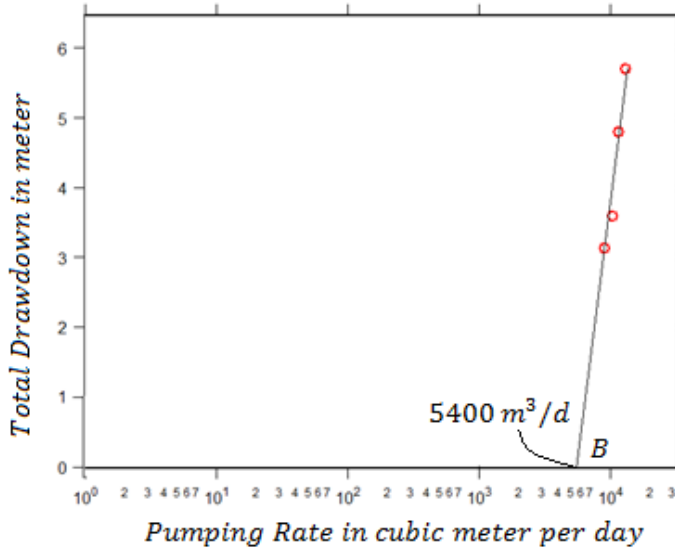
شكل (8.1):- يوضح القيمة المثالية للضخ وذلك من قيم تصريف البئر مقابل الهبوط. يرشدنا الشكل أعلاه بأنه يجب ضخ هذه البئر بمعدل تشغيلي تنعدم فواقد البئر وفي هذه الحالة تكون الفرصة مؤاتيه ليتطابق مستوى الماء بالخزان الجوفي مع مستوى الماء داخل البئر، وفي هذه الحالة لا توجد خسائر داخل البئر. وتصف هذه المرحلة من الضخ نتائج معاملات التدفق عند ظروف التدفق الثابت والتي فيها تم الحصول على قيمة التصريف الأمثل من خلال البحث عنها باستخدام الاستقراء شبه اللوغاريتمي للبيانات المقاسة، وفيها تم تحديد كمية الضخ المثلى بأنها تعادل 1900 م³/يوم. مثال (8.2):-

من معلومات بيانات البئر بالجدول أدناه. أوجد كمية الضخ المثلى. جدول (8.2):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة كفاءة البئر (المصدر: 2018 Yosef Aregaw).

المرحلة	$Q (m^3/d)$	$s_w (m)$	$BQ (m)$	$CQ^2 (m)$	$E_w \%$
1	9072	3.13	0.91	2.06	29.1
2	10368	3.6	1.04	2.69	28.9

24.4	3.40	1.17	4.8	11664	3
23.0	4.31	1.31	5.7	13132.8	4

الحل:-



شكل (8.2):- يحدد قيمة التصريف المثلى على ورقة الرسم شبه اللوغاريتمية. من الشكل أعلاه كمية التصريف المثلى Q_{opt} . تقدر بحوالي 5400 متر مكعب لكل يوم على مقياس رسم لوغاريتمي وعلى المحور الأفقي، وهي التي يجب أن تضخ بها البئر حتى تنعدم فواقد البئر، وفي هذه المرحلة من الضخ تكون الفرصة مؤاتية لسريان المياه نحو فتحات مصفاة البئر أفقياً ليتطابق مستوى الماء بالخزان الجوفي مع مستوى الماء داخل البئر وفيها تصل البئر إلى كفاءتها العظمى.

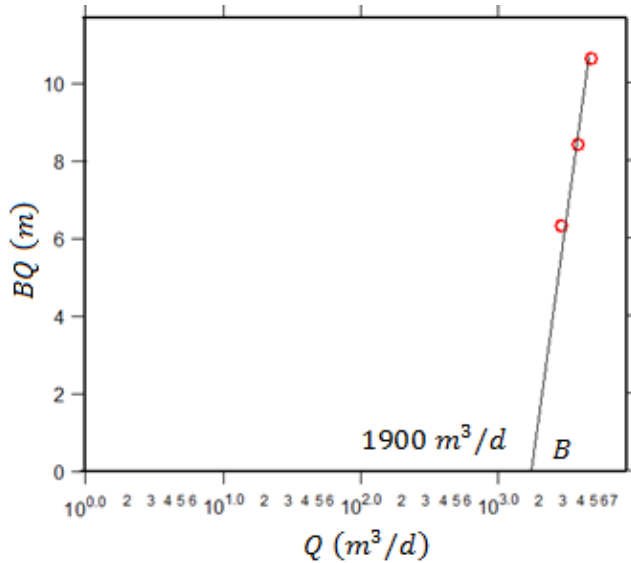
ثانياً: طريقة التصريف مقابل قيم فاقد الطبقة المائية

تعرض هذه الطريقة نتائج الاختبارات الهيدروليكية الميدانية متعددة المراحل بمنهجية متطورة تسمح باختيار معدل الضخ الأمثل الذي لا تحدث فيه زيادة مفاجئة في الخسائر الهيدروليكية لمصفاة البئر.

ضوابط تطبيق الطريقة:-

- تم رسم القيم المحسوبة لـ BQ مقابل القيم المقابلة لـ Q على ورق الرسم شبه اللوغاريتمي شكل (8.3). ينتج من مخطط البيانات هذا خطاً مستقيماً يتقاطع مع المحور الأفقي عند النقطة B التي تشير إلى ثابت كمية الضخ المثلى Q_{opt} .
 - وقع قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم شبه لوغاريتمي مقابل قيم فاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية رأسياً على مقياس رسم حسابي شكل (8.3).
 - أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.
 - مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الأفقي لنقرأ قيمة التصريف المثلى وذلك عندها تكون قيمة فاقد الطبقة المائية تساوي صفر $(0 - Q_{opt})$.
- مثال (8.3):-

من معلومات بيانات البئر بالجدول (8.1). أوجد كمية الضخ المثلى.
الحل:-



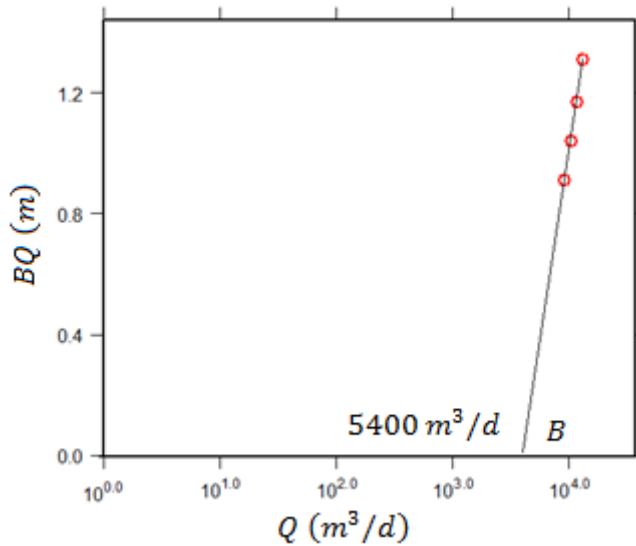
شكل (8.3):- قيم تصريف البئر وفاقد الخزان الجوفي.

يوضح الشكل أعلاه مسار الضخ الصحيح للبئر بدليل أن نتائج معاملات التدفق تصف ظروف التدفق الثابت عند الضخ بمعدل تشغيلي أمثل يبلغ حوالي 1900 م³/يوم.

مثال (8.4):-

مستعيناً بالمعلومات الفنية الواردة بالجدول (8.2) أحسب كمية الضخ المثلى التي تعمل بها البئر حتى نتفادى حدوث مكونات فقد البئر التي تؤثر سلباً على كفاءة البئر.

الحل:-



شكل (8.4):- قيم تصريف البئر وفاقد الخزان الجوفي.

تم الحصول على القيمة المثلى 5400 م³/يوم التي تم البحث عنها باستخدام الاستقراء شبه اللوغاريتمي للبيانات المقاسة.

ثالثاً: التصريف مقابل قيم فقد البئر

تشير الدراسات الميدانية إلى أن الخسائر غير الخطية تزداد مع زيادة معدل الإنتاج عند الحد الأمثل، وبدليل أن الخسائر غير الخطية الكبيرة تساهم في المزيد من الهبوط ببئر الضخ. للحد من الخسائر غير الخطية يجب تحديد كمية التصريف المثلى التي

عندها تنعدم مكونات فقد البئر مما يعني وصول البئر إلى كفاءتها العظمى، والتي يمكن الوصول إليها من خلال تطبيق الشروط التالية:-

ضوابط تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم حسابي أو شبه لوغاريتمي مقابل قيم فقدان البئر رأسياً على مقياس رسم حسابي شكل (8.5).

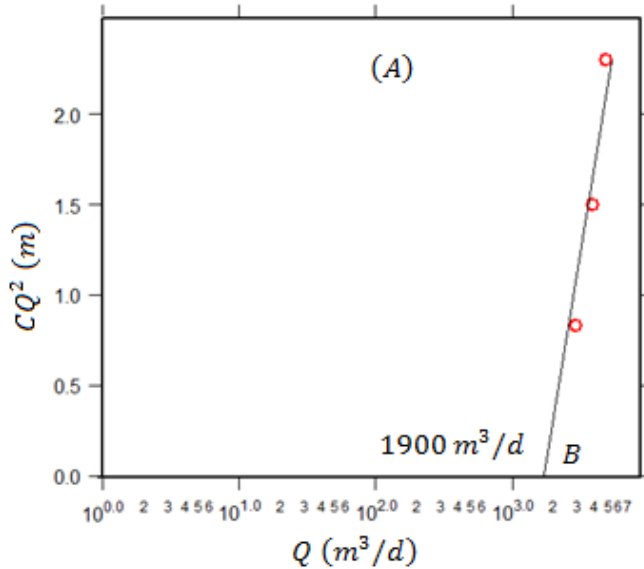
- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

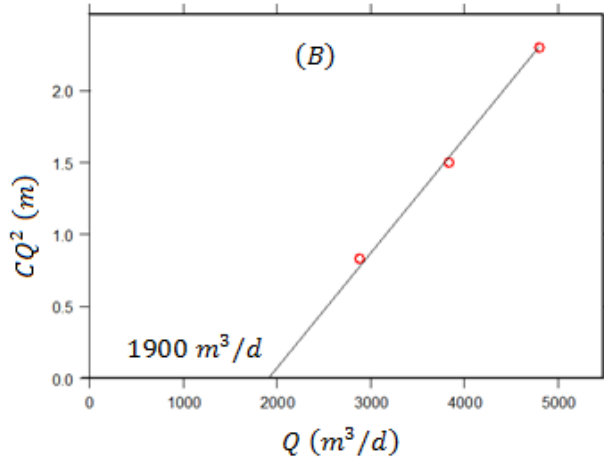
- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الأفقي لنقرأ قيمة التصريف المثلى والتي عندها تكون قيمة فواقد البئر تساوي صفر $(0 - Q_{Opt.})$.

مثال (8.5):-

مستعيناً بالمعلومات الحقلية الجدول (8.1) أحسب كمية الضخ المثلى.

الحل:-

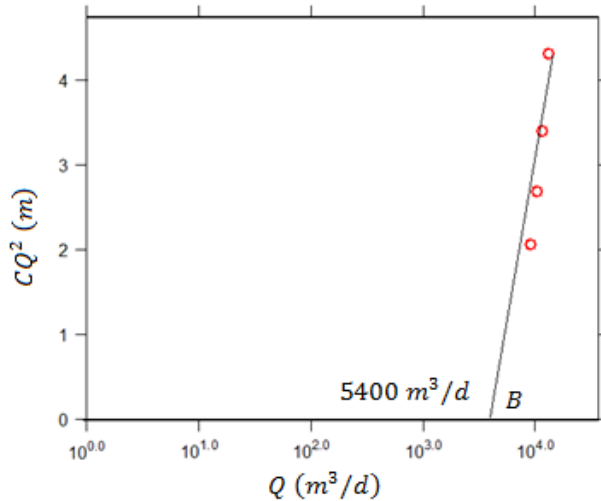




شكل (8.5):- كمية التصريف أفقياً مقابل فقد البئر رأسياً: (A) ورقة رسم شبه لوغاريتمي (B) ورقة رسم بياني.

لضمان سلامة البئر يجب أن تضخ بمعدل أمثل يصل إلى حوالي 1900 م³/يوم.
مثال (8.6):-

من معلومات بيانات البئر الجدول (8.2) أوجد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر.



شكل (8.6):- كمية التصريف أفقياً مقابل فقد البئر رأسياً.

من الشكل أعلاه المعدل الأمثل للضخ هو: 5400 م³/يوم.

8.3 تقدير قيمة فاقد الطبقة المائية:-

تعتبر طريقة التحكم في ضبط كفاءة البئر للوصول بها إلى الحد الأمثل من الضخ مقدمة هامة تمهد الطريق لتقدير القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي BQ ، حيث تخبرنا هذه القيمة عن تلك العلاقة التي تربط بينها وبين معامل فاقد الخزان الجوفي. ووفق هذه الدارسة فإن تقدير القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي بات ممكناً عند تطبيق عدد من الطرق الآتية:-

أولاً: طريقة تصريف البئر مع فاقد الطبقة المائية:-

تعد هذه الطريقة فعالة لعزل فاقد البئر من إجمالي الخسائر في البئر، وفيها يتم تحديد لحظة وصول البئر إلى حالة الثبات التي فيها تتساوى مناسيب المياه بالخزان الجوفي وداخل البئر. وفي هذه المرحلة من الضخ يصبح فاقد الخزان الجوفي الأمثل هو المسيطر على الوضع الهيدروجيولوجي، مما يعني انعدام ظاهرة فقد البئر. ولضمان وصول البئر إلى كفاءتها العظمى يتعين على جيولوجي الحقل تحديد كمية تصريف البئر التي تقابلها القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي BQ_{opt} . وتنعدم فيها فواقد البئر وهو دليل يؤكد على أن البئر وصلت إلى كفاءتها العظمى. شروط تطبيق الطريقة:-

لتحديد نقطة تقاطع بيانات تصريف البئر مع القيمة المثلى لفاقد الطبقة المائية نتبع الخطوات الآتية:-

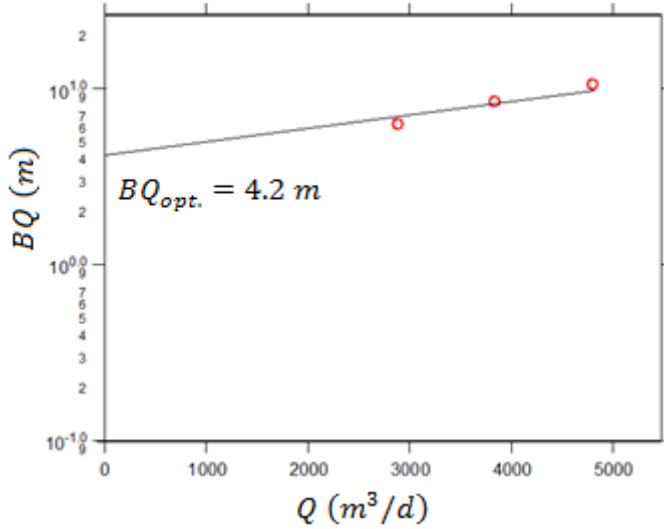
- وقع قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم فاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية رأسياً على مقياس رسم لو غاريثمي شكل (8.7).
- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور فاقد الطبقة المائية (المحور الرأسي) ونقرأ فيه قيمة فاقد الطبقة المائية المثلى عند نقطة التقاطع التي عندها تكون قيمة التصريف تساوي صفر ($0 - BQ_{opt.}$).

ملاحظة:-

تعتبر هذه الطريقة مقدمة تساعد المتخصصون في المياه الجوفية والطلاب الذين يحلون نفس البيانات الحقلية من تعيين القيمة المثالية لمعامل فاقد الخزان الجوفي، ولكن من سلبيات هذه الطريقة هو صعوبة تحديد كمية التصريف المثلى. مثال (8.7):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول (8.1)، المطلوب تقدير القيمة المثلى لفاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية.
الحل:-



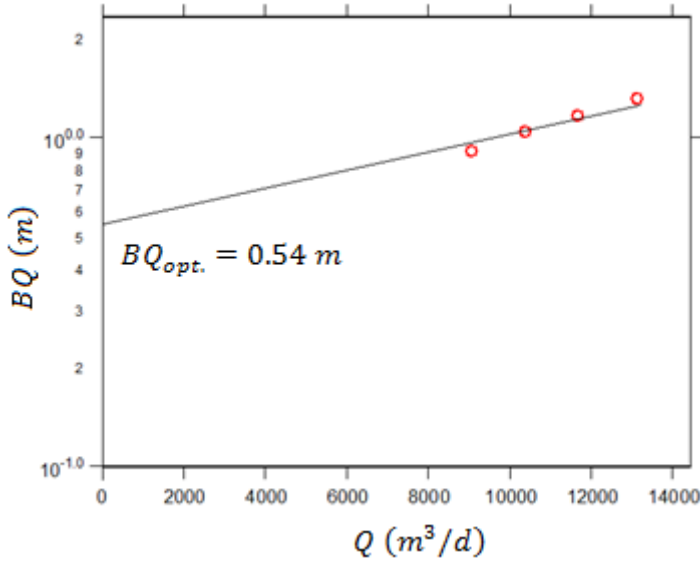
شكل (8.7):- تظهر الطريقة الرسومية لبيانات اختبار الضخ المتدرج تلك العلاقة التي تربط بين التصريف و فاقد الخزان الجوفي.

تشير العلاقات الراسخة بين فاقد الخزان الأمثل مع كمية الضخ إلى ارتباط واضح مع الهبوط الأمثل، وبناءً على النتائج المذكورة أعلاه يجب مراعاة الضخ بمعدل يتساوى فيه الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي وداخل البئر إلى مستوى يقدر بحوالي 4.2 متر عند تصميم هذه البئر وذلك من أجل الإدارة السليمة.

مثال (8.8):-

من معلومات بيانات البئر بالجدول (8.2). أوجد القيمة المثلى لفاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية.

الحل:-



شكل (8.8):- يوضح العلاقات التجريبية بين خسائر الخزان الجوفي وقيم تصريف البئر. ويلاحظ أن قدرًا معينًا من خسائر الخزان تتحقق عادةً إذا تم تنفيذ التصميم والتطوير بشكل مثالي.

من المعروف أن المقاومة الهيدروليكية الناتجة عن التدفق المضطرب في طبقة المياه الجوفية وفي منطقة البئر تسبب في المزيد من الهبوط (السحب). ولكن عند اتباع

موجهات الشكل الرسومي أعلاه يكون التدفق إلى البئر رقائقاً وفيه تبلغ قيمة فاقد الطبقة المائية المثلى حوالي 0.54 متر وهي نفس قيمة الهبوط الكلي الأمثل في المنسوب، ويرجع السبب إلى انعدام مكونات فقد البئر عند الضخ بهذا المقدار الذي يتطلب تقديره طريقة أخرى تشرح خلال هذا الفصل.

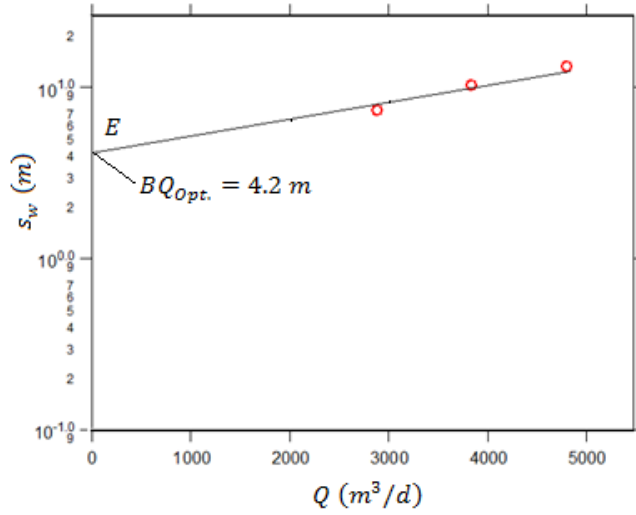
ثانياً: طريقة تصريف البئر والانخفاض الكلي في المنسوب:-

في هذه الحالة يتم الوصول إلى نقطة فاقد الخزان الجوفي المثلى عند وصول الطبقة المائية إلى مرحلة التوازن والثبات بسبب الجريان الأفقي والخطي حتى المنطقة المتاخمة لمصافي البئر. وفي هذه المرحلة من الضخ يتطابق منسوب الماء بالخزان الجوفي مع منسوب الماء داخل البئر، وبمعنى آخر يتساوى فاقد الخزان الجوفي الأمثل BQ_{opt} مع الهبوط الأمثل s_{wopt} في المنسوب وهو مؤشر جيد يوضح عدم وجود أي أثر لفوائد البئر في تلك اللحظة من الضخ. وترصد هذه النقطة من تقاطع بيانات تصريف البئر مع قيم الهبوط الكلي في المنسوب على المحور الرأسي وبالتحديد عند النقطة E التي تكون فيها قيمة التصريف تساوي صفر شكل (8.9).

شروط تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم الانخفاض في المنسوب رأسياً على مقياس رسم لوغاريتمي شكل (8.9).
 - أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.
 - مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور الانخفاض الكلي في المنسوب (المحور الرأسي) ونقرأ فيها قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى عند نقطة التقاطع E حيث قيمة التصريف تساوي صفر $(0 - s_w)$.
- مثال (8.9):-

من معلومات المثال (8.1) المطلوب تحديد القيمة المثلى لفقد الخزان الجوفي.

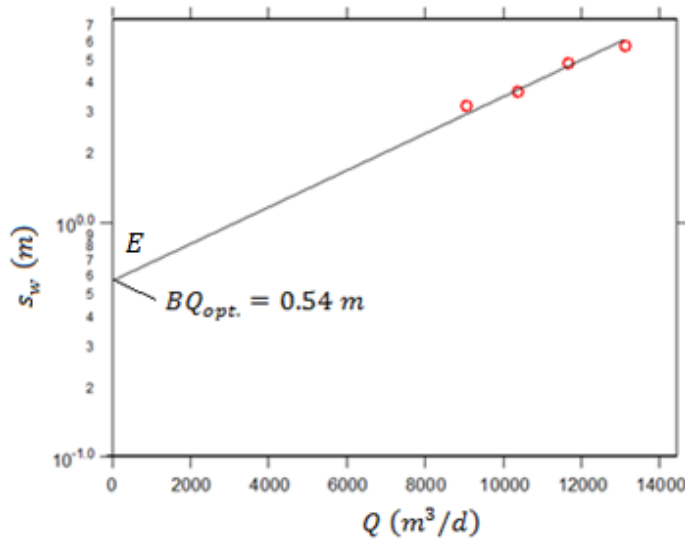


شكل (8.9):- يوضح القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي عند النقطة E .
 يفسر الاستقراء شبه اللوغاريتمي للبيانات المقاسة والمرسومة بالشكل أعلاه نتائج معاملات التدفق عند ظروف التدفق الثابت والتي فيها تم تحديد القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي بأنها تساوي حوالي 4.2 متر وهي نفس قيمة الانخفاض الأمثل في المنسوب، وعند هذه النقطة يتطابق مستوى الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي وداخل البئر لتتعدم مكونات فواقد البئر.

مثال (8.10):-

من معلومات البئر المسجلة بالجدول (8.2)، أوجد الآتي:-

- فاقد الخزان الجوفي الأمثل



شكل (8.10):- الهبوط في مستوى الماء الذي يعادل القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي عند الضخ بالمعدل الأمثل على ورقة الرسم شبه اللوغاريتمي.
- القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي

يخربنا الشكل أعلاه بأن قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى تساوي قيمة الهبوط وهي 0.54 متر، وهو دليل على تعافي الحالة الراهنة للبئر بسبب انعدام مكونات فقد البئر.

ثالثاً: طريقة الانخفاض الكلي في المنسوب و فاقد الخزان الجوفي:-

تعتبر من التجارب التي حاولت اكتشاف طريقة لتقدير معاملات الخزان الجوفي من خلال تحليل بيانات اختبار البئر المتدرج. وفي هذه الطريقة ترصد القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي عند نقطة تقاطع بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب مع قيم فاقد الخزان الجوفي على المحور الرأسي عند النقطة E التي تكون فيها قيمة الهبوط يساوي صفر شكل (8.11).

متطلبات تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم الانخفاض في المنسوب أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم فاقد الخزان

الجوفي رأسياً على مقياس رسم لوغاريتمي أو العكس.

- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور الانخفاض الكلي في المنسوب (المحور

الرأسي)، وفيه نقرأ القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي $BQ_{opt.}$ عند نقطة التقاطع E

حيث قيمة فاقد الخزان الجوفي تساوي صفر $(0 - s_w)$ شكل (8.11).

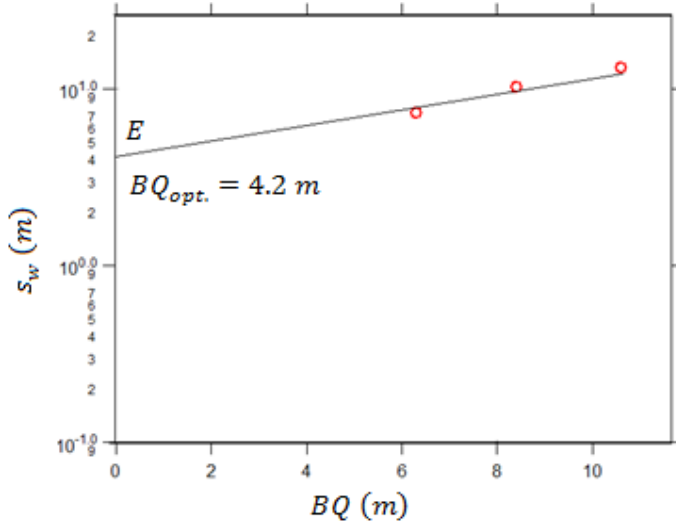
- أو مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور فاقد الخزان الجوفي (المحور الرأسي)

عند نقطة التقاطع E التي فيها نقرأ قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى، وذلك عند قيمة

الهبوط في المنسوب تساوي صفر $(0 - BQ)$ شكل (8.12).

مثال (8.11):-

من معلومات المثال (8.1) المطلوب تحديد القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي.



شكل (8.11):- توقع قيم فاقد الخزان الجوفي أفقياً مقابل الانخفاض في المنسوب

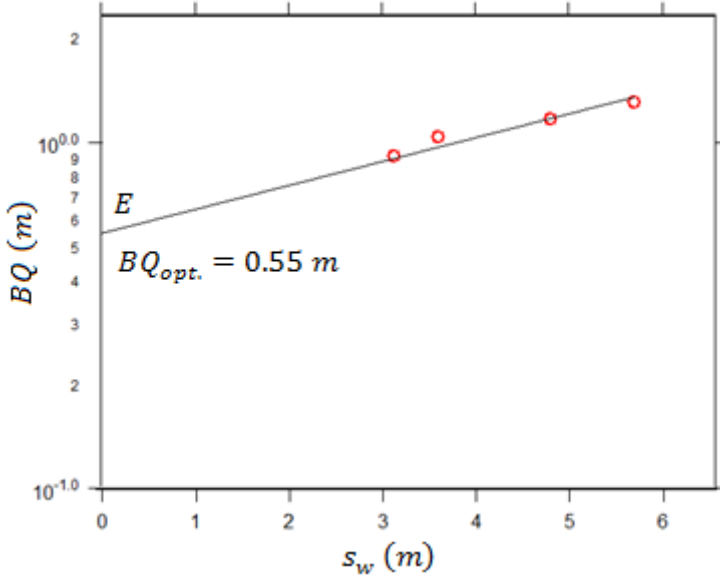
رأسياً، ومن الشكل توضح نقطة التقاطع E وصول البئر إلى مرحلة الثبات التي فيها

تتساوي قيم الانخفاض في المنسوب مع قيم فاقد الخزان الجوفي.

قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى تساوي 4.2 متر

مثال (8.12):-

من معلومات المثال (8.2) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي.



شكل (8.12):- يوضح قيم الانخفاض في المنسوب أفقياً مقابل فاقد الخزان الجوفي رأسياً، وفي هذا الشكل تصل البئر إلى مرحلة الاستقرار عند الضخ بمعدل مثالي تتساوى فيه قيم فاقد الخزان الجوفي مع قيم الانخفاض في المنسوب عند نقطة التقاطع E وبقية تصل إلى 0.55 متر.

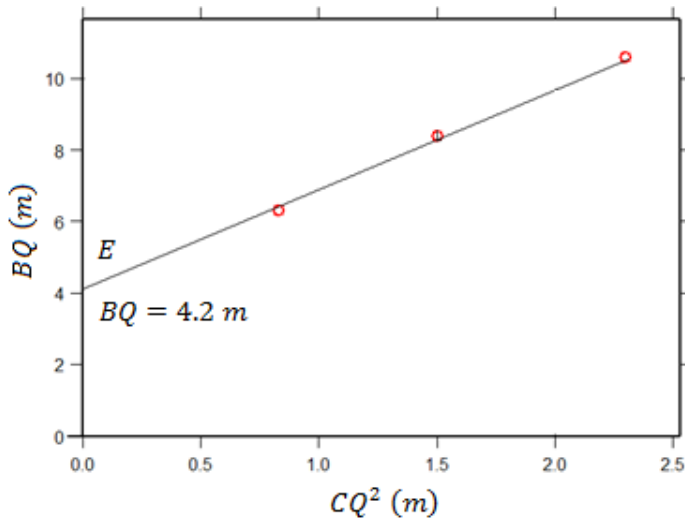
رابعاً: طريقة فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر:-

تتطلب الادارة الرشيدة والتصميم المناسب لأبار المياه بذل محاولات لتقليل خسائر الآبار الزائدة إلى أدنى حد ممكن. ومن هذا المنطلق يمكن قياس وجود هذه الخسائر من اختبارات أداء البئر، وعلى افتراض أن خسائر البئر غير الخطية لا تكاد تذكر، وفي هذه الحالة يقال إن البئر ذات كفاءة بنسبة 100 في المائة إذا لم تظهر خسائر في البئر.

متطلبات تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم فقد البئر أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم فاقد الخزان الجوفي رأسياً على ورق الرسم البياني الحسابي أو شبه اللوغاريتمي شكل (8.13 و 8.14).
 - أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.
 - مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور فاقد الخزان الجوفي (المحور الرأسي) والذي فيه نقرأ قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى عند نقطة التقاطع E ، وفي هذه المرحلة من الضخ تنعدم قيمة فقد البئر وتساوي صفر $(0 - BQ)$.
- مثال (8.13):-

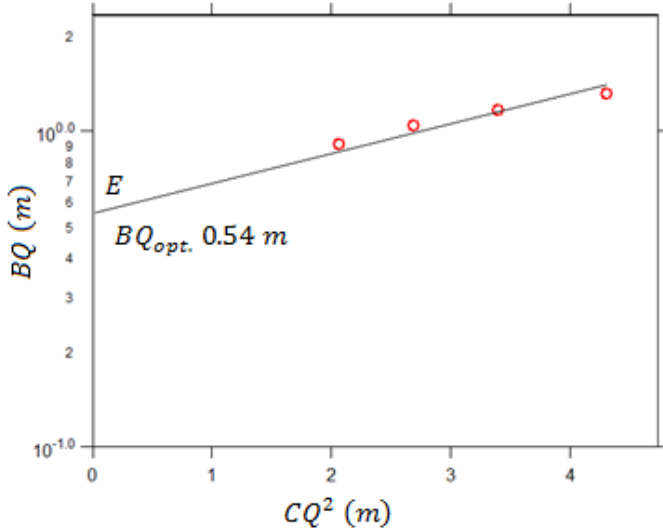
من معلومات المثال (8.1) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي



- شكل (8.13):- يوضح القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي على محور قيم فاقد الخزان الجوفي مقابل انعدام مكونات فقد البئر.
- تم الحصول على القيمة المثالية لفاقد الطبقة المائية من الطريقة الرسومية لبيانات اختبار الضخ التدريجي أعلاه وهي حوالي 4.2 متر.

مثال (8.14):-

من معلومات المثال (8.2) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفقد الخزان الجوفي



شكل (8.14):- يوضح مكونات فاقد الخزان الجوفي ومكونات فقدان البئر.

بعد دراسة طريقة التحكم في ضبط قيمة فاقد الخزان الجوفي عليه تم وضع هذا الافتراض بشكل مشابه للحالة الفعلية وبالتالي قد تعتبر النتائج شبه مثالية وممثلة تماماً للوضع الهيدرولوجي بحيث أن قيمة $BQ_{opt.}$ فاقد الخزان الجوفي المثلى $BQ_{opt.}$ تقدر بـ 0.54 متر.

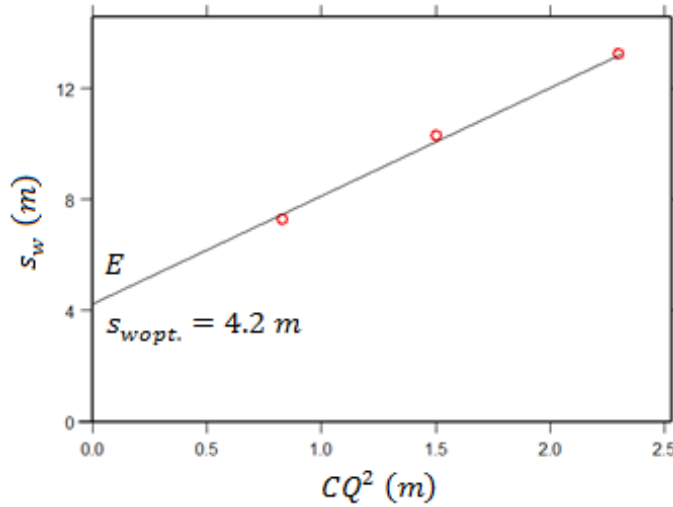
خامساً: طريقة الهبوط ومكونات فقد البئر

تدرس هذه الطريقة العلاقة التي تربط السحب الكلي في المنسوب مع فقد البئر، ومنها تقدر القيمة المثالية لفقد طبقة المياه الجوفية. شروط تطبيق الطريقة:-

- يتم توقيع بيانات اختبار الضخ والتي تمثل العلاقة بين فقدان البئر والهبوط على ورقة رسم حسابي شكل (8.15).

- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.
 - مد الخط الواصل بالنقاط ليتقاطع مع محور الهبوط، ومنه نحدد قيمة الهبوط المثلى التي تساوي القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي عند نقطة التقاطع E التي تقابها فقد البئر تساوي صفر $s_{wopt.} - 0$.
- مثال (8.15):-

من معلومات المثال (8.1) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي

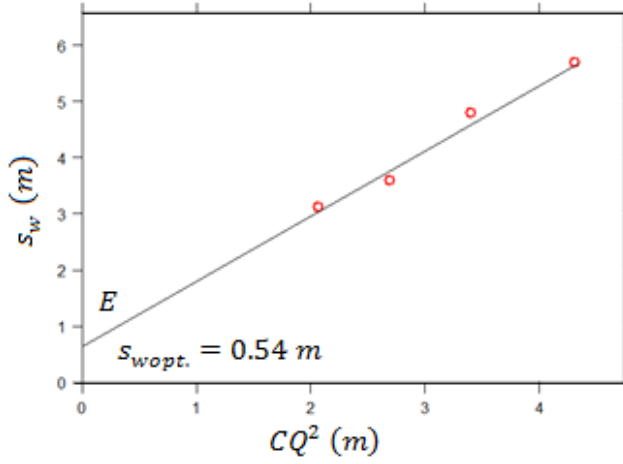


شكل (8.15):- الهبوط الكلي مقابل فقد البئر.

قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى تساوي قيمة الهبوط المثلى وهي: 4.2 متر.

مثال (8.16):-

من معلومات المثال (8.2) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي



شكل (8.16):- الهبوط الكلي مقابل فقد البئر.

قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى تساوي قيمة الهبوط المثلى وهي: 0.54 متر.

سادساً: طريقة تقاطع بيانات الضخ المختلفة:-

النظرية الكامنة وراء هذا المفهوم هي أن الخزان الجوفي يفترض أن يكون متجانس حتى جدار المنطقة المتاخمة للبئر، ويفترض أن جميع خسائر البئر تنعدم مقابل هذه المنطقة. ووفق هذه الدراسة فإن ضبط تصريف البئر بات ممكناً وذلك في حالة الاهتمام بجميع معاملات الضخ المختلفة: الانخفاض الكلي في المنسوب، فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر. ومن هذه المعاملات يتم تحديد فاقد الخزان الجوفي ومعامل فاقد الخزان الجوفي من نقطة تقاطع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب مع قيمة فاقد طبقة المياه الجوفية عند نقطة التقاطع المثلى A وذلك في حالة ضخ البئر بمعدل تشغيلي أمثل تنعدم وتتلاشى فيه مكونات فقدان البئر شكل (9.4).

للتحقق من صحة هذه الطريقة نأخذ المثال (9.6) والذي فيه تم تحديد أفضل نقطة تصريف تصل فيها البئر إلى كفاءتها العظمى وهي تقدر بحوالي 1900 م³/يوم، وبهبوط يتطابق بالتكوين الجيولوجية وداخل البئر بقيمة 4.2 متر شكل (9.21). وعموماً يتطلب ضبط تصريف البئر للوصول بها إلى الكفاءة المثلى الآتي:-

- التحكم في الهبوط عند النقطة التي يتساوى فيها منسوب الماء بالخران الجوفي وداخل البئر.

- تفادي حدوث فواقد البئر عند الضخ.

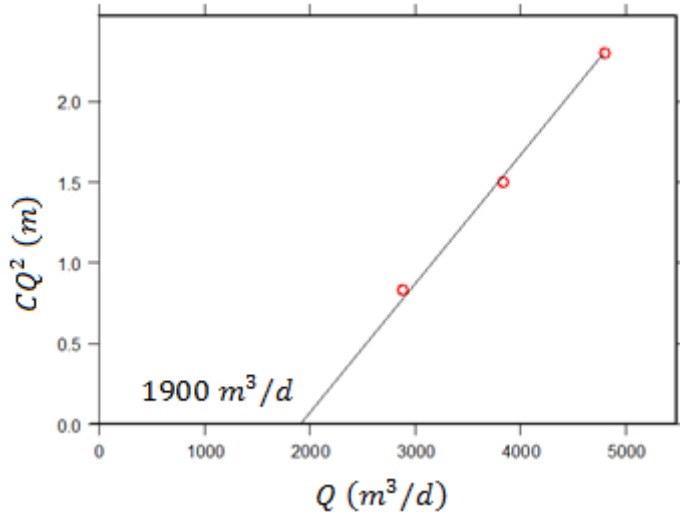
8.4 تقدير فواقد البئر:- Estimation of well losses

يمثلها الهبوط (السحب) الزائد بسبب التدفقات غير الصفحية الناتجة من سوء تصميم البئر، ويعرف الهبوط الذي يحدث في وجه البئر بفقدان الخزان الجوفي، بينما يعرف السحب الذي يحدث أثناء تحرك الماء عبر مصفاة البئر وداخل البئر إلى منطقة شفت المضخة بفقدان البئر. غالباً ما يكون من الصعب عزل خسائر الخزان الجوفي عن خسائر البئر، ولكن في هذا الكتاب تمت عدة محاولات ناجحة لتقدير قيمة خسائر البئر بعيداً عن خسائر الخزان الجوفي.

لتقييم الحالة الراهنة للبئر هنالك علاقة تميز ما بين قيم فقد الخزان الجوفي وفقد البئر وذلك من حيث مقدار الهبوط في المنسوب ومقدار تصريف البئر. أحياناً قد يتأثر الهبوط في المنسوب بشكل أساسي بمكون فقد الخزان الجوفي وذلك بسبب الضخ بمعدل تصريف منخفض، ومن جانب آخر قد يتأثر الهبوط بشكل أساسي بمكون فقد البئر مقارنةً بمكون فقد الخزان الجوفي وذلك عند ضخ البئر بمعدل تصريف مرتفع. تهدف هذه الطريقة إلى تقييم أداء أنبوب البئر وتحديد خصائصه من خلال تقييم معايير فقد البئر. يتطلب تطبيق الطريقة رسم تصريف البئر أفقياً مقابل بيانات فقد البئر رأسياً على ورق رسم بياني، يمد خط مستقيم من خلال النقاط ليتقاطع مع المحور الأفقي، ومنه يتم إعطاء معدل التصريف الأمثل $Q_{opt} - 0$ شكل (8.17).

مثال (8.17):-

من معلومات المثال (8.1) المطلوب تعيين القيمة المثلى لفقد الخزان الجوفي

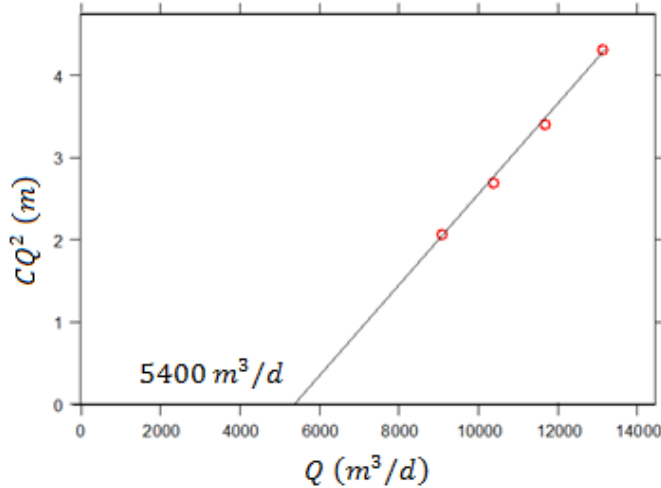


شكل (8.17):- توقع قيم التصريف مع قيم فقد البئر.

يوضح الشكل أعلاه أنه في حالة ضخ البئر بمعدل تشغيلي أمثل 1900 م³/3 يوم عندها تنعدم فواقد البئر، ويسود في هذه اللحظة الجريان الخطي.

مثال (8.18):-

من معلومات المثال (8.2) المطلوب تحديد الحالة التي تنعدم فيها فواقد البئر



شكل (8.18):- التصريف مقابل فقد البئر رأسياً.

معدل التشغيل الأمثل هو: 5400 م³/يوم والذي فيه تنعدم فواقد البئر.

8.5 تقدير قيمة ثابت خسائر الخزان الجوفي وثابت خسائر الآبار:-

في السابق كان هنالك خيار واحد فقط يستطيع الباحث من خلاله تقدير قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي B من اختبارات الضخ المتدرج وبالتحديد من نقطة تقاطع قيم تصريف البئر أفقياً مع الانخفاض النوعي رأسياً عند نقطة التقاطع على المحور الرأسى والتي فيها تكون قيمة التصريف تساوي صفر، أما عامل فقد البئر فهو الآخر يقدر من ميل الخط المستقيم لبيانات اختبار ضخ البئر (تصريف البئر مقابل الانخفاض النوعي) شكل (3.7) راجع الفصل الثالث. ولكن في هذا الفصل تم ابتكار منهجية أخرى يمكن من خلالها تقدير قيمة معاملي فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر بعدة أساليب تختلف عن الطريقة السابقة، ومن أهم هذه الطرق ما يلي:-

8.5.1 ثابت خسائر فاقد الخزان الجوفي:-

تعتبر قيم ثابت خسارة الخزان الجوفي وثابت خسائر البئر بالإضافة إلى الانتاجيات الموثوق فيها $Reliable\ yields$ من آبار المياه مهمة للإدارة السليمة لموارد المياه الجوفية. ومن هذا المنطلق يتم تحديد نوع الخزان الجوفي عند تحليل البيانات الهيدروجيولوجية لاختبارات السحب التدريجي، فإذا كانت قيمة معامل فقد الخزان الجوفي أصغر من قيمة ثابت خسارة البئر فهذا دليل على الخزان الجوفي يقع تحت ضغط له سلوك الخزان الجوفي المتسرب/ شبه المحصور، لذلك فإنه يظهر اتصال هيدروليكي مع التكوينة المحيطة. ولتحديد قيمة معامل فقد الخزان الجوفي رياضياً نستعين بالمعادلة (8.2)، والتي منها تحدد القيم المثالية لكل من فقد الخزان الجوفي وكمية التصريف التي تم شرحها في هذا الفصل.

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{S_{wopt.}}{Q_{opt.}} = d/m^2 \dots \dots \dots (8.2)$$

أكدت الدراسات السابقة أن تقييم عامل فعالية تطوير البئر DF يعتمد على تطبيق المعادلة الرياضية (2.5) التي تبين العلاقة ما بين معامل خسارة البئر إلى معامل خسارة التكوينة الجيولوجية، وفي نفس السياق ومن هذه الطريقة يحصل المتخصصون في المياه الجوفية والطلاب على قيمة عامل فعالية تطوير البئر من ميل الخط المستقيم لمنحنى الانخفاض النوعي مقابل فاقد الطبقة المائية شكل (8.19)، رياضياً تتم قسمة قيمة مقدار التغير في الانخفاض النوعي $\Delta s_w/Q$ على فاقد الخزان الجوفي عند ضخ البئر بالمعدل الأمثل على النحو التالي:-

$$DF = \frac{\Delta s_w/Q}{BQ} \dots \dots \dots (8.3)$$

مثال (8.19):-

من خلال الاستعانة بمعلومات المثالين (8.1 و 8.7)، المطلوب تحديد قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي.
الحل:-

من المثال (8.1) كمية التصريف المثلى 1900 م³/يوم

من المثال (8.7) فاقد الخزان الجوفي الأمثل 4.2 متر

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{4.2}{1900} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أولاً: طريقة تقاطع بيانات الضخ المختلفة

وفيها يتم عرض نتائج التقييم والرسم البياني لجميع مكونات الهبوط الكلي، فاقد الطبقة المائية وفقد البئر مقابل معدل التصريف المستخدم. ومن هذه الطريقة يتم تقدير معامل فاقد الطبقة المائية B من نقطة تقاطع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب مع

خط بيانات فاقد طبقة المياه الجوفية عند نقطة التقاطع المثلى A شكل (9.21)، وتشير هذه المرحلة من الضخ أن البئر تعمل بأعلى كفاءة وهي تضخ بمعدل تشغيلي أمثل تتعدم فيه مكونات فواقد البئر، ولحساب قيمة هذا المعامل نتبع الخطوات التالية:-

شروط تطبيق الطريقة:-

لتحديد القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي ومعامل فاقد الخزان الجوفي نستعين بطريقة الخط المستقيم وطريقة المنحنى.

- أرسم بيانياً قيم تصريف البئر أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل جميع مكونات بيانات الضخ رأسياً على مقياس رسم حسابي شكل (9.21).

- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بنقاط فقد البئر ليقطع المحور الأفقي لتصريف البئر عند نقطة معينة تبين كمية التصريف المثالية Q_{opt} .

- مد الخط الواصل بنقاط فاقد الطبقة المائية حتى يقطع المحورين الأفقي والرأسي عند نقطة التلاقي صفر، ومن ثم مد الخط الخاص بقيم الهبوط ليقطع خط بيانات فاقد الطبقة المائية عند نقطة معينة A مقابلة لنقطة تقاطع فقد البئر مع المحور الأفقي.

- حدد القيمة المثالية لفاقد الخزان الجوفي BQ_{opt} من نقطة التقاطع A التي تعادل قيمة الهبوط المثالية في المنسوب s_{wopt} ، وتبيننا هذه النقطة بأنه لا يوجد أثر لفقد البئر، وفي هذه المرحلة من الضخ لا تتأثر البئر بأي مكون انخفاض إضافي.

- أحسب معامل فاقد الخزان الجوفي من قسمة قيمة فاقد الخزان الجوفي المثالية على كمية التشغيل المثلى معادلة (8.2).

مثال (8.20):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول (8.1)، المطلوب تقدير الآتي:-

- كمية التصريف المثلى

- فاقد الخزان الجوفي الأمثل

- معامل فاقد الخزان الجوفي

الحل:-

كمية التصريف المثلى

تقدر من نقطة تقاطع خط بيانات الهبوط الكلي في المنسوب مع خط بيانات تصريف البئر عند النقطة B شكل (8.1).

فاقد الخزان الجوفي الأمثل

يقدر من نقطة تقاطع خط بيانات فاقد طبقة المياه الجوفية مع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A شكل (8.8) وهي كما يلي:-

$$Q_{opt.} = 1900 \text{ m}^3/d \quad BQ_{opt.} = 4.2 \text{ m}$$

لتأكيد صحة هذه القيم يخربنا الشكل (9.21) بأن قيمة المثلى لفاقد الخزان الجوفي تساوي قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب وتقدر بحوالي 4.2 متر، وهو دليل يوضح انعدام تشكل فواقد البئر وذلك في حالة الضخ بالمعدل الأمثل الذي يساوي 1900 م³/يوم، ومن هذه القيم يمكن تقدير معامل فاقد الخزان الجوفي من المعادلة العامة (8.2).

$$B = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{s_{wopt.}}{Q_{opt.}} = \frac{4.2}{1900} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

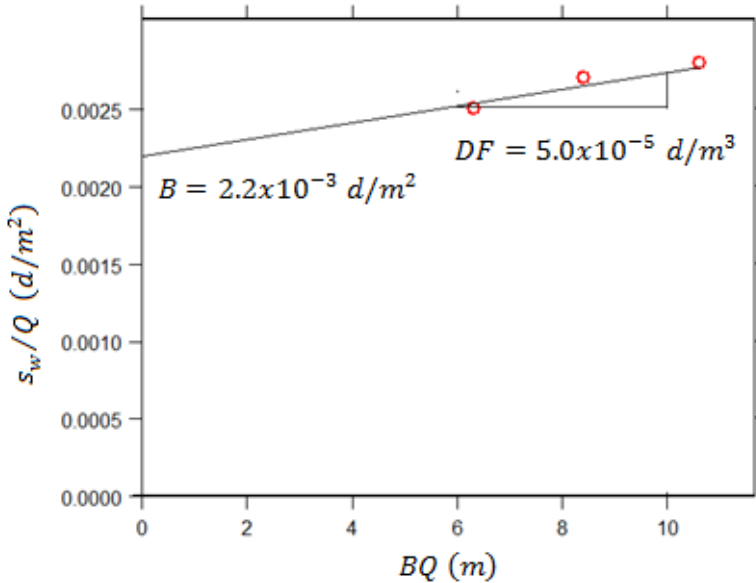
ثانياً: طريقة الانخفاض النوعي وفاقد الخزان الجوفي

من هذه الطريقة ومن الرسم البياني يتم تقدير قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي مباشرة من نقطة تقاطع الانخفاض النوعي مع فاقد الخزان الجوفي، وبالتحديد عند نقطة التقاطع على المحور الرأسي التي تكون فيها قيمة فاقد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية تساوي صفر شكل (8.19). أيضاً ومن هذه الطريقة يستطيع الباحث إيجاد العلاقة التي تربط بين عامل فاقد الخزان الجوفي وفعالية تطوير البئر.

شروط تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم الانخفاض النوعي رأسياً على مقياس رسم حسابي ضد قيم فاقد الخزان الجوفي أفقياً على مقياس رسم حسابي شكل (8.19).
 - أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.
 - مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الرأسى لقيم الانخفاض النوعي، ومنه نقرأ قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي عند نقطة التقاطع B التي فيها تكون قيمة فاقد الخزان الجوفي تساوي صفر $(0 - s_w/Q)$.
 - أحسب عامل فعالية تطوير البئر من ميل الخط المستقيم لمنحنى الانخفاض النوعي مقابل فاقد الطبقة المائية أو من المعادلة الرياضية (8.3).
- مثال (8.21):-

من معلومات البئر بالجدول (8.1)، المطلوب تقدير قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي وفعالية تطوير البئر



شكل (8.19):- يعرض قيم فاقد الخزان الجوفي مقابل الانخفاض النوعي.

أولاً: معامل فاقد الخزان الجوفي

من الشكل أعلاه ومن نقطة تقاطع الانخفاض النوعي مع فاقد الخزان الجوفي تقدر قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي B بحوالي $2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$.

ثانياً: عامل فعالية تطوير البئر

تقدر قيمة هذا العامل من ميل الخط المستقيم لبيانات الانخفاض النوعي مقابل فاقد الخزان الجوفي وهي: $5.0 \times 10^{-5} \text{ d/m}^3$ ، ولإيجاد القيمة تستخدم المعادلة (8.3) على النحو التالي:-

$$DF = \frac{\Delta s_w / Q}{BQ} = \frac{2.710^{-3} - 2.5 \times 10^{-3}}{4} = 5.010^{-5} \text{ d/m}^3$$

يعرض الشكل أعلاه قيمة عامل تطوير البئر، واستناداً إلى تصنيف العالم Bierschenk 1963 جدول (2.2) تقدر قيمة عامل تطوير هذه البئر بأقل من 0.1 d/m^3 ، وهو دليل يوضح أن البئر ذات درجة تطور فعالة للغاية. طريقة أخرى

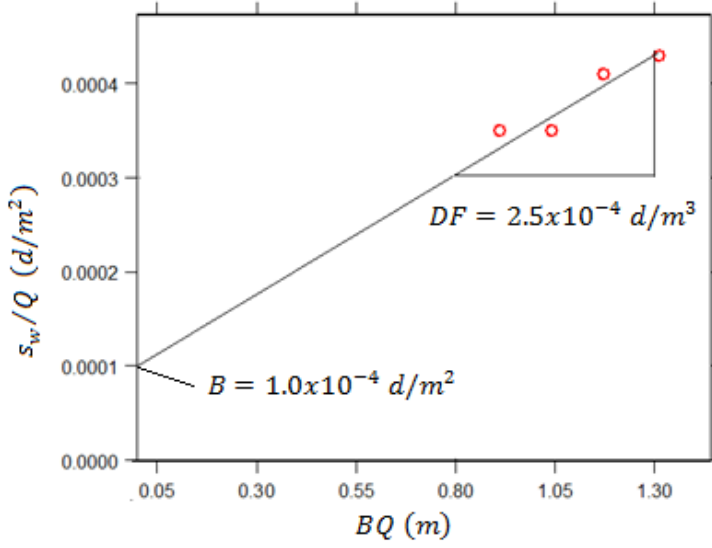
عامل تطوير البئر رياضياً في حالة الضخ بالمعدل الأمثل

$$DF = \frac{s_w / Q}{BQ} = \frac{B}{BQ} = \frac{0.0022}{4.2} = 5.2 \times 10^{-4} \text{ d/m}^3$$

مثال (8.22):-

من معلومات المثال (8.2)، المطلوب تقدير قيمتي معامل فاقد الخزان الجوفي وفعالية تطوير البئر.

الحل:-



شكل (8.20):- يستعرض قيم فاقد الخزان الجوفي مقابل الانخفاض النوعي.

أولاً: معامل فاقد الخزان الجوفي

من الشكل الرسومي معامل فاقد الخزان الجوفي حوالي $1.0 \times 10^{-4} \text{ dxm}^2$

ثانياً: عامل فعالية تطوير البئر

$$DF = \frac{\Delta s_w / Q}{BQ} = \frac{1.25 \times 10^{-4}}{0.5} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ d/m}^3$$

عامل تطوير البئر في حالة الضخ بالمعدل الأمثل

$$DF = \frac{s_w / Q}{BQ} = \frac{B}{BQ} = \frac{0.0001}{0.54} = 1.9 \times 10^{-4} \text{ d/m}^3$$

8.5.2 ثابت خسائر الآبار:- Coefficient of well losses

يرتبط معامل فقد البئر C بعدد وخصائص الفتحات التي تساهم بالمياه في البئر، وفي حالة حدوث نزح المياه Dewatering تنخفض عدد الفتحات، مما يؤدي إلى زيادة في كل من قيمة C وقيمة الهبوط، وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة ميل مخطط s_w / Q مقابل Q شكل (3.7). وجانب آخر يتم التحكم في ثابت فقد البئر من خلال نصف قطر البئر

وتطورها وحالتها. ومن التجارب الحقلية وجد أن تطبيق تقدير هذا المعامل C يوفر عدد من الحلول على آبار المياه الجوفية وفي مجموعة متنوعة من الظروف الهيدروجيولوجية المختلفة. ومن وجهة نظر احصائية يتم تطبيق أساليب هذه الطريقة على مجموعة بيانات حقل واحد يتم من خلالها ايجاد العلاقة بين قيمة ثابت خسارة الخزان الجوفي B وقيمة عامل تطوير البئر DF ، ورياضياً تقدر قيمة ثابت فقد البئر من المعادلة على النحو التالي:-

$$C = B \times DF \dots \dots \dots (8.4)$$

مثال (8.23):-

مستعيناً بمعلومات المثال (8.21)، أوجد قيمة ثابت فقد البئر.
الحل:-

من الشكل (8.19)

$$B = 2.2 \times 10^{-3} \text{ dxm}^2 \quad DF = 5.0 \times 10^{-5} \text{ d/m}^3$$

ثابت فقد البئر

$$C = B \times DF = 2.2 \times 10^{-3} \times 5.0 \times 10^{-5} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

مثال (8.24):-

مستعيناً بمعلومات المثال (8.22)، أوجد قيمة ثابت فقد البئر.
الحل:-

من الشكل (8.20)

$$B = 1.0 \times 10^{-4} \text{ dxm}^2 \quad DF = 2.5 \times 10^{-4} \text{ d/m}^3$$

ثابت فقد البئر

$$C = B \times DF = 1.0 \times 10^{-4} \times 2.5 \times 10^{-4} = 2.5 \times 10^{-8} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

8.6 علاقة القدرة النوعية بإجمالي خسائر الآبار:- Relationship of specific capacity to total well losses

من التجارب الحقلية وجد أن كلا من فقد الخزان الجوفي BQ وفقد البئر CQ^2 ينخفضان عموماً مع زيادة السعة المحددة، ولتأكيد تلك العلاقة تم رسم قيم فقد البئر مقابل قيم السعة المحددة على ورق بياني، ويشير الشكل العام للبيانات المستمدة من تحليلات الاختبارات إلى وجود علاقة عامة بين المعاملتين BQ و CQ^2 يوضحها الرسم البياني شكل (8.21).

مثال (8.25):-

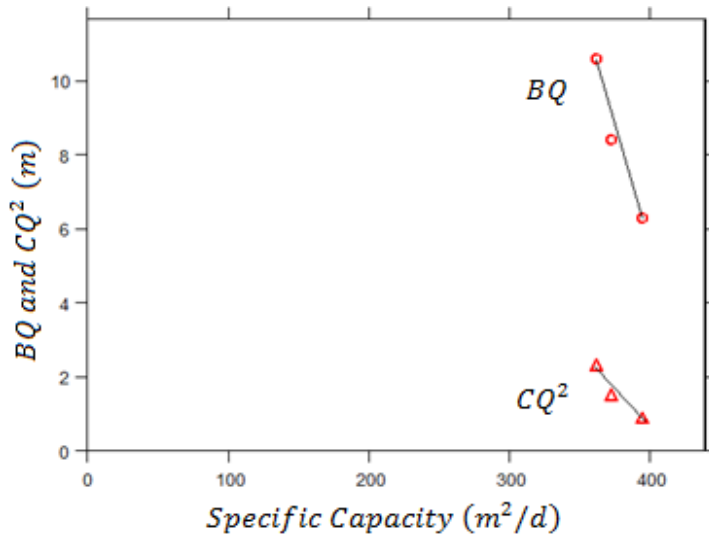
من معلومات البئر الموضحة بالجدول أدناه، أوجد العلاقة التي تربط بين السعة النوعية وإجمالي خسائر البئر.

جدول (8.3):- يبين قيم ثابت خسائر الخزان الجوفي وثابت خسائر البئر (المصدر:

(Maged El Osta).

$E_w\%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	C (d^2/m^5)	B (d/m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
88.7	0.83	6.3	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	7.3	2880	1
84.8	1.5	8.4			2.7×10^{-3}	10.3	3840	2
82.2	2.3	10.6			2.8×10^{-3}	13.25	4800	3

الحل:-



شكل (8.21):- السعة المحددة مقابل فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر.

يعقد الشكل أعلاه مقارنة ما بين فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر، تخبرنا هذه العلاقة بأن خط مسار مكونات فاقد الخزان الجوفي هي السائدة (الأعلى قيمة) من خط مسار مكونات فقد البئر، وهو دليل يؤكد على أن البئر ذات انخفاض طفيف في السعة المحددة أثناء الاختبار وأنها تتمتع بكفاءة عالية.

مثال (8.26):-

من معلومات بيانات البئر بالجدول أدناه. أوجد كمية الضخ المثلى.

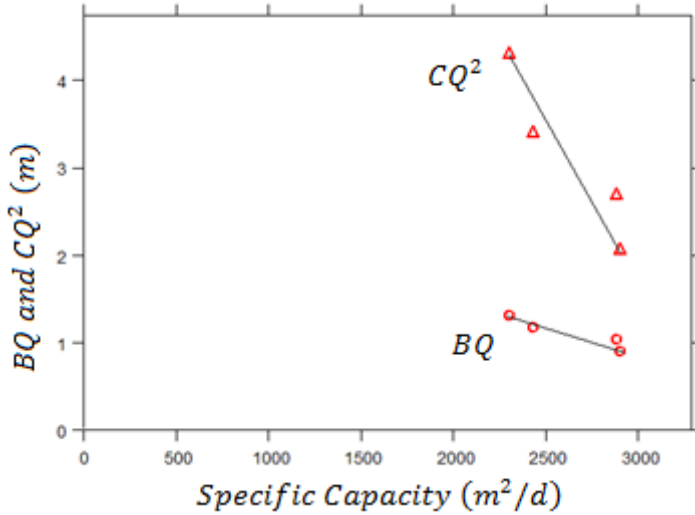
جدول (8.4):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ وقيمة

معكوس الانخفاض النوعي (المصدر: 2018 Yosef Aregaw).

$E_w \%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	$C(d^2)$ / m^5	$B(d)$ / m^2	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
29.1	2.06	0.91	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.13	9072	1
28.9	2.69	1.04	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.6	10368	2

24.4	3.40	1.17	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.1×10^{-4}	4.8	11664	3
23.0	4.31	1.31	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-4}	5.7	13132.8	4

الحل:-



شكل (8.22):- السعة المحددة مقابل فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر.

يخبرنا الشكل أعلاه بأن منحنى فقد البئر يسود على منحنى فاقد طبقة المياه الجوفية مما يؤكد على أن البئر ذات انخفاض كبير في سعتها النوعية ولها كفاءة منخفضة. وبشكل عام تعزى القيم العالية لـ CQ^2 إلى زيادة الاضطرابات عند سريان الماء نحو مصفاة البئر.

8.7 فواقد البئر في حالة السكون:- Stillness Calmness well losses

من الناحية النظرية يجب أن تتساوى وتتطابق مناسيب المياه الساكنة بالخزان الجوفي وداخل البئر، ولكن في الواقع وفي كثير من الأحيان تحدث ظاهرة عدم التساوي أو التفارق في المناسيب حيث يكون المنسوب أقرب إلى سطح الأرض بالتكوينة الجيولوجية ويزداد بعداً داخل البئر الجوفي الذي يخترق الخزانات غير المحصورة،

وتنسب هذه الظاهرة إلى الخسائر غير الخطية أو بسبب الاختلاف في الضغط الواقع على التكوينة والبئر.

تؤدي تأثيرات فقدان البئر تؤدي إلى تدفقات غير خطية ناتجة من سوء عمليات الحفر الجوفي، وتصميم البئر وتطويرها، والتي بدورها تتسبب في زيادة الهبوط في مستوى الماء داخل البئر بشكل كبير بمرور الوقت ليزداد الهبوط نتيجة لتدفق المياه الجوفية من خلال مصفاة وغلاف البئر خاصة بالآبار العميقة والمغلقة تغليف جزئي (ذات المصفاة المحدودة). هنالك العديد من المنهجيات المقترحة التي تسهل استخدام تقدير خسارة البئر في حالة السكون كمقياس لأداء البئر وذلك عندما تصبح تقديرات فقدان البئر وتأثيراته أكبر من اللازم في حالة عدم الضخ، عندها يجب إتباع المزيد من التطوير لبئر جديد أو إعادة تأهيل بئر موجود مسبقاً لضمان حصول المجتمع على بئر مياه جوفية فعالة. ومن الطرق القياسية الواجب اتباعها لتقدير مساهمات خسارة الآبار غير الخطية والتي فيها يتم تقدير الهبوط (السحب) الزائد بسبب التدفقات غير الصفحية عند معدل الضخ التصميمي ما يلي:-

شروط تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر أو قيم فاقد الخزان الجوفي أفقياً على مقياس رسم حسابي ضد بيانات فقد البئر رأسياً على مقياس رسم شبه لوغاريتمي شكل (8.23 و 8.24).

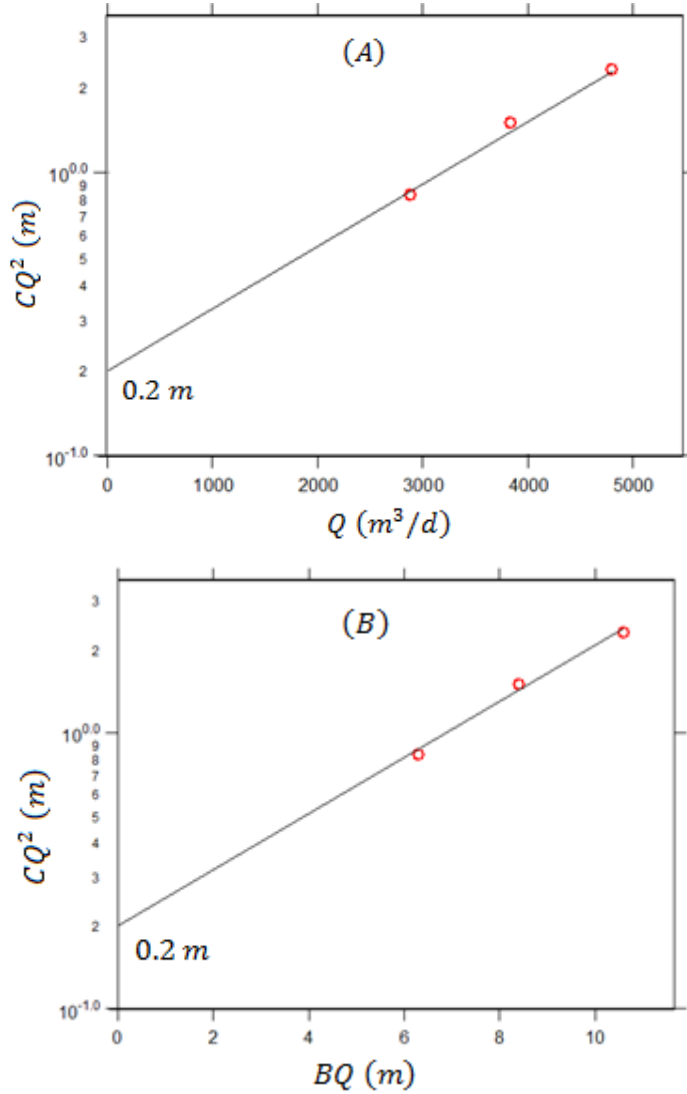
- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع المحور الرأسى لفقد البئر، ومن نقطة التقاطع يتنبأ الباحث بمستوى الهبوط في مستوى الماء الساكن وذلك في حالة عدم ضخ البئر

$$(0 - CQ^2).$$

مثال (8.27):-

من معلومات البئر بالجدول (8.3)، أوجد قيمة الخسائر غير الخطية التي تحدث في حالة عدم ضخ البئر.

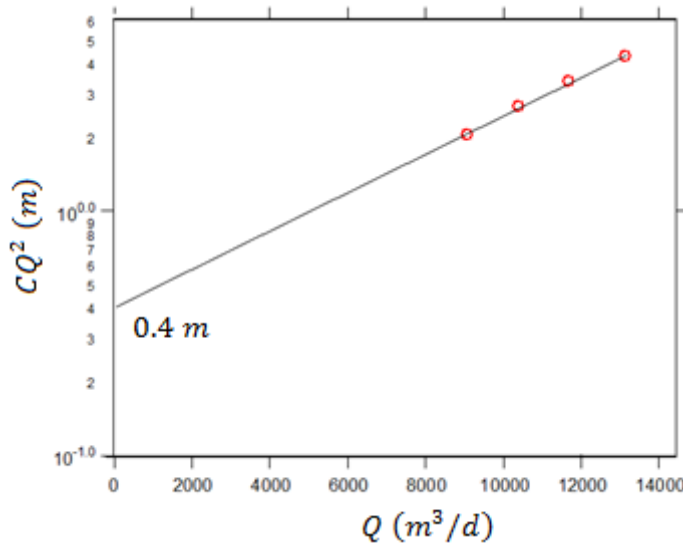


شكل (8.23):- يوضح الخسائر غير الخطية في حالة السكون – عدم ضخ البئر: (A) تصريف البئر مقابل فواقد البئر (B) فاقد الخزان الجوفي مع فواقد البئر.

يوضح الرسم البياني أعلاه مكونات الخسائر غير الخطية بالبئر في حالة انعدام خسائر الخزان الجوفي، ويشير هذا التحليل إلى أن الخسائر غير الخطية ينبغي أن تنعكس في مساهمة خسارة الآبار في انخفاض منسوب الماء ببئر الضخ بسبب التباين في الضغط بالخزان الجوفي وداخل البئر. وفي هذا المثال تقدر الخسائر غير الخطية بحوالي 0.2 متر.

مثال (8.28):-

من معلومات البئر بالجدول (8.4)، المطلوب تقدير قيم الخسائر غير الخطية الساكنة.



شكل (8.24):- يوضح مدى تدهور وخسارة البئر في حالة السكون والذي له تأثير سلبي على كفاءة البئر.

من الشكل أعلاه يمكن التنبؤ بالهبوط عند حافة المصافي وداخل البئر في حالة عدم الضخ بحوالي 0.4 متر مما يشير إلى وجود أخطاء تصميمية. وعموماً تخبرنا القيمة العالية بشكل غير طبيعي لفقد البئر غير الخطي إلى انسداد فتحات مصفاة البئر، وما إلى ذلك...

الفصل التاسع

ضبط كفاءة البئر

Control of Well Efficiency

9.1 تعيين كفاءة البئر:- Determine the efficiency of the well

لا يزال استخدام بيانات السحب النظري الأولية دون النظر في كفاءة الآبار أو آثار الاختراق الجزئي لتحديد القابلية للانتقال والتخزين مطبقة في المجتمع الهيدروجيولوجي. ولقد أدت هذه التقنيات التفسيرية إلى جفاف معظم الآبار بسرعة نظراً لأنها تضخ بمعدل أكثر من اللازم، وأيضاً بسبب هذه التقنيات وفي بعض الحالات لا يتم استخدام واستغلال الإمكانيات الكاملة للخران الجوفي والبئر. ولتفادي هذه السلبات يجب وضع عدد من الحلول التي تقيد من الضخ بمعدل أكثر من اللازم أو أقل من المعدل الأمثل وذلك بغرض الوصول إلى الكفاءة المثلى. ولتعيين أفضل ظروف تصميم البئر يجب أن يتناسب تصريف البئر مع عمليات الهبوط وفقاً للإمكانيات الهيدروجيولوجية للخران الجوفي، وفي هذه الحالة يتم تلافي حدوث مكونات فقدان البئر بحيث أن الانخفاض الكلي في المنسوب يجب أن يتساوى مع فاقد الخزان الجوفي: $s_w = B_1 Q$.

9.2 الكفاءة المثلى للبئر:- Optimum well efficiency

يتعرض هذا الفصل إلى العديد من المنهجيات والطرق الجديدة في علم المياه الجوفية وذلك عبر مدخل شائق وجلي يستطيع الباحث من خلاله من تعديل ورفع فعالية البئر وذلك من خلال التحكم في تحديد كمية الضخ المثلى التي تتناسب مع عمليات الهبوط والخصائص الهيدروليكية للخران الجوفي والبئر، والتي عندها تصل البئر إلى كفاءتها القصوى، وفي هذه الحالة تنعدم الخسائر المضطربة التي تحدث بالبئر أثناء عملية ضخ المياه من الآبار، أيضاً أسفرت هذه الدراسة عن إمكانية تقدير معامل فاقد الخزان الجوفي ومعامل فقد البئر بطريقة مبتكرة وبمبسطة تختلف عن الطرق المتبعة في تفسير نتائج اختبار الضخ المتدرج. حددت عدد من الدراسات أن كفاءة البئر إذا كانت أقل من 65% فهذا يعني الإفراط في التصريف على الآبار. وتشير أهمية تحديد كفاءة

البئر إلى اتخاذ قرارات بشأن البئر، فإذا كانت البئر ذات كفاءة منخفضة للغاية فلا بد من خفض تصريف البئر للوصول إلى الكفاءة القصوى وذلك من أجل إطالة العمر المتوقع للبئر مع وضع تلك السليبيات في الاعتبار عند تصميم الآبار الأخرى في المستقبل والتي تحفر في نفس الحقل الجيولوجي المعني. وللتحقق من صحة هذه الطريقة تم في هذا الفصل تحليل بيانات بئري ضخ، أحد هذه الآبار ذات كفاءة عالية أكبر من 80% والثانية ذات كفاءة قليلة أقل من 50%.

تساهم الكسور والفتحات البينية في دخول المياه الجوفية بحرية وانسياب رقائقي نحو البئر، ولكن أحياناً قد تتغير الخصائص الهيدروليكية للخران الجوفي في المنطقة المجاورة مباشرة لحفرة البئر حيث يتم إغلاق وتقليل الكسور والفتحات البينية بواسطة سائل الحفر الجوفي. ينتج عن هذا الإغلاق زيادة التدفق غير الدارسي Non-Darcian وزيادة قيمة معامل فقد البئر C للمخطط الخطي لـ s_w/Q مقابل Q ، وأيضاً سيكون لطبقة المياه الجوفية ذات المدى المحدود (الحدود السلبية) تأثير مماثل على مخطط s_w/Q مقابل Q . ولتفادي تلك السليبيات تم في هذا الفصل استخدام البيانات المستمدة من اختبارات الضخ التدريجي لحساب معدل الضخ الأمثل الذي يؤدي إلى استقرار السحب المصاحب لاختبارات ضخ الخزان الجوفي بمعدل ثابت تنعدم فيه فواقد البئر.

9.3 أهمية اختبار السحب المتدرج:- The importance of step pumping test

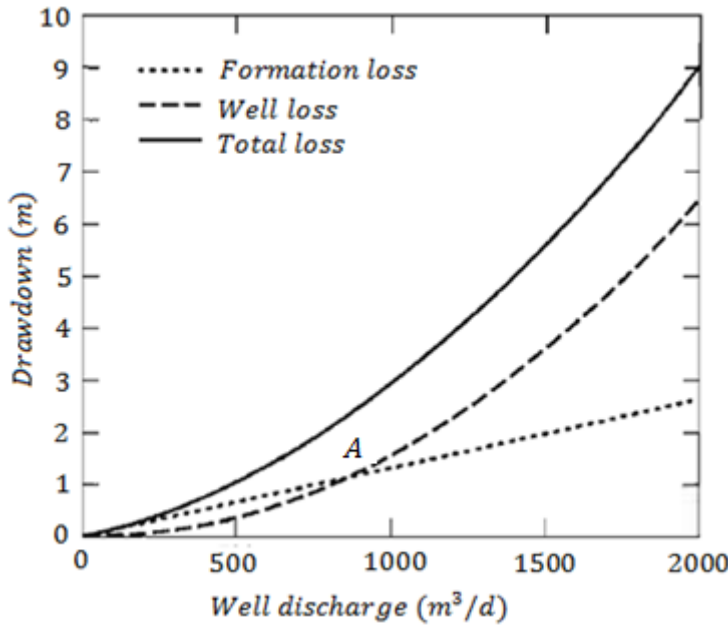
أهم ما يميز طريقة اختبار السحب التدريجي المتعارف عليها عالمياً هو سهولة تطبيقها في الحقل الجيولوجي ومن ثم تفسير نتائجها في المكتب، ولكن ومع ذلك تنقصها بعض المميزات التي من أهمها ما يلي:-

- لا يمكن تحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر لتصل إلى كفاءتها العظمى وذلك بعد الفراغ من تشييد البئر.

- يصعب تعديل كمية الضخ للوصول إلى الكمية المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر.
- تقدير كفاءة البئر دون وضع حلول مناسبة تعمل على تحسين وتطوير كفاءة البئر بعد الفراغ من التصميم وبناء البئر.

لتفادي سلبيات هذه الطريقة تم في هذا الكتاب وضع بعض الحلول والمنهجيات التي تساعد الجيولوجي من السيطرة والتحكم في تحديد معدل كمية الضخ المثلى التي تقود إلى رفع كفاءة البئر إلى أعلى نسبة ممكنة. ويعالج هذا الفصل القصور والسلبيات الناتجة من تفسير نتائج الاختبارات الهيدروليكية لأبار المياه التي تم ذكرها سابقاً، وذلك بوضع حلول اعتمدت على تقاطع خط مسار خسارة طبقة المياه الجوفية مع خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A شكل (9.1) التي منها ندرس الآتي:-

- التمييز بين أنواع التدفقات المختلفة.
- تحديد كفاءة البئر المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر.
- تحديد الهبوط الأمثل في منسوب الماء.
- الطاقة التشغيلية للبئر - كمية التصريف المثلى اعتماداً على جهد الخزان الجوفي.
- معامل المقاومة المائية.



شكل (9.1):- يظهر في الشكل أعلاه منحنيات السحب النظرية المتعلقة بالتكوين وخسائر الآبار لتصريف البئر. كما يتضح من الشكل أن خسائر البئر تصبح أكثر أهمية مع زيادة تصريف البئر وأكبر من خسارة التكوين التي تتجاوز ما يقرب $Q = 800 \text{ m}^3/\text{d}$.

9.4 نقطة التقاطع المثلى A:- The optimum point of intersection A

تنشأ من تقاطع خط التدفقات الخطية بالخزان الجوفي مع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب عند نقطة معينة يرمز لها بالرمز A ، والتي فيها يتساوى ويتطابق الهبوط في مستوى الماء بالخزان الجوفي مع مستوى الماء داخل البئر، وعند هذه النقطة تنعدم مكونات خسائر البئر غير الخطية شكل (9.1). وأيضاً تحدد هذه النقطة كمية الضخ المثلى التي عندها تصل البئر إلى كفاءتها العظمى هذا بالإضافة إلى تحديد مقدار الهبوط في منسوب الماء، وأيضاً من هذه النقطة يتم تقسيم مجموع الخسائر التي تنشأ نتيجة لعملية الضخ المتدرج إلى ثلاثة أنواع مختلفة من الخسائر هي:-

1- التدفقات الخطية بالخزان الجوفي B_1Q Aquifer loss

2- التدفقات الخطية بالبنر B_2Q Linear loss

3- التدفقات غير الخطية - المضطربة بالبنر CQ^2 Turbulent well loss

9.5 الاختبارات الهيدروليكية:- Hydraulic tests

عادةً ما تساعدنا الاختبارات الهيدروليكية للآبار في تقييم خسائر طبقة المياه الجوفية والبنر خلال مراحل الضخ المختلفة، فالضخ بمعدل أكبر من جهد الخزان الجوفي يعمل على خلخلة وتحريك مواد الخزان الجوفي الناعمة في اتجاه البنر ليغلق ويسد فتحات مصفاة البنر ويقلل من كفاءة البنر. ومن المعروف أن جيولوجي الحقل لا يستطيع التحكم في تعديل نسبة كفاءة البنر بعد اكمال عملية التصميم وإنشاء البنر وبدليل أن الكثير من آبار المياه تعمل بكفاءة أقل من 100% ومنها ما قد يتوقف عن العمل بعد فترة، ويرجع السبب في عدم رفع وزيادة كفاءة البنر إلى صعوبة تحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تعمل بها البنر. ولكن عند تحديد الجيولوجي لكمية الضخ المثلى يصبح السريان نحو البنر أفقي ورقائقي وفيه لا تتحرك مواد الخزان الجوفي خاصة الناعمة منها، وعندئذٍ يتساوى منسوب الماء أثناء الضخ بالخزان الجوفي وداخل البنر وتنعدم فواقد البنر لتصبح كفاءة البنر 100%.

يستفاد من طريقة الضخ المتدرج المتعارف عليها عالمياً في تحديد كفاءة البنر دون وضع حلول مناسبة تعمل على حل المشاكل والأخطاء الفنية التي وقع فيها الجيولوجي أثناء تصميم وبناء البنر. فعلى سبيل المثال، إذا كانت كفاءة البنر منخفضة - أقل من 70% فعندئذٍ لا يمكن تحسين ورفع كفاءة هذه البنر، وعليه فإن من ساليب طريقة الضخ المتدرج أنه لا يمكن تفادي الأخطاء التصميمية التي وقع فيها الجيولوجي أثناء تصميم البنر. ولتفادي هذه الأخطاء الفنية كان الحل الوحيد هو تعديل تصميم البنر الجديدة التي سيم حفرها لاحقاً في نفس التكوين الجيولوجية وذلك بعد معرفة الوضع

الهيدروجيولوجي من البئر التي سبق تصميمها والتي أصبحت مرجع يقاس عليه عند تصميم أي بئر حفرت في نفس هذه التكوينات الجيولوجية. وبناءً على ما سبق تم في هذا الكتاب تطوير وابتكار طرق جديدة تخبرنا ما إذا كان بناء وتشيد البئر قد تم بصورة جيدة أم لا؟!، وتفيد هذه الطرق التي سوف يتم شرحها بالتفصيل في هذا الفصل الطلاب والباحثين في مجال هيدروجيا المياه الجوفية من التحكم في الوضع الهيدروليكي بالخران الجوفي والبئر بحيث يتم التحكم في تحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تعمل وتضخ بها البئر بغرض تقليل إجهاد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية للوصول بالبئر إلى حد الكفاءة المثلى، هذا بالإضافة إلى تجاوز تلك الأخطاء الفنية التي صاحبت تصميم وإنشاء البئر وتقليل تكلفة تشغيل المضخة.

9.6 طرق تحديد كفاءة البئر المثلى:- Methods for determining the optimum well efficiency

تتطلب الإدارة الرشيدة والسليمة لموارد المياه الجوفية تقييماً دقيقاً لمعايير الخزان الجوفي التي تتحكم في حركة وتخزين المياه، لذلك يجب أن يكون تحديد هذه المعايير وتفسيرها بمثابة اهتمام كبير يحتاج إلى تحليل بيانات اختبار الضخ التي يحتاجها الباحث للحصول على بيانات ميدانية أكثر موثوقية، وهذا يعني الهبوط ومعدل التدفق كدالة للوقت، ولمحاكاة هذه البيانات يجب أن تؤخذ الظروف الخاصة بمعدل الضخ الثابت والمتغير في البئر في الاعتبار عند تحليل تلك البيانات الحقلية.

عند ضخ البئر من الخزان الجوفي (المحضور وغير المحضور) تحدث حركة أفقية للمياه بالخزان وداخل البئر، فالمياه التي تضخ بواسطة البئر من الخزان الجوفي مكونة من المياه المخزونة بالخزان الجوفي وباعتبار أن كمية المياه المخزونة بالبئر قليلة. في بداية عملية ضخ المياه من البئر يحدث هبوط في منسوب الماء ويكون هنالك

توازن في منسوب المياه بالخران الجوفي وداخل البئر، وحلاً لحالة التوازن تم وضع افتراضين هما:-

- أثناء الضخ يحدث توازن في منسوب الماء بالخران الجوفي وداخل البئر ولا تتكون أي مظاهر لفواقد البئر.

- مع استمرار الضخ يزداد الهبوط في منسوب المياه داخل البئر أكثر من الهبوط بالخران الجوفي مما يؤدي إلى ظهور حالة فقد البئر.

الافتراض الأول:-

يوضح حالة الثبات، فكلما تقدم زمن الضخ يزداد الهبوط في منسوب الماء بالخران الجوفي بنفس المستوى حول محيط المصفاة وداخل البئر مما يعني أن سريان المياه نحو البئر في الخزان الجوفي يكون أفقياً ولا يوجد مكون سريان رأسي بالبئر، ولكن بعد فترة زمنية محددة يفوق الهبوط داخل البئر الهبوط بالخران الجوفي وعليه لا يمكن ثبات الافتراض الأول إلا بعد تقليل كمية ضخ المياه من البئر.

الافتراض الثاني:-

يوضح حالة وصول البئر إلى مرحلة عدم التوازن، فالمياه التي تؤخذ من البئر تفوق عملية تغذية الخزان الجوفي مما يعني أن سرعة سريان المياه بالخران الجوفي لا تواكب (أقل من) سرعة دخول المياه فتحات مصفاة البئر، وفي هذه الحالة تكون الفرصة مؤاتية لحدوث السريان الرأسي، ومن هذه الافتراضات ندرس الحالات التالية:-

حالة التوازن:-

- بعد نهاية التجربة يكون مستوى سطح الماء بالخران الجوفي ومنسوب الماء حول حافة المصفاة وداخل البئر أفقياً ومتطابق على طول المنطقة المتأثرة بالضخ.

- الضخ يتم بمعدل ثابت بالخران الجوفي.

- يخترق البئر السمك الكلي للخزان وبذلك تكون حركة المياه أفقية نحو البئر.
- حركة المياه بالخزان الجوفي والبئر أفقية.
- المياه المسحوبة من الخزان الجوفي والمسحوبة من البئر يواكب أخذها هبوط متساوي في مستوى منسوب المياه.
- معدل التغير في التخزين بالخزان ضعيف.
- حالة عدم التوازن:-
- كمية المياه التي تؤخذ من البئر أكبر من كمية المياه التي تؤخذ من التخزين بالخزان الجوفي.
- المياه المسحوبة من الخزان الجوفي والمسحوبة من البئر يواكب أخذها هبوط غير متساوي في مستوى منسوب المياه.
- يخترق البئر جزء من السمك المشبع من الخزان الجوفي.
- حركة المياه نحو البئر ذات مركبتين أفقية وأخرى رأسية.
- يستفاد من حالتي التوازن وعدم التوازن في تحديد الحالة الراهنة للبئر من حيث الكفاءة التي تعمل بها البئر. ولإثبات مدى صحة هذه الافتراضات نستعرض بعض الرسومات التي تحدد تلك المراحل التي تمر بها البئر خلال عملية الضخ مع تقييم كفاءة البئر خلال تلك المراحل وهي كما يلي:-
- 1- يسود فاقد الخزان الجوفي وتنعدم فواقد البئر عند الضخ بالكمية المثلّية عند النقطة B والتي عندها تصل البئر إلى كفاءتها العظمى شكل (9.2 و 9.3).
- 2- تبدأ فواقد البئر في الظهور على يمين النقطة B لتقل كفاءة البئر عن 100%، وتصل كفاءة البئر إلى 50% عند نقطة تقاطع بيانات فاقد الخزان الجوفي مع فواقد البئر عند النقطة C شكل (9.3).
- 3- تبدأ السيادة لفاقد البئر على يمين النقطة C لتقل كفاءة البئر عن 50% شكل (9.3).

9.7 تحليل خسارة الآبار:-

Analysis of well losses

الانخفاض الملحوظ في بئر الضخ هو نتاج تأثير طبقة المياه الجوفية وخسائر الآبار، وفقدان الخزان الجوفي هو السحب النظري المتوقع في بئر الضخ وفي بئر ذات كفاءة مثالية يكون فيها التدفق رقائقياً، أما خسارة البئر فهي السحب الإضافي في بئر الضخ الناجم عن التدفق المضطرب وتأثيرات فقدان الاحتكاك في البئر أو بجواره، ويتم تصنيف مكونات الخسارة على أنها خسائر خطية وغير خطية. عادةً ما تحدث خسائر الآبار الخطية بسبب تلف التكوين أثناء الحفر أو عدم إزالة سوائل الحفر المتبقية أثناء تطوير البئر أو بسبب الفواقد الرأسية أثناء تدفق المياه الجوفية عبر حزمة الحصى والمصفاة. بينما تحدث خسائر الآبار غير الخطية بسبب التدفق المضطرب الذي يحدث داخل عمود المضخة ومصفاة البئر والمنطقة المجاورة للبئر. وأيضاً من المتوقع وفي كثير من الأحيان أن تحدث خسائر الآبار المضطربة العالية بسبب تلف طبقة المياه الجوفية الصخرية مثال تلف الكسور أثناء الحفر الجوفي أكثر من الوسائط المسامية الحبيبية.

من الأسباب التي تدعو إلى الاهتمام بتحليل خسائر الآبار هي أن فقدان البئر يزيد من الطاقة اللازمة لإنتاج المياه الجوفية، وبالتالي فإن تقدير خسارة الآبار وضمان تقليلها أمر مهم لتقليل التكاليف. وبالتفصيل عندما يصبح فقدان البئر وتأثيراته أكبر من اللازم، يُنصح بإجراء المزيد من التطوير لبئر جديد وإعادة تأهيل البئر الموجود مسبقاً. إن تطوير وإعادة تأهيل بئر الضخ سيقال من فقد الآبار، ومتطلبات الطاقة، والتكاليف الاقتصادية والبيئية المرتبطة بإنتاج المياه الجوفية. وعموماً يسمح تحديد وتقييم فقد البئر بحساب الآتي:-

- الهبوط في المنسوب.

- تقييم التدفق المضطرب مع زيادة معدل الضخ.

- السعة المحددة المتوقعة في بئر الضخ بمعدلات تصريف مختلفة، وبشكل عام تقل السعة المحددة عند معدلات الضخ المرتفعة بسبب زيادة التدفق المضطرب في البئر.

- يسمح تقييم فقد البئر بإسقاط أفضل لمعدل الضخ الأمثل وتقدير الهبوط الفعلي في الخزان الجوفي بالقرب من البئر وبعيداً عن آثار الخسائر الناجمة عن الضخ وعدم كفاءة البئر، وفقدان الاحتكاك والتدفق المضطرب.

في هذا الفصل تم اقتراح منهجيات وطرق قياسية لتقدير مساهمات الخزان الجوفي وخسارة الآبار في الهبوط، ولكن هذه الأساليب لها قيود يجب اتباعها عند تحليل نتائج الاختبار التدريجي مما يضمن دقة هذه المنهجيات. علاوة على ذلك يجب أن يحصل المتخصصون في المياه الجوفية والطلاب الذين يحلون نفس بيانات السحب على نفس تقديرات الطرق المقترحة. بتعبير أدق، تم استخدام نظام بسيط من المعادلات وافترض أولي ونموذج انحدار اختياري لتقدير معاملة (معاملات) خسارة البئر والتي منها يتم تقدير السحب الزائد بسبب التدفقات غير الصفحية عند معدل الضخ التصميمي. على سبيل المثال، جسد استخدام خسارة البئر كمقياس لأداء البئر ومعامل خسارة البئر في الحقل اسلوباً مبسطاً مما يوضح موثوقية هذه الطرق المقترحة.

مثال (9.1):-

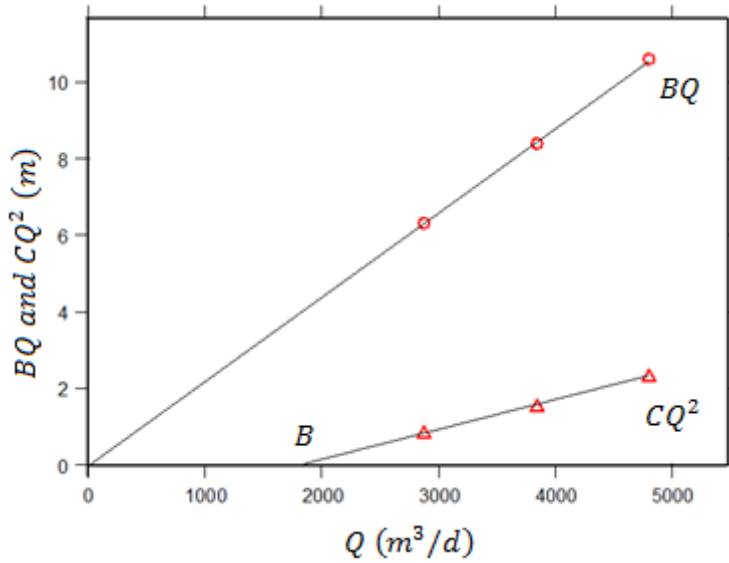
من معلومات البئر الموضحة بالجدول أدناه، المطلوب تقدير كمية الضخ المثلى.

جدول (9.1):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء والكفاءة لكل مرحلة ضخ

(المصدر: (2012 Maged El Osta).

م	Q (m^3/d)	s_w (m)	s_w/Q (d/m^2)	B (d/m^2)	C (d^2/m^5)	BQ (m)	CQ^2 (m)	$E_w\%$
1	2880	7.3	2.5×10^{-3}			6.3	0.83	88.7
2	3840	10.3	2.7×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.0×10^{-7}	8.4	1.5	84.8

82.2	2.3	10.6			2.8×10^{-3}	13.25	4800	3
------	-----	------	--	--	----------------------	-------	------	---



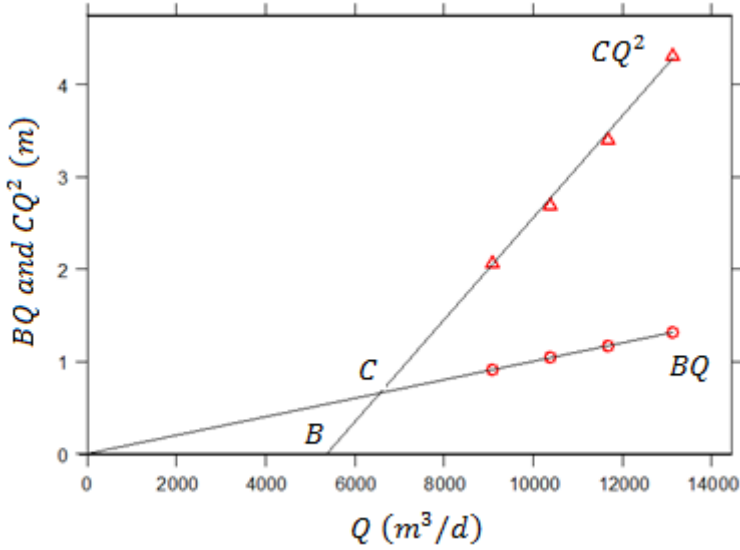
شكل (9.2):- يوضح قيم تصريف البئر مقابل فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر على ورق رسم بياني.

يحدد الشكل أعلاه تقاطع بيانات خط مسار فقد البئر مع كمية التصريف المثلى 1900 متر مكعب لكل يوم عند النقطة B التي عندها تصل البئر إلى كفاءتها العظمى. مثال (9.2):- من معلومات بيانات البئر بالجدول أدناه. أوجد كمية الضخ المثلى للبئر باستخدام طريقة الخط المستقيم.

جدول (9.2):- يبين قيم الانخفاض في مستوى سطح الماء لكل مرحلة ضخ (المصدر: (2018 Yosef Aregaw).

$E_w \%$	CQ^2 (m)	BQ (m)	$C(d^2$ / m^5)	$B(d$ / m^2)	s_w/Q (d/m^2)	s_w (m)	Q (m^3/d)	م
29.1	2.06	0.91	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.13	9072	1

28.9	2.69	1.04	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	3.5×10^{-4}	3.6	10368	2
24.4	3.40	1.17	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.1×10^{-4}	4.8	11664	3
23.0	4.31	1.31	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-4}	5.7	13132.8	4



شكل (9.3):- يوضح قيم تصريف البئر مقابل فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر على

ورق رسم بياني.

يوضح الشكل أعلاه المعلومات التالية:-

- تصل البئر إلى كفاءة العظمى عند النقطة B .

- تقل كفاءة البئر عن 100% وتزيد عن 50% بالمنطقة التي تقع بين النقطتين B و

C .

- تصل البئر إلى كفاءة 50% عند النقطة C التي تتقاطع فيها بيانات فاقد الخزان

الجوفي مع فقد البئر.

- تقل كفاءة البئر عن 50% عند المنطقة التي تقع على يمين النقطة C .

يعتبر تطبيق هذه الطرق الجديدة نوع من أنواع الإدارة الرشيدة، والتي فيها يتم تحديد أنسب كمية لتصريف البئر والتي عندها تتساوى كمية الضخ مع كمية التغذية Recharge، وبهذه الكيفية يتحكم الجيولوجي في إدارة موارد المياه الجوفية ويمنعها من الاستنزاف والضخ الجائر الذي له عواقب وخيمة على مكامن المياه الجوفية. ومن أهم هذه الطرق ما يلي:-

- 1- الطريقة الأولى: التمييز بين أنواع التدفقات
- 2- الطريقة الثانية: اختيار التصريف الأمثل
- 3- الطريقة الثالثة: التحكم في ضبط كفاءة البئر

الطريقة الأولى:- التمييز بين أنواع التدفقات المختلفة

في هيدروليكا المياه الجوفية تعد طريقة التمييز بين أنواع التدفقات المختلفة فعالة وهامة ومنها يتم عزل فاقد البئر الرقائقي B_2Q من إجمالي الخسائر الأخرى، وعلى افتراض أن تكون خسائر البئر المضطربة CQ^2 صغيرة ولا تكاد تذكر. وبالنظر إلى إجمالي الخسائر فإن معادلة الانخفاض الكلي في المنسوب مع اختلاف التصريف تعطى بالمعادلة (3.4).

تعتبر هذه الطريقة مقدمة مبسطة تشرح كيفية ضبط فواقد البئر التي يمكن التخلص منها من خلال عملية ضبط تصريف البئر. ومن هذه الطريقة يستطيع جيولوجي الحقل تفسير نتائج الضخ المتدرج لأبار المياه بغرض التمييز بين ثلاثة أنواع من الخسائر المختلفة شكل (9.4) وهي كما يلي:-

1- التدفقات الخطية بالخران الجوفي B_1Q Aquifer loss

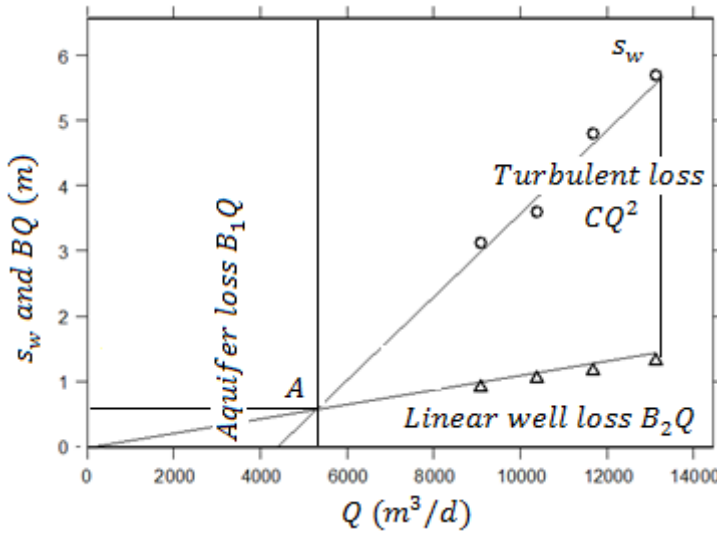
تبدأ من نقطة تقاطع فاقد طبقة المياه الجوفية مع الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A ، وتنتهي عند نقطة الصفر – نقطة التقاء المحورين الأفقي والرأسي.

2- التدفقات الخطية بالبئر B_2Q Linear well loss

تبدأ من نهاية بيانات فاقد الخزان الجوفي، وتنتهي عند النقطة A ،

3- التدفقات غير الخطية - المضطربة بالبئر CQ^2 Turbulent well loss

تبدأ من نهايات بيانات الهبوط الكلي في المنسوب وتنتهي عند آخر قراءة لفاقد الخزان الجوفي، وبمعنى آخر تمثل الفرق بين الانخفاض الكلي في المنسوب وأعلى قيمة لفاقد الخزان الجوفي.



شكل (9.4):- يقسم مكونات التدفقات اعتماداً على نقطة التقاطع A إلى ثلاثة أنواع ذات خسائر مختلفة.

ضوابط تطبيق الطريقة:-

- وقع قيم تصريف البئر خلال مراحل الضخ المختلفة أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم فاقد الخزان الجوفي والانخفاض الكلي في المنسوب رأسياً على مقياس رسم حسابي.

- صل نقاط معلومات فاقد الخزان الجوفي بخط مستقيم ينتهي عند نقطة تلاقي المحورين السيني والصادي، وفيها تكون قيمة فاقد الخزان الجوفي تساوي صفر.

- صل نقاط معلومات الانخفاض الكلي في المنسوب بخط مستقيم يقطع خط معلومات فاقد الخزان الجوفي عند النقطة A والتي فيها نقرأ قيمة التصريف الأمثل Q_{opt} على المحور الأفقي، وأخيراً يواصل خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب مساره وامتداده لينتهي عند نقطة معينة بالمحور الأفقي.

- مد من النقطة A خط أفقي يقطع المحور الرأسي لنقرأ قيم الانخفاض الأمثل في منسوب الماء s_{wopt} عند زمن معين من مراحل الضخ المختلفة، ومن هذا الخط الأفقي يمكن الفصل والتمييز ما بين مكونات فاقد الخزان الجوفي B_1Q وفوائد البئر الخطية B_2Q .

- تبدأ فوائد البئر غير الخطية CQ^2 من عند أقصى قيمة لفاقد الخزان الجوفي وتنتهي عند آخر قيمة للانخفاض الكلي في المنسوب شكل (9.4).

- لتقدير كفاءة البئر نتبع الخطوات التالية:-

أولاً: طريقة الانخفاض في المنسوب:-

وفيها يتم قياس الانخفاض في منسوب الماء بالخزان الجوفي والبئر، ومنه يتم تقدير كفاءة البئر على النحو التالي:-

1- من معادلة جاكوب (3.7) في حالة عدم ثبات الجريان بالخزان المحصور، ومنها يمكن التعبير عن الهبوط في البئر التي تخترق كامل سمك الخزان مع إهمال مكونات فاقد البئر لأنها قليلة ولا تكاد تذكر.

2- الاستعانة بقيم التدفقات المختلفة والخاصة بالخصائص الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية والبئر وهي كما يلي:-

خسارة البئر الخطية B_2Q

Linear well loss $B_2Q = BQ - B_1Q$

الخسائر الخطية BQ

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q$$

خسارة البئر غير الخطية CQ^2

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ$$

خسائر البئر الخطية وغير الخطية

$$\text{Total well loss} = B_2Q + CQ^2$$

الخسائر الكلية

$$\text{Total drawdown } s_w$$

$$= \text{Laminar loss } BQ + \text{Turbulent loss } CQ^2$$

ثانياً: طريقة الزاوية:-

وفيها يتم قياس الزوايا الآتية:-

1- زاوية التدفق الخطي بالخرزان الجوفي:-

وهي زاوية محصورة ما بين خط مسار التدفق الخطي BQ والخط الأفقي للهبوط في المنسوب عند النقطة A .

2- زاوية التدفق غير الخطي بالبئر:-

وهي زاوية محصورة ما بين خط مسار التدفق الخطي للخرزان الجوفي ومسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A .

- مجموع هاتين الزاويتين يعطي قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب شكل (9.5).

مميزات الطريقة:-

Method advantage

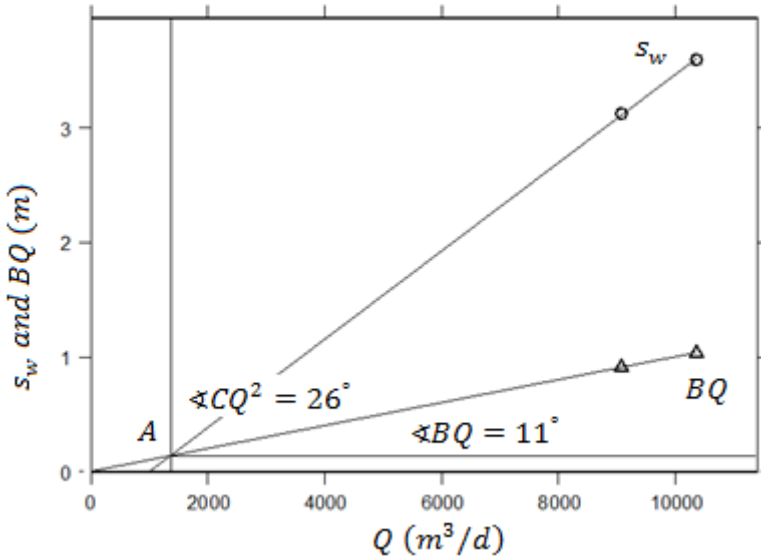
أهم ما يميز هذه الطريقة ما يلي:-

- تحديد كمية الضخ المثلى التي يفترض أن تعمل بها البئر.

- تحديد قيمة فاقد الخزان الجوفي عند النقطة A ، وهي نقطة تلاقي خط فاقد الخزان الجوفي مع خط الانخفاض الكلي في المنسوب.
 - تفادي حدوث مكون فواقد البئر وذلك بالتحكم في قيمة التصريف وقيمة فقد البئر التي تنتهي عند نقطة ما على المحور الأفقي ومقابلة النقطة A .
 - الفصل والتمييز ما بين أنواع التدفقات المختلفة.
- مثال (9.3):-

- من بيانات ضخ البئر بالجدول (9.2). المطلوب تحديد القيم التالية:-
 - أقصى قيمة لتصريف البئر والتي عندها تنعدم خسائر البئر غير الخطية.
 - كفاءة البئر.
 - السعة النوعية مع تقييم نتائج تلك الاختبارات.
- الحل:-

1/ بيانات الضخ خلال المرحلة الأولى والثانية



شكل (9.5):- معلومات البئر خلال مرحلة الضخ الأولى والثانية.

أولاً: طريقة الانخفاض في المنسوب:-

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي أمثل قدره 1300 م³/يوم عندها يكون التدفق نحو البئر صفائحي وفيه يكون الانخفاض في المنسوب خلال مرحلتي الضخ الأولى والثانية (s_{1,2}) يساوي 0.2 متر.

من الشكل أعلاه

$$Q = 1300 \text{ m}^3/d \quad s_w = 3.6 \text{ m} \quad BQ = 1.04 \text{ m}$$

الخسائر المضطربة بالبئر

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ = 3.6 - 1.04 = 2.56 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي الخطية عند النقطة A

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 0.2 \text{ m}$$

خسائر البئر الخطية

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 1.04 - 0.2 = 0.84 \text{ m}$$

مجموع الخسائر الخطية

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 0.2 + 0.84 = 1.04 \text{ m}$$

مجموع الخسائر الكلية

$$\text{Total drawdown } s_w = BQ + CQ^2 = 1.04 + 2.65 = 3.69 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{0.55 + 0.76}{1.04 + 2.56} \times 100 = 29\%$$

السعة النوعية

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{10368}{3.6} = 2880 \text{ m}^2/d$$

ثانياً: طريقة الزاوية:-

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 11^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 26^\circ$$

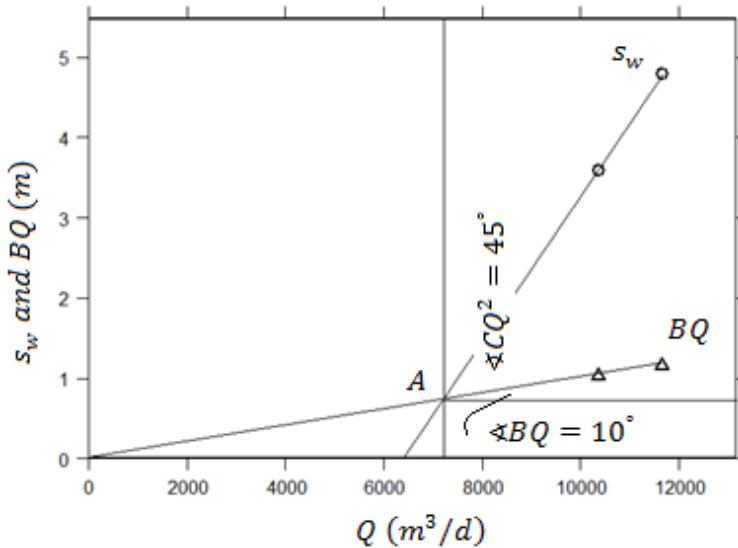
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \angle s_w = 37^\circ$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{11^\circ}{37^\circ} \times 100 = 29.7\%$$

2/ بيانات الضخ خلال المرحلة الثانية والثالثة



شكل (9.6):- معلومات البئر خلال مرحلة الضخ الثانية والثالثة.

أولاً: طريقة الانخفاض في المنسوب:-

الانخفاض في المنسوب خلال مرحلتي الضخ الثانية والثالثة ($s_{2,3}$) تساوي 0.7 متر.
الخسائر المضطربة بالبنر

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ = 4.8 - 1.17 = 3.63 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي الخطية عند النقطة A

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 0.7 \text{ m}$$

خسائر البنر الخطية

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 1.17 - 0.7 = 0.47 \text{ m}$$

مجموع الخسائر الخطية

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 0.7 + 0.47 = 1.17 \text{ m}$$

كفاءة البنر

$$\begin{aligned} E_w &= \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{0.7 + 0.47}{1.17 + 3.63} \times 100 \\ &= \frac{1.17}{4.8} \times 100 = 24.4\% \end{aligned}$$

السعة النوعية

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{11664}{4.8} = 2430 \text{ m}^2/d$$

ثانياً: طريقة الزاوية:-

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \angle CQ^2 = 45^\circ$$

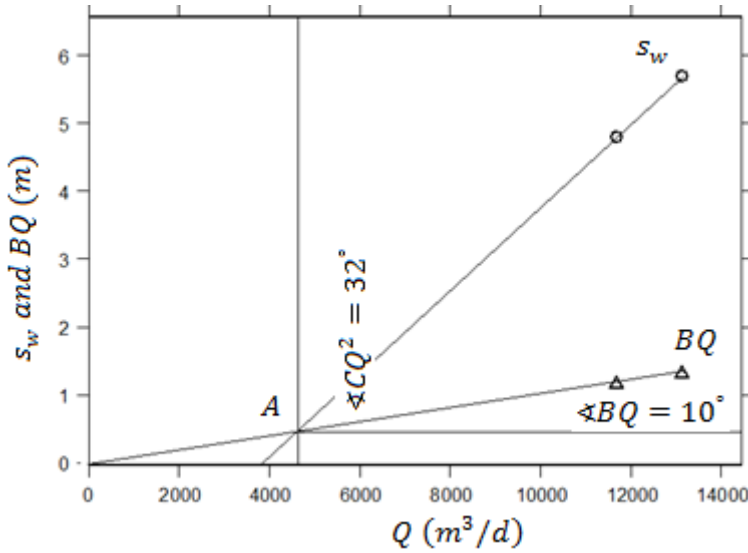
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \angle s_w = 55^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 = \frac{10^\circ}{55^\circ} \times 100 = 18.2\%$$

3/ بيانات الضخ خلال المرحلة الثالثة والرابعة



شكل (9.7):- معلومات البئر خلال مرحلة الضخ الثالثة والرابعة.

أولاً: طريقة الانخفاض في المنسوب:-

الانخفاض في المنسوب خلال مرحلة الضخ الثالثة والرابعة ($s_{3,4}$) تساوي 0.5 متر.

الخسائر المضطربة بالبئر

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ = 5.7 - 1.31 = 4.39 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي الخطية عند النقطة A

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 0.5 \text{ m}$$

خسائر البئر الخطية

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 1.31 - 0.5 = 0.81 \text{ m}$$

مجموع الخسائر الخطية

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 0.5 + 0.81 = 1.31 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{0.5 + 0.81}{1.31 + 4.39} \times 100 = 23.0\%$$

السعة النوعية

$$\begin{aligned} \frac{Q}{s_w} &= \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{13132.8}{5.7} \\ &= 2304 \text{ m}^2/d \end{aligned}$$

عند تقييم نتائج اختبارات القدرات المحددة على مراحل الضخ المتتالية نجد أنها تقل تدريجياً من 2880، 2430 و 2304 م²/يوم على التوالي مع زيادة معدل الضخ من 9072 إلى 13132.8 م³/يوم جدول (8.2). ويعزى سبب انخفاض القدرة المحددة المحسوبة مع زيادة معدل الضخ والمدة الممتدة بسبب زيادة خسائر الخزان الجوفي مع الوقت وخسارة البئر غير الخطية. وبناءً على تصنيف العالم Sen 1995 والذي يوضح العلاقة التي تربط بين السعة المحددة وأنواع انتاجية الآبار تصنف هذه البئر على أنها تضخ بإنتاجية عالية (أعلى من 18 متر مربع/ساعة) جدول (2.1).
ثانياً: طريقة الزاوية:-

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \angle BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \alpha CQ^2 = 32^\circ$$

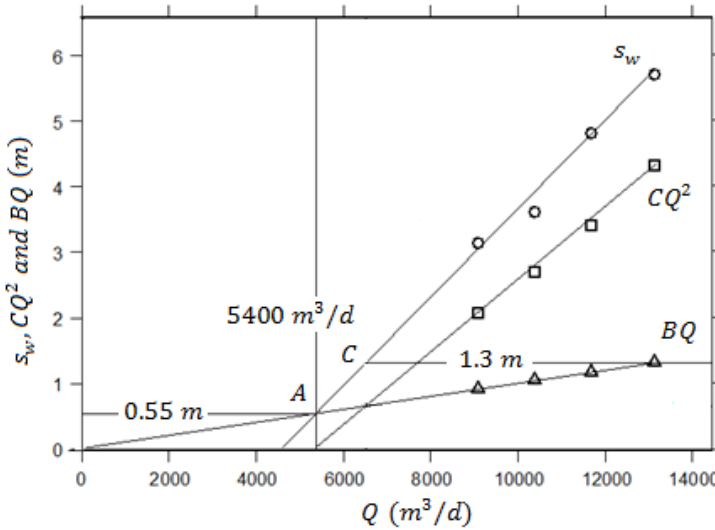
قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \alpha s_w = 42^\circ$$

كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha s_w} \times 100 = \frac{10^\circ}{42^\circ} \times 100 = 23.8\%$$

4/ متوسط مراحل الضخ المختلفة



شكل (9.8):- متوسط قيم بيانات البئر خلال مراحل الضخ المختلفة.

أولاً: طريقة الانخفاض في المنسوب:-

الخسائر المضطربة بالبئر

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = s_w - BQ = 5.7 - 1.31 = 4.39 \text{ m}$$

خسارة الخزان الجوفي الخطية عند النقطة A

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 0.55 \text{ m}$$

خسائر البئر الخطية

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 1.31 - 0.55 = 0.76 \text{ m}$$

مجموع الخسائر الخطية

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 0.55 + 0.76 = 1.31 \text{ m}$$

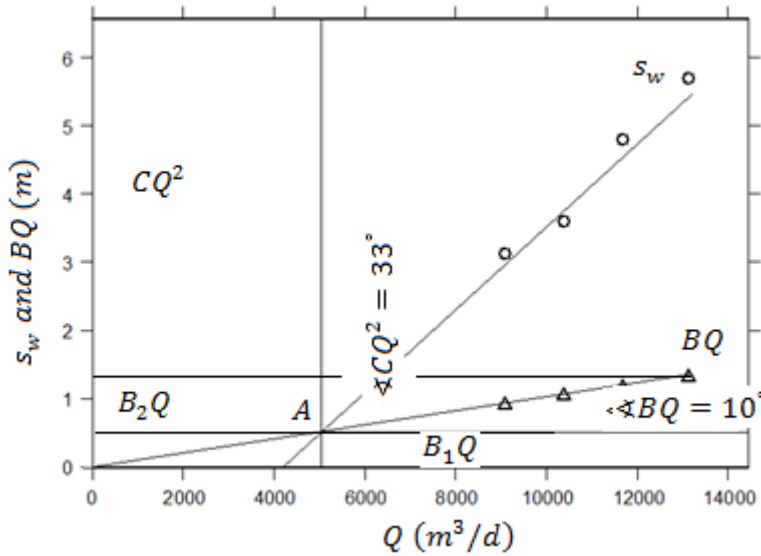
كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{0.55 + 0.76}{1.31 + 4.4} \times 100 = 23.0\%$$

السعة النوعية

$$\begin{aligned} \frac{Q}{s_w} &= \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{13132.8}{5.7} \\ &= 2304 \text{ m}^2/\text{d} \end{aligned}$$

ثانياً: طريقة الزاوية:-



شكل (9.9):- يوضح قيم الزوايا لخسائر الخزان الجوفي وخسائر البئر.

قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } BQ = \alpha BQ = 10^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = \alpha CQ^2 = 33^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \alpha s_w = 43^\circ$$

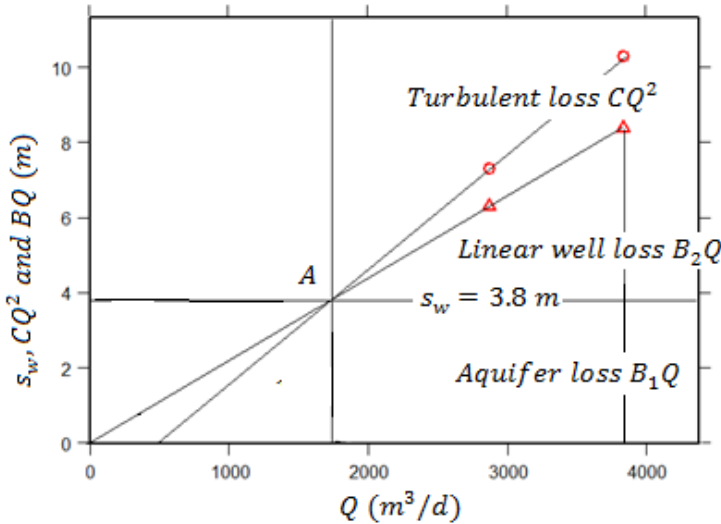
كفاءة البئر

$$\text{Well efficiency } E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha s_w} \times 100 = \frac{10^\circ}{43^\circ} \times 100 = 23.3\%$$

مثال (9.4):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول (9.1)، المطلوب تقدير كفاءة البئر والسعة النوعية.

أولاً: معلومات الضخ خلال المرحلة الأولى والثانية



شكل (9.10):- يوضح نتائج مرحلتي الضخ الأولى والثانية.

طريقة الانخفاض في المنسوب:-

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = 10.3 - 8.4 = 1.9 \text{ m}$$

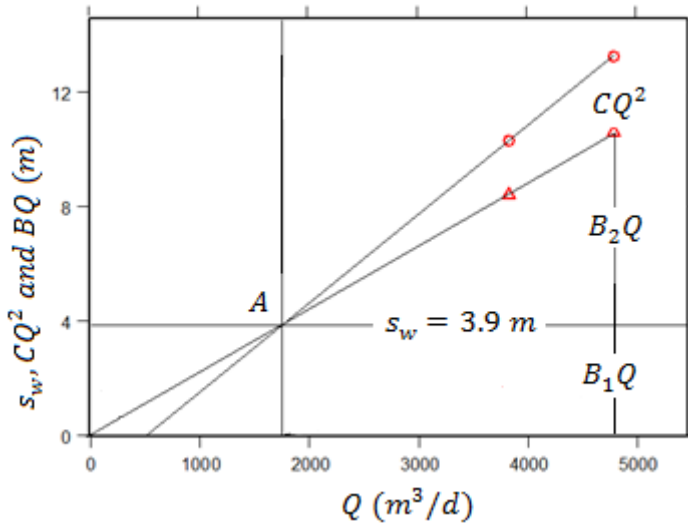
$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 3.8 \text{ m}$$

$$\text{Linear well loss } B_2Q = 8.4 - 3.8 = 4.6 \text{ m}$$

$$BQ = B_1Q + B_2Q = 3.8 + 4.6 = 8.4 \text{ m}$$

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{8.4}{8.4 + 1.9} \times 100 = \frac{8.4}{10.3} \times 100 = 81.6\%$$

ثانياً: معلومات الضخ خلال المرحلة الثانية والثالثة



شكل (9.11):- معلومات البئر خلال مرحلتي الضخ الثانية والثالثة.

طريقة الهبوط في المنسوب

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

$$\text{Aquifer loss } B_1Q = 3.9 \text{ m}$$

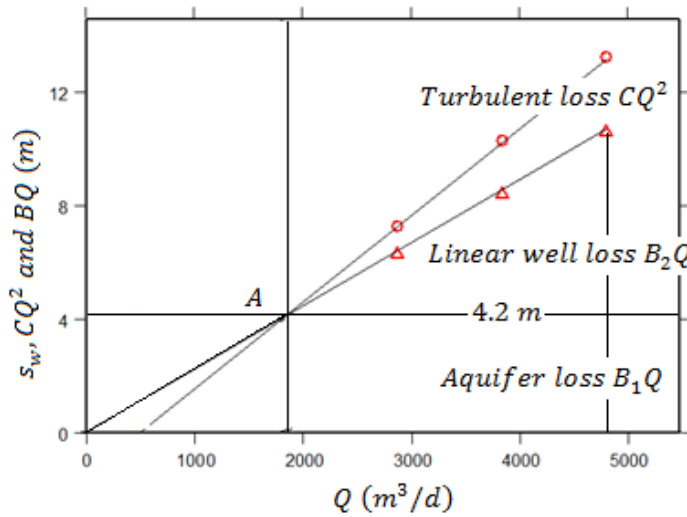
$$\text{Linear well loss } B_2Q = 10.6 - 3.9 = 6.7 \text{ m}$$

$$BQ = 3.9 + 6.7 = 10.6 \text{ m}$$

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{10.6}{10.6 + 2.65} \times 100$$

$$= \frac{10.6}{13.25} \times 100 = 80.0\%$$

ثالثاً: متوسط قيم مراحل الضخ المختلفة



شكل (9.12):- متوسط قيم مراحل الضخ الثلاثة.

أولاً: طريقة الهبوط في المنسوب

$$Turbulent \text{ loss } CQ^2 = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

$$Aquifer \text{ loss } B_1Q = s_1 = 4.2 \text{ m}$$

$$Linear \text{ well loss } B_2Q = 10.6 - 4.2 = 6.4 \text{ m}$$

$$Laminar \text{ loss } BQ = 4.2 + 6.4 = 10.6 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} \times 100 = \frac{10.6}{10.6 + 2.65} \times 100 = 80.0\%$$

السعة النوعية

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{(B_1 + B_2)Q + CQ^2} = \frac{Q}{BQ + CQ^2} = \frac{4800}{13.25} = 362.3 \text{ m}^2/d$$

ثانياً: معادلة جاكوب (3.7)

خسارة الخزان الجوفي B_1Q عند نقطة التقاطع A بالشكل أعلاه:

$$Q = 4800 \text{ m}^3/d \quad KD = 725.4 \text{ m}^2/d \quad t = 1 \text{ day}$$

$$r_e^2 = 0.25 \quad S = 8.310^{-5}$$

$$\begin{aligned} \text{Aquifer loss } B_1Q &= \frac{2.3Q}{4\pi KD} \log \frac{2.25KDt}{r_w^2 S} \\ &= \frac{2.3 \times 4800}{\pi \times 4 \times 725.4} \log \frac{2.25 \times 725.4 \times 1}{(0.25)^2 \times 8.3 \times 10^{-5}} = 10.2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Linear well loss } B_2Q = BQ - B_1Q = 10.6 - 10.2 = 0.4 \text{ m}$$

$$\text{Laminar loss } BQ = B_1Q + B_2Q = 10.2 + 0.4 = 10.6 \text{ m}$$

$$\text{Turbulent loss } CQ^2 = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

$$\text{Total well loss} = B_2Q + CQ^2 = 0.4 + 2.65 = 3.05 \text{ m}$$

$$\text{Total drawdown } s_w$$

$$= \text{Laminar loss } BQ + \text{Turbulent loss } CQ^2$$

$$= 10.6 + 2.65 = 13.25 \text{ m}$$

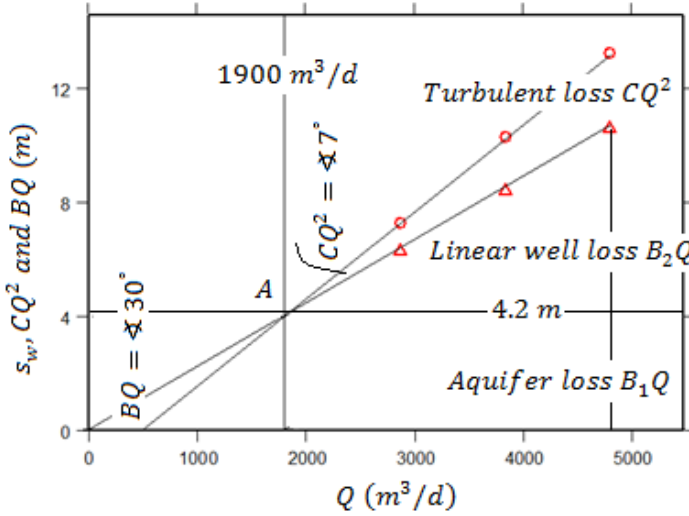
كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{10.6}{10.6 + 2.65} \times 100 = \frac{1060}{13.25} = 80.0\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{4800}{13.25} = 362.3 \text{ m}^2/d$$

ثالثاً: طريقة الزاوية:-



شكل (9.13):- يوضح نقطة التغير عند الضخ بمعدل 1900 م³/يوم والهبوط 4.2 م. من النسبة المئوية لقيمة الزاوية المحصورة بين خسائر التدفق الرقائقي والمضطرب يمكن تحديد كفاءة البئر كما يلي:-
قيمة زاوية خسارة التدفق الرقائقي

$$\text{Laminar loss } \angle BQ = 30^\circ$$

قيمة زاوية خسائر التدفق المضطرب

$$\text{Turbulent loss } \angle CQ^2 = 7^\circ$$

قيمة زاوية الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total losses } \angle s_w = 37^\circ$$

كفاءة البئر

$$\begin{aligned} \text{Well efficiency } E_w \% &= \frac{\angle BQ}{\angle BQ + \angle CQ^2} = \frac{\angle BQ}{\angle s_w} \times 100 \\ &= \frac{30^\circ}{37^\circ} \times 100 = 81.1\% \end{aligned}$$

يستفاد من هذه الطريقة في تحديد الأنواع المختلفة من الخسائر التي تحدث أثناء ضخ البئر بالتفصيل، وتعتبر الطريقة مقدمة تمهد الطريق إلى فهم اختبار التصريف الأمثل الذي يجب أن تضخ به البئر.

الطريقة الثانية:- اختيار التصريف الأمثل

يعتبر اختبار طبقة المياه الجوفية أداة شائعة، يستخدمها الهيدروجيولوجي لتشخيص نوع طبقة المياه الجوفية والتدفق وحدود النظام والسحب الآمن. ويجرى هذا الاختبار (اختبار الضخ) لتقييم طبقة المياه الجوفية عن طريق تحفيز الطبقة الحاملة للمياه الجوفية وذلك من خلال الضخ المتدرج أو المستمر مع مراقبة استجابة طبقة المياه الجوفية لعملية الضخ بغرض معرفة مقدار ومستوى هبوط المياه.

تمر آبار المياه خلال عملية الضخ بعدة مراحل من الكفاءات المختلفة التي تقل كلما قلت فترة الضخ وكمية التصريف، وأيضاً تقل الكفاءة كلما زادت فترة الضخ وكمية تصريف البئر عن الحد الأمثل، وبناءً على ذلك تختلف كفاءة البئر خلال مراحل عملية الضخ. وفي هذه الدراسة تم عقد مقارنة لطيفة ما بين عدد من التصريفات التي تعمل بها البئر خلال تجربة الضخ المتدرج متعدد المراحل والتصريف الأمثل الذي يجب أن تعمل وتضخ به البئر وذلك بهدف الوصول إلى الكفاءة المثلى مع أقل انخفاض ممكن في المنسوب، وبهذه الكيفية نتجنب إجهاد طبقة المياه الجوفية وخسائر مكونات البئر.

من الأفكار التي سوف يتعرض لها هذا الفصل تتمثل في كيفية إيجاد قيمة ثابت فاقد الخزان الجوفي وثابت فقد البئر رياضياً من المعادلة (8.2 و 8.4) ودون اللجوء إلى الرسم البياني (فاقد الخزان الجوفي مقابل الهبوط النوعي) شكل (8.19). أيضاً ذهبت هذه الطريقة إلى كيفية تقدير كفاءة البئر من خلال ادخال قيم B و C والانخفاض النوعي في المعادلة (7.5).

المراحل التي تمر بها البئر خلال عملية الضخ:- The stages that the well goes through during the pumping process

المفهوم السائد أنه كلما تم ضخ البئر بكمية تصريف أكبر كلما كانت البئر ذات كفاءة عالية وعائد أفضل، هذا المفهوم يتناقض مع ما توصلت اليه الدراسة في هذا الفصل من استنتاجات مختلفة بشأن كفاءة البئر، فالخصائص الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية (الانتقالية، درجة التوصيل المائي والتخزينية) الحفر الجوفي وتصميم البئر هي التي تتحكم في كفاءة البئر.

من المعروف أن ضخ البئر بكمية تصريف أكبر من جهد وطاقة الخزان الجوفي يكون له تأثير سلبي على الخزان الجوفي يعمل على تحريك مواد الخزان الناعمة في اتجاه مصفاة البئر، هذا بالإضافة إلى بعض الأخطاء الفنية التي يقع فيها الجيولوجي المصمم أثناء تصميم وضخ البئر. ولتفادي هذه السلبيات يجب ضخ البئر بكمية تصريف مناسبة تتوافق مع خصائص الخزان الجوفي وتصميم البئر. وهنا يأتي السؤال ماهي كمية الضخ المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر؟ لتقدير كمية التصريف المناسبة التي يجب أن تضخ بها البئر وضعت هذه الطريقة موجهات معينة تعمل على اختبار طبقة المياه الجوفية وذلك بضخها بكميات تصريف مختلفة والتي منها يصل الدارس إلى كمية الضخ المثلى التي عندها تصل البئر إلى كفاءتها القصوى. ولتحقيق هذه الموجهات علينا اتباع عدد من الخطوات التي تساعد في تطبيق هذه الطريقة، ومن أهم هذه الخطوات ما يلي:-

- وقع قيم تصريف البئر خلال مراحل الضخ المختلفة أفقياً على مقياس رسم حسابي مقابل قيم الانخفاض الكلي في المنسوب، خسارة طبقة المياه الجوفية وخسائر البئر رأسياً على نفس مقياس الرسم السابق شكل (9.14).

- صل نقاط معلومات فاقد الخزان الجوفي بخط مستقيم ينتهي عند نقطة تلاقي المحورين السيني والصادي، وفيها تكون قيمة فاقد الخزان الجوفي تساوي صفر.

- صل نقاط معلومات الانخفاض الكلي في المنسوب بخط مستقيم يقطع خط معلومات فاقد الخزان الجوفي عند النقطة A والتي فيها نقرأ قيمة التصريف الأمثل Q_{opt} على المحور الأفقي، وعند هذه النقطة يتساوى منسوب الماء بالخزان الجوفي مع منسوب الماء داخل البئر، وبمعنى آخر تنعدم عند هذه النقطة مكونات خسائر البئر. وأخيراً يواصل خط بيانات الانخفاض في المنسوب مساره وامتداده لينتهي عند نقطة معينة بالمحور الأفقي.

- صل نقاط معلومات فواقد البئر بخط مستقيم يقطع المحور الأفقي عند نقطة معينة على المحور الأفقي تكون مقابلة للنقطة A ، وفيها تكون قيمة فواقد البئر تساوي صفر.

- مد من النقطة A خط أفقي يقطع المحور الرأسي لنقرأ قيم الانخفاض الأمثل S_{wopt} في منسوب الماء عند زمن معين من مراحل الضخ المختلفة.

- أحسب كفاءة البئر المثلى من معلومات قيمة التصريف الأمثل والانخفاض الأمثل في منسوب الماء عند النقطة A ، وفي هذه المرحلة تنعدم فواقد البئر ويسود فاقد الخزان الجوفي، وعليه يستطيع الباحث تقدير كفاءة البئر المثلى من قسمة فاقد الخزان الجوفي على الانخفاض الكلي في مستوى سطح الماء داخل البئر، وتقرأ الكفاءة عندما يتم التعبير عنها كنسبة مئوية من المعادلة على النحو التالي:-

$$E_w = \frac{BQ_{opt.}}{S_{wopt.}} \times 100 \dots \dots \dots (9.1)$$

- للتأكد من صحة هذه الطريقة أحسب كفاءة البئر المثلى من زاوية تقاطع خط مسار فاقد الخزان الجوفي مع خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A كما جاء في المعادلة (5.1).

- للمقارنة ما بين كفاءة البئر بالفقرة السابقة وأي نقطة أخرى على المحور الأفقي اختر أي نقطة ما على المحور الأفقي ومنه حدد قيمة تصريف البئر، ومن هذه النقطة يقام خط عمودي يوازي المحور الرأسي (الصادي) ومنه حدد قيم الانخفاض الكلي في المنسوب، فاقد الخزان الجوفي وفواقد البئر إن وجدت، ومنا تقدر كفاءة من المعادلة (2.2).

أهم إجابيات الطريقة:-

عند تفسير نتائج تجربة الضخ المتدرج يستطيع الباحث تقدير كفاءة البئر ولكنه لا يمكن التحكم في تعديل كفاءة البئر. ولكن الجديد في هذا الفصل أنه يناقش إمكانية تعديل كفاءة البئر حتى تصل إلى كفاءتها العظمي عند نقطة التقاء أو تقاطع خط بيانات فاقد الخزان الجوفي مع خط الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A. وتعتبر هذه الطريقة مرشد ودليل يقود إلى وضع تصميم جيد ومناسب للبئر من خلاله يحدد كمية الضخ المثلى. وعموماً من مميزات هذه الطريقة ما يلي:-

- عند تحديد كمية الضخ المطلوبة وحسب الحاجة عندها يمكن التنبؤ بقيم فاقد الخزان الجوفي، فواقد البئر والانخفاض الكلي في المنسوب.
- تحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تعمل بها البئر.
- التحكم في تعديل كفاءة البئر بعد تشييدها وقبل البدء في عملية الضخ والتشغيل النهائي وذلك من خلال التحكم في كمية الضخ المطلوبة والانخفاض في المنسوب.
- تفادي الأخطاء التصميمية التي صاحبت إنشاء البئر وذلك من خلال التحكم في كمية الضخ بحيث تكون كفاءة البئر 100%.

- وصول البئر إلى حالة الثبات وفيها تتساوي كمية الضخ مع كمية التغذية.

- تقليل الحد من إجهاد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية.

- المحافظة على مصافي البئر.

- منع دخول مواد التكوين الجيولوجية الناعمة إلى داخل البئر.

- زيادة العمر الافتراضي للبئر.

- تقليل تكلفة تشغيل المضخة.

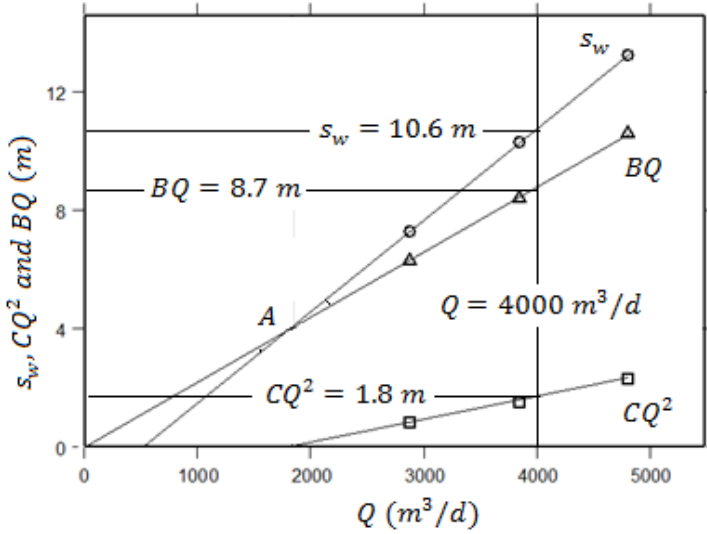
مثال (9.5):-

من معلومات البئر الموضحة بالجدول (9.1)، المطلوب تقدير كفاءة البئر والسعة

النوعية في عدد من مراحل الضخ المختلفة.

الحل:-

أولاً: عند الضخ بمعدل 4000 متر مكعب لكل يوم.



شكل (9.14):- كفاءة البئر عند الضخ بمعدل تشغيلي 4000 متر مكعب لكل يوم.

$$BQ = 8.7 \text{ m} \quad CQ^2 = 1.8 \text{ m} \quad s_w = 10.6 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{8.7}{10.6} \times 100 = 82.1\%$$

حل آخر: طريقة المعامل
معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{8.7}{4000} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

معامل فاقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{1.8}{(4000)^2} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 1.1 \times 10^{-7} \times 4000 = 4.5 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

يشير المعامل C والبالغ $1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$ إلى أن البئر قد تم تطويرها وتصميمها بشكل جيد عبر والتون 1962 جدول (3.1) غير أن كفاءة البئر لم تصل إلى حد 100%.

الانخفاض النوعي

$$s_w/Q = \frac{10.6}{4000} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 2.2 \times 10^{-3} + 4.5 \times 10^{-4} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

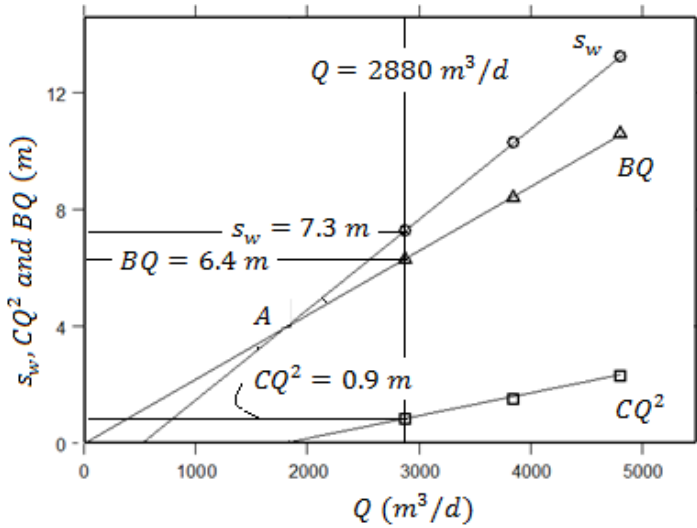
$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{2.7 \times 10^{-3}} \times 100 = 81.5\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{4000}{10.6} = 377.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

عند تحليل البيانات باستخدام الطريقة الرسومية وتقنية الانحدار أظهرت النتائج عدم التوافق بين الهبوط الملحوظ والمتوقع، وعليه يتأثر الهبوط في هذه المرحلة من الاختبار وبشكل أساسي بمكون خسارة الخزان الجوفي ويمكن فقد البئر، مما يعني أن البئر لم تصل إلى حد الكفاءة العظمى وبالتالي يوصى بخفض الطاقة التشغيلية أقل من 4000 م³/يوم.

ثانياً: عند الضخ بمعدل 2880 متر مكعب لكل يوم.



شكل (9.15):- كفاءة البئر عند الضخ بمعدل 2880 متر مكعب لكل يوم.

$$BQ = 6.4 \text{ m} \quad CQ^2 = 0.8 \text{ m} \quad s_w = 7.3 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{6.4}{7.3} \times 100 = 87.7\%$$

حل آخر: طريقة المعامل

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{6.4}{2880} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

معامل فاقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.9}{(2880)^2} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = \frac{CQ^2}{Q} = \frac{0.9}{2880} = 3.1 \times 10^{-4} \text{ d}/\text{m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{7.3}{2880} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ d}/\text{m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 2.2 \times 10^{-3} + 3.1 \times 10^{-4} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ d}/\text{m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} \times 100 = 88.0\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2880}{7.3} = 394.5 \text{ m}^2/\text{d}$$

توصلت هذه الطريقة إلى أن الكفاءة التشغيلية لهذه البئر تختلف باختلاف كمية التصريف، وهنا يحتاج الجيولوجي إلى تحديد كمية التصريف المثلى التي تصل عندها البئر إلى كفاءتها المثلى. ولتحقيق ذلك يلاحظ أن كفاءة البئر تزيد مع نقصان كمية الضخ التي يتبعها تعافي ملحوظ في منسوب الماء، ففي حالة الضخ بمقدار 4000 متر مكعب لكل يوم تكون الكفاءة 82.0%، وتستمر البئر في زيادة كفاءتها لتصل إلى 88.0% وذلك عند ضخها بمعدل 2880 متر مكعب لكل يوم شكل (9.14 و 9.15).

وفي نفس الوقت تزداد السعة النوعية من 377.4 إلى 394.5 متر مربع لكل يوم مع نقصان كمية الضخ. بعد دراسة هذه الحالة تم وضع افتراض بشكل مشابه للحالة الفعلية بأن هذه النتائج شبه مثالية، وهي تؤكد مدى صحة تطبيق هذه الطريقة، وأنه كلما زادت كمية الضخ عند الحد الأمثل يكون هنالك مردود سلبي على التكوينة الجيولوجية ومصفاء البئر. وعليه يمكن التحكم في كفاءة البئر من خلال تقليل تأثير الضخ الجائر إلى حد كبير.

الاستنتاجات:-

في هذا المثال نجد أن البئر تمر خلال مراحل الضخ المتدرج بعدة كفاءات، ويعزى الاختلاف في نسب هذه الكفاءات إلى الآتي:-

- الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي

- طاقة جهد الخزان الجوفي

- الاختلاف في كمية الضخ

- المواد المستخدمة في انشاء وبناء البئر

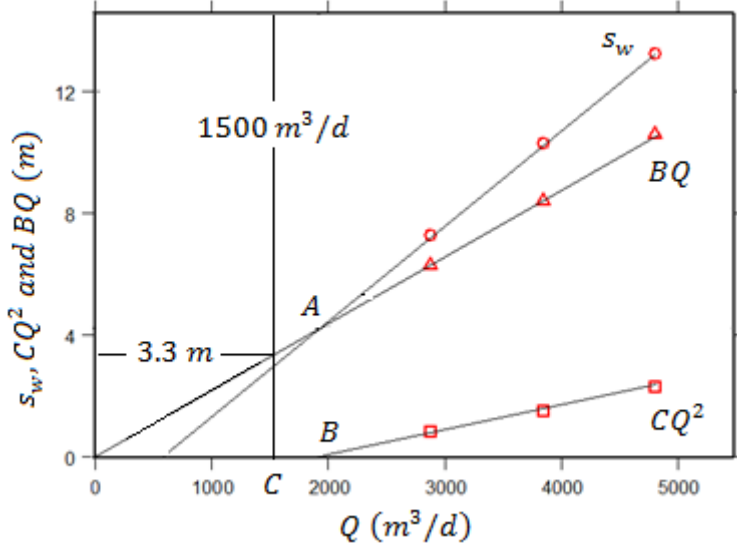
- نوعية المياه الجوفية

يستخدم اختبار السحب التدريجي على نطاق واسع لتحديد سلوك البئر: تحديد فقد البئر وحساب كفاءة البئر. والمعروف أن السحب داخل بئر الضخ يتأثر بمكون فقد الخزان الجوفي ومكون فقد البئر، ويوضح هذا المثال الانخفاض الملحوظ والمرتبط بمعدلات الضخ المرحلية أثناء إجراء اختبار السحب المتدرج. وبناءً على نتائج تحليل اختبار السحب المتدرج الأول كما مبين في الشكل (9.14) أن فقدان البئر ضئيل نسبياً وثنائوي ويقدر بـ 1.8 متر مقارنة بالهبوط المرتبط بفقدان الخزان الجوفي والبالغ 8.7 متر. ويشير الشكل (9.15) إلى أن الهبوط ومعدل الضخ المتدرج والمرتبط بالسحب التدريجي الثاني طفيف جداً في مكونات الخزان الجوفي وفقدان البئر، وعليه فإن نتائج

الاختبار الثاني مقارنة بنتائج الاختبار الأول هي: فقد الخزان الجوفي 6.4 أقل من 8.7 متر، وفقد البئر 0.8 متر أقل من 1.8 متر. وبالمثل كفاءة البئر بناءً على معلومات السحب التدريجي المكونة من الخطوتين والواردة في الشكل (9.14) و (9.15) تمت الإشارة إلى أن كفاءة البئر عالية نسبياً لنطاق معدل الضخ المستخدم أثناء اختبار الهبوط التدريجي خلال مرحلة الضخ الثانية $Q = 88\% - E_w$ مقارنة بالمرحلة الأولى من الضخ $Q = 82\% - E_w$ $2880 \text{ m}^3/d$ مما سبق يستنتج أنه في حالة معدلات الضخ المرتفعة تنخفض كفاءة البئر بسبب الأهمية المتزايدة لفقد البئر عند معدلات الضخ الأعلى كما هو موضح في الشكل (9.14). استناداً إلى مقارنة كفاءة البئر في المثالين يلاحظ حدوث تحسن بنسبة 6 في المائة في خصائص الانتاج/ هبوط البئر ضمن أنشطة تطوير البئر التي تم تنفيذها بين السحب التدريجي للاختبار الأول والثاني. واستناداً إلى تحليل انحدار جميع الفواقد تمت الإشارة إلى حساب معامل خسارة الخزان الجوفي بمقدار $2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$ وهو أكبر من قيمة معامل خسارة البئر المنخفض نسبياً $1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$ ووفقاً لتصنيف معامل فقد البئر في دراسة سابقة عبر والتون 1962 جدول (3.1) وبالنظر إلى الارتباط بين ظروف البئر وقيم المعامل C يبدو أن البئر قد تم تصميمها وتطويرها بشكل مناسب.

تتمثل أهمية تطوير البئر من الغرض الذي من أجله تم إنشاء وبناء البئر، ومن ناحية اقتصادية يمكن التخلي عن البئر إذا كانت ذات كفاءة قليلة جداً أو بالإمكان تقليل تصريف البئر لإطالة العمر المتوقع لها، غير أن الآبار عالية الكفاءة أقل تكلفة للتشغيل لأنها تتطلب طاقة أقل لتشغيل المضخة. ولتحديد نظام الكفاءة التشغيلية المثلى التي يجب أن تعمل بها آبار المياه الجوفية لابد من اختيار كمية التصريف المثلى راجع الطريقة الثالثة.

ثالثاً: عند الضخ بمعدل 1500 متر مكعب لكل يوم.



شكل (9.16):- قيم الاختبار الهيدروليكي للبئر عند ضخ البئر بمعدل 1500 متر مكعب لكل يوم.

يخبرنا الشكل أعلاه بأن البئر تم ضخها بكمية أقل من تصميمها الهندسي وبدليل أن خط مسار الهبوط الكلي في المنسوب يمر أسفل خط مسار فاقد الخزان الجوفي، علاوة على أن خط مسار فقد البئر يمر أسفل المحور الأفقي لتصريف البئر عند النقطة C . تم ضخ البئر بطاقة تشغيلية أقل من طاقتها التصميمية وبالتالي فإن البئر لم تصل إلى مرحلة الثبات عند ضخها بهذا المعدل بدليل أن فقد البئر أقل من الصفر إن صح التعبير، وعليه يجب زيادة كمية الضخ ليزداد الهبوط بالخزان الجوفي وداخل البئر حتى تصبح قيمة فواقد البئر تساوي صفر عند النقطة B ، وتعتبر هذه المرحلة من الضخ بمثابة دليل توضح الحالة الهيدروليكية للبئر منذ بداية الضخ حتى الوصول إلى النقطة المثالية A التي فيها يتقاطع خط مسار الهبوط مع خط مسار فقد الخزان الجوفي وكذلك النقطة B التي بعدها تبدأ فواقد البئر في الظهور والتكوين.

$$Q = 1500 \text{ m}^3/d \quad s_w = BQ = 3.3 \text{ m}$$

$$s_{wopt.} = BQ_{opt.} = 4.2 \text{ m} \quad CQ^2 = 0.0 \text{ m}$$

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ}{Q} = \frac{3.3}{1500} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{BQ}{Q} = \frac{3.3}{1500} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 2.2 \times 10^{-3} + 0.0 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

قيمة الانخفاض النوعي من الهبوط الأمثل مقابل كمية الضخ 1500 م³/يوم

$$\frac{s_{wopt.}}{Q} = \frac{BQ_{opt.}}{Q} = \frac{4.2}{1500} \times 100 = 2.8 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_{wopt.}} \times 100 = \frac{3.3}{4.2} \times 100 = 78.6\%$$

$$E_w = \frac{B}{s_{wopt.}/Q} \times 100 = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{2.8 \times 10^{-3}} \times 100 = 78.6\%$$

عند تحليل البيانات باستخدام الطريقة الرسومية وتقنية الانحدار أظهرت النتائج التوافق بين الهبوط الملحوظ والمتوقع وذلك عند معدل الضخ المنخفض والبالغ 1500 م³/يوم، وعليه يتأثر الهبوط في هذه المرحلة من الاختبار وبشكل أساسي بمكون خسارة الخزان الجوفي فقط مقارنة بمكون فقد البئر، وبمعنى أدق عنصر فقدان

الخزان الجوفي هو السائد عند معدل التصريف المنخفض ولكن ومع ذلك فإن البئر لم يصل إلى حد الكفاءة العظمى وبالتالي يوصى برفع الطاقة التشغيلية أكثر من 1500 م³/يوم، ولتحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر راجع الطريقة الثالثة في هذا الفصل.

الطريقة الثالثة: التحكم في ضبط كفاءة البئر

عند تطبيق هذه الطريقة يستطيع الباحث من التحكم في ضبط وتعديل كفاءة البئر حتى يصل إلى الكفاءة العظمى التي يجب أن تضخ بها البئر، وذلك عندما يقال في المجتمع الهيدروجيولوجي أن البئر ذات كفاءة عالية 100 في المائة إذا لم تظهر فيها أي خسائر بالبئر، وفي هذه الحالة يصبح المصطلح CQ^2 يساوي صفراً، وعليه يجب أن يولي ضبط وتحديد كفاءة البئر أهمية قصوى عند تطوير البئر في أي حقل من حقول آبار المياه الجوفية. وتشير أهمية تحديد كفاءة البئر إلى ما إذا كان ينبغي التخلي عن البئر إذا كانت ذات كفاءة منخفضة للغاية أو سيحدد ما إذا كان ينبغي تقليل تصريف البئر من أجل إطالة العمر المتوقع للبئر، وعليه يجب وضع تلك الشواهد في الاعتبار عند تصميم الآبار في المستقبل بالحقل الجيولوجي المعني. وكالعادة يحاول دائماً جيولوجي الحقل أن يصل بالبئر إلى كفاءتها العظمى، وذلك لأن الآبار عالية الكفاءة تعتبر أقل تكلفة عند التشغيل وهي تتطلب طاقة أقل لتشغيل المضخة، وعادةً ما يمكن الحصول على كفاءة جيدة من 70 إلى 80 في المائة إذا تم اتباع تصميم مناسب وفعال عند تشييد وتطوير البئر بصورة فعالة. وعموماً، عندما تكون إنتاجية البئر أقل من المتوقع فيما يتعلق بالقيم النظرية عندها فإن كفاءة البئر المنتج تكون أقل من 100%، وفي هذا الشأن أوضحت العديد من الدراسات أن كفاءة البئر إذا كانت أقل من 65% فهذا يعني الإفراط في التصريف على الآبار وذلك عند إجراء اختبار الضخ التدريجي أو اختبار الضخ المستمر. وتتطلب حالة انخفاض كفاءة البئر أن يتم إجراء فحص

للحالة الفنية للبئر. ولهذا الغرض يمكن للباحث استخدام الطرق والاختبارات الهيدروليكية لمعرفة سبب انخفاض كفاءة البئر أو عن طريق مراقبة الحالة الفنية للآبار باستخدام تقنيات الفيديو، حيث تسمح عمليات فحص التلفزيون بتقييم أخطاء البناء والتشييد والتغيرات التي حدثت أثناء استغلال المدخول Intake، وأيضاً تسمح هذه التقنية بتحديد الآبار التالفة.

تطبيق الطريقة:-

بعد تشييد البئر يتم اجراء تجربة الضخ التدريجي لمعرفة كفاءتها، فإذا كانت الكفاءة ضعيفة اقل من 70% عندها لابد من وضع تصور معين يعمل على رفع كفاءة البئر. ولتحقيق هذا الهدف هنالك ضوابط معينة يمكن من خلالها التحكم في ضبط وتعديل كفاءة البئر قبل البدء في اجراء عملية الضخ والتشغيل. تخبرنا هذه الطريقة عن بعض المؤشرات التي تقود إلى معرفة الحالة الراهنة للبئر، فكلما كان الفرق بين قيمتي فاقد الخزان الجوفي والانخفاض الكلي في المنسوب قليلة كانت البئر ذات كفاءة عالية والعكس. وعند تطبيق هذه الطريقة يستطيع جيولوجي الحقل من تفادي القصور الذي صاحب تصميم البئر، ومن التحكم في تحديد كمية التصريف المثلى التي تتوافق مع كمية التغذية والتي عندها تنعدم وتتلاشى فواقد البئر ليصبح سريان المياه نحو البئر خطياً، وعندئذ تكون كفاءة البئر عالية جداً 100%.

تهتم هذه الطريقة بتحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر، والتي بواسطتها تصل البئر إلى كفاءتها القصوى، وهنا لابد من تحديد قيمة نقطة التقاطع A. وتشير هذه النقطة إلى أن البئر في هذه المرحلة قد وصلت إلى كفاءتها المثلى وأن أي زيادة في كمية التصريف تقود إلى تشكل مكونات فقد البئر التي يتبعها نقص في كفاءة البئر. ومن أهم الخطوات التي يجب اتباعها عند تطبيق هذه الطريقة هي نفس الخطوات التي تم ذكرها في الطريقة الثانية.

مميزات الطريقة:-

- أهم ما يميز هذه الطريقة عن بقية الطرق المذكورة سابقاً ما يلي:-
- التحكم في تحديد كمية الضخ المثلى التي يجب أن تضخ بها البئر قبل الشروع في عملية الضخ النهائي وذلك من خلال تعديل كفاءة البئر للوصول إلى الكفاءة المثلى.
- التحكم في تحديد الانخفاض الأمثل في منسوب الماء الذي يجب أن لا تتعداه البئر عند تشغيلها.
- معرفة الحالة الراهنة للبئر (تصميم البئر) قبل بدء الضخ.
- التحكم في ضبط فواقد البئر وفقد الخزان الجوفي ومنها يمكن تحديد كمية الضخ المطلوبة حسب الحاجة.
- تفادي الأخطاء التصميمية التي صاحبت انشاء البئر وذلك من خلال التحكم في كمية الضخ.
- تطابق منسوب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر مما يعني انعدام فواقد البئر، وهي دالة توضح أن سريان المياه نحو البئر أصبح خطياً.
- استغلال كل الإمكانيات الكامنة بالخزان الجوفي.
- وصول الخزان الجوفي إلى حالة الثبات والاستقرار (حالة عدم الاجهاد) وفيه تتساوى كمية الضخ مع كمية التغذية، لأن الضخ بمعدل أكبر من طاقة الخزان يعمل على خلخلة وتحريك مواد الخزان الجوفي خاصة الناعمة منها في اتجاه البئر ليتلف ويغلق فتحات المصافي لتقل كفاءة البئر.
- الحد من إجهاد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية مما يدعم امكانية حدوث السريان الأفقي نحو البئر.
- زيادة العمر الافتراضي للبئر بعدم تلف المصافي لتتم المحافظة على مصافي البئر.
- تقليل تكلفة تشغيل المضخة وإطالة عمر المضخة.

وعند تطبيق هذه الطريقة يستطيع جيولوجي الحقل من التحكم في عدد من النقاط والبنود الهامة التي تقود البئر للوصول بها إلى كفاءتها العظمى، ومن أهم هذه البنود ما يلي:-

- 1- التحكم في تحديد قيم فاقد الخزان الجوفي.
 - 2- التحكم في تحديد قيم فواقد البئر.
 - 3- التحكم في تحديد قيم الانخفاض الكلي في المنسوب.
 - 4- التحكم في ضبط تصريف البئر للوصول بها إلى الكفاءة المثلى.
- ملاحظة:-

عند تطبيق هذه الطريقة يستطيع الباحث أن يستنتج عدد من المعلومات من آبار المياه شكل (9.17)، وهي تشمل الآتي:-

- تصل كفاءة البئر 100% عند النقطة A وهي نقطة تقاطع مسار خط تدفق الخزان الجوفي مع الانخفاض الكلي في المنسوب. وفي هذه المنطقة تنعدم قيم فواقد البئر وتصبح صفراً.

- تكون كفاءة البئر أكبر من 50% في المنطقة الواقعة ما بين النقطتين $A - B$.
- تبلغ كفاءة البئر 50% عند النقطة B ، وهي نقطة تقاطع مسار خط تدفق الخزان الجوفي مع فواقد البئر. ومن هذه النقطة يبتعد خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب مسافة حتى يصل النقطة C ، وتعادل هذه النقطة ضعف قيمة التدفق بالخزان الجوفي أو ضعف قيمة التدفق بالبئر عند النقطة B .

- تكون كفاءة البئر أقل من 50% في المنطقة التي تقع على يمين النقطة B .
بعد أن تعرفنا على مميزات طريقة التحكم في ضبط كفاءة البئر إلا أن هنالك بعض الاختلافات في النتائج عند تطبيق هذه الطريقة، هذه الاختلافات توضحها الطرق التالية:-

أولاً: طريقة الخط المستقيم:- The straight line method

وفيها يتم إمرار خطوط مستقيمة تصل بين نقاط نتائج الضخ المرسومة، ومن تقاطع تلك الخطوط مع بعضها نتحصل على معلومات الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي والبيئر.

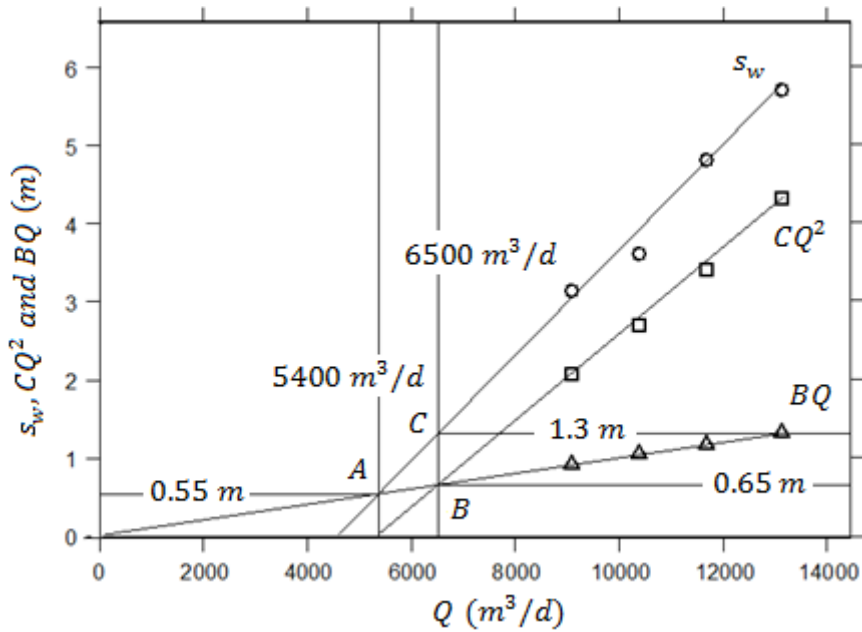
ثانياً: طريقة المنحنى:- The curve method

تتميز عن الطريقة السابقة برسم منحنيات تعكس أثر أخذ المياه الذي يصاحبه انخفاض في المنسوب في شكل منحنى يمثل نصف قطر التأثير والذي يقل هو الآخر بمرور الوقت، وهنا يطبق القانون بعد فترة زمنية أثناء الضخ نسبة لأن منحنى التصريف مع الانخفاض يكون أفقياً.

تصف هذه الطريقة حالة الثبات التي تمر بها البيئر أثناء عملية الضخ وذلك عند تقاطع خط مسار فاقد الخزان الجوفي مع خط مسار الهبوط في المنسوب عند النقطة A شكل (9.18).

أولاً: طريقة الخط المستقيم

من الشكل العام يلاحظ أن قيم فواقد البيئر تقع بالقرب من خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب وفي المقابل يبتعد خط مسار فاقد طبقة المياه الجوفية عن خط مسار الانخفاض الكلي في المنسوب وهو دليل يرشد الجيولوجي على أن هذه البيئر ذات كفاءة قليلة، والدليل الأكثر تفصيلاً هو تقاطع خط مسار فاقد الخزان الجوفي مع خط مسار فواقد البيئر عند النقطة B ، فظاهرة التقاطع هذه تؤكد وتفسر لنا أن البيئر أيضاً ذات كفاءة أقل من 50%، ويلاحظ أن هذه الظاهرة موجودة فقط في هذا المثال.



شكل (9.17):- يوضح تفسير الاختبار الهيدروليكي لبئر جوفي متعدد المراحل والذي فيه تتباين قيم كفاءة البئر حسب كمية الضخ المختارة. من تحليل الشكل أعلاه يتضح أن هذه البئر تم ضخها بكميات تصريف غير مناسبة، وبدليل أن متوسط كفاءتها 26.4% وهو أقل من 70%، لذا ظل التدفق المضطرب هو السائد. ولكن ومع ذلك فإنه يمكن أن يحدث الانتقال وفي لحظة ما من التدفق المضطرب إلى التدفق الصفائحي. ميكانيكية هذا الانتقال تحكمه عدة ضوابط معينة تتمثل في تقاطع خطوط مسار تدفق المياه الجوفية مع بعضها خلال مراحل الضخ المختلفة.

المراحل التي تمر بها البئر أثناء عملية الضخ المتدرج:-

تمر هذه البئر خلال مراحل الضخ المتدرج بعدة كفاءات، ويعزى الاختلاف في نسب هذه الكفاءات إلى الاختلاف في كمية الضخ. وعند تفسير بيانات الضخ المتدرج في هذا المثال يجب تتبع المراحل التي تمر بها البئر خلال عملية الضخ وهي كما يلي:-

1- يتقاطع عند النقطة A خط بيانات تدفق الخزان الجوفي مع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب وفيها يبلغ الهبوط في منسوب الماء 0.55 متر، وفي هذه المنطقة تمثل قيم فواقد الخزان الجوفي قيم الانخفاض الكلي في المنسوب وذلك عند الضخ بمعدل 5400 م³/يوم، وفي هذه المرحلة من الضخ تنعدم فواقد البئر وهو مؤشر جيد يدل على أن البئر وصلت إلى كفاءتها العظمى، وفي هذه المرحلة من الضخ يمكن تقييم الحالة الراهنة للبئر بتقدير كفاءتها من المعادلة (2.2).

خسائر البئر

$$\text{Linear well loss } CQ^2 = 0.0 \text{ m}$$

خسائر الخزان الجوفي

$$\text{Aquifer loss } BQ = 0.55 \text{ m}$$

الانخفاض الكلي في المنسوب

$$\text{Total drawdown } s_w = BQ + CQ^2 = 0.55 + 0 = 0.55 \text{ m}$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{0.55}{0.55 + 0.0} \times 100 = 100\%$$

للتأكيد من أن البئر تعمل بطاقتها العظمى يجب قياس الزاوية الحاصرة بين خط مسار فاقد الخزان الجوفي ومسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A وهي تساوي 37°، وعند هذه النقطة تنعدم فواقد البئر، وفيها تكون كفاءة 100% كما جاء في المعادلة (5.1).

$$E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha BQ + \alpha CQ^2} \times 100 = \frac{37^\circ}{37^\circ + 0.0} \times 100 = 100\%$$

تساعد هذه الطريقة في التحكم من تأثير الضخ الجائر إلى حد كبير وذلك عند الرجوع إلى نقطة تقاطع خسارة التكوينة مع الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A. وفي هذه النقطة يوصى بضخ البئر بمعدل 5400 متر مكعب لكل يوم والذي يعمل على عدم إجهاد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية وذلك بعدم تحريك المواد الناعمة بالخران الجوفي تجاه مصفاة البئر، وفي هذه الحالة تتلاشى خسائر البئر وعندها تصبح كفاءة البئر عالية جداً.

2- تختلف قيم الهبوط في منسوب الماء بالخران الجوفي وداخل البئر في المنطقة التي تقع على يمين النقطة A وعلى يسار النقطة B، فمثلاً عند ضخ البئر بمعدل 6000 م³/يوم عندها تزيد قيمة الهبوط بالخران الجوفي وتساوي 0.6 متر وداخل البئر 0.4 متر، وفي هذه الحالة يصل الانخفاض الكلي في المنسوب إلى حوالي واحد متر عند نقطة ما تقع بين A – C شكل (9.17)، ولتقدير كفاءة البئر تستخدم المعادلة التالية:-

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{0.6}{1.0} \times 100 = 60\%$$

3- عند متابعة سير عملية الضخ يتقاطع عند النقطة B خط مسار بيانات الخزان الجوفي مع خط بيانات البئر وذلك عند ضخ البئر بمعدل 6500 متر مكعب لكل يوم وهو أعلى من سابقة وبقيمة هبوط في مستوى الماء تصل إلى 0.65 متر بالخران الجوفي، وفي هذه المرحلة من الضخ (تتساوى قيمة فاقد الخزان الجوفي مع قيمة فقد البئر وهي حوالي 0.65 متر، وبمعنى آخر فإن الهبوط الكلي في المنسوب داخل البئر عند النقطة C يساوي 1.3 متر وهو ما يعادل ضعف قيمة الهبوط بالخران الجوفي الذي يبلغ 0.65 متر، ولحساب كفاءة البئر تستخدم المعادلة التالية:-

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{0.65}{1.3} \times 100 = 50\%$$

ومن جانب آخر تقدر كفاءة البئر من قيمة الزاوية التي يصنعها خط التقاطع ما بين خط مسار فاقد الخزان الجوفي مع خط مسار فقد البئر عند النقطة B (التقابل بالرأس) وهي حوالي 30° ، وعليه فإن كفاءة البئر هي:-

$$E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha BQ + \alpha CQ^2} \times 100 = \frac{30^\circ}{30^\circ + 30^\circ} \times 100 = 50\%$$

4- على يمين النقطة B تقل كفاءة البئر عن 50%، فمثلاً عن ضخ البئر بمعدل 1000 م³/يوم يبلغ فاقد الخزان الجوفي حوالي 1 متر ويزيد فقد البئر ليصل إلى 2.6 متر والهبوط الكلي في المنسوب 3.6 متر شكل (9.17)، أما كفاءة البئر فهي على النحو التالي:-

$$E_w = \frac{1.0}{3.6} \times 100 = 27.8\%$$

5- تقل كفاءة البئر عن النسبة 100% على طول المنطقة التي تقع على يسار النقطة A ، وهو مؤشر يوضح أن البئر تم ضخها بمعدل أقل من معدل الضخ الأمثل، مما يعني عدم وصول البئر إلى مرحلة الثبات.

عند تحليل بيانات الضخ يبلغ متوسط كفاءة هذه البئر 26.4%، هذه الحالة تستوجب الإدارة الرشيدة لرفع كفاءة هذه البئر، وعند تتبع المراحل التي مرت بها البئر خلال عملية الضخ يلاحظ حدوث تقاطع ما بين خط مسار فاقد طبقة المياه الجوفية مع خط مسار فواقد البئر عند النقطة B والتي فيها بلغت كفاءة البئر 50% وذلك عند ضخها بمعدل 6500 م³/يوم، ولكن للأسف لم يتوصل أو يكتشف الجيولوجي هذه النسبة أثناء عملية الضخ، مما يعد أحد سلبيات طريقة تفسير نتائج الضخ المتدرج المتعارف عليها عالمياً. ويعزى سبب تفارق خط مسار فاقد طبقة المياه الجوفية عن خط مسار فواقد البئر بعد النقطة B ناحية اليمين إلى أن البئر استمرت في الضخ بكميات أكبر

من الطاقة الهيدروليكية للخران الجوفي ومن تصميم البئر مما أدى إلى تقليل كفاءة البئر التشغيلية عن 50%.

الخلاصة:-

عند ضخ آبار المياه بكميات ضخ مختلفة تحدث عدة مكونات لمناسيب المياه بالخران الجوفي والبئر أثناء عملية الضخ، وعند تحليل بيانات البئر بالشكل أعلاه نستنتج عدة معلومات وذلك عند تتبع مسار خطوط تدفق المياه وهي كما يلي:-

- تصبح السيادة كاملة للتدفق الخطي عند النقطة A ، وفيها تنعدم قيم فواقد البئر وذلك عند ضخ البئر بمعدل $Q = 5400 \text{ m}^3/d$ وفي هذه الحالة يبلغ الهبوط في منسوب الماء 0.55 متر. وتتساوى أو تتطابق في هذه النقطة مناسيب الماء بالخران الجوفي وداخل البئر وهو دليل على تعافي الحالة الراهنة للبئر ووصولها إلى حالة الثبات والاستقرار مع كفاءة عالية أو طاقة تشغيلية عظيمة.

- مع استمرار عملية الضخ يستمر مستوى الماء في الهبوط، وعلى يمين النقطة A يبدأ أثر التدفق غير الخطي بالبئر في الظهور والتكوين وذلك في حالة الضخ بمعدل أكبر من $5400 \text{ م}^3/\text{يوم}$ ، ولكن مع ذلك تصبح السيادة للتدفق الخطي، مثال الضخ بمعدل 6000 متر مربع لكل يوم.

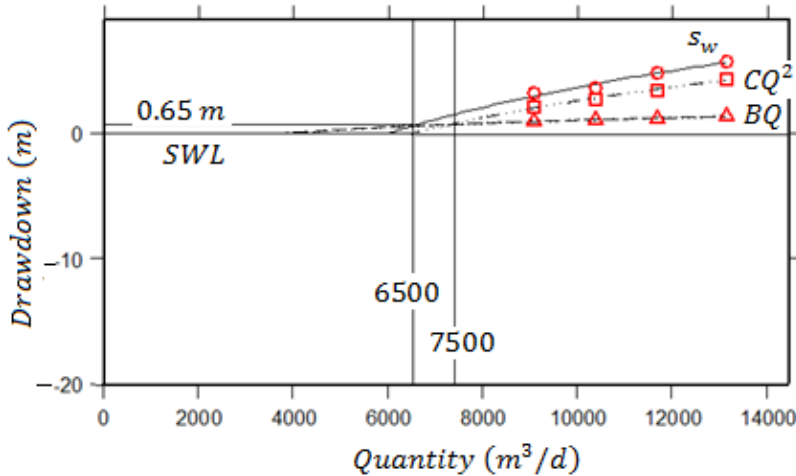
- يواصل منسوب الماء في الهبوط بالخران الجوفي والبئر حتى يصل إلى 0.65 متر عند النقطة B ، وذلك عند الضخ بمعدل $6500 \text{ م}^3/\text{يوم}$. وفي هذه الحالة يتقاطع خط مسار التدفق الخطي بالخران الجوفي مع خط مسار التدفق غير الخطي لفواقد البئر عند النقطة B ، والتي فيها يتساوى قيمة فاقد الخزان الجوفي مع فاقد البئر، وفي هذه المرحلة من الضخ تكون كفاءة البئر 50%، وفيها تمثل النقطة C مجموع فواقد كل من الخزان الجوفي والبئر وهي حوالي 1.3 متر.

- أخيراً تبدأ السيادة لفواقد البئر مع استمرار وزيادة كمية تصريف البئر $Q >$ $6500 \text{ m}^3/\text{d}$ ، وفي هذه المرحلة يفوق التدفق غير الخطي التدفق الخطي وفيه لا تصل البئر إلى مرحلة الثبات، وبالتحديد بعد تخطي النقطة B ناحية اليمين، وتعتبر هذه المنطقة حرجة Critical area من ناحية هيدروجيولوجية.

من خلال هذا الشرح المبسط يستطيع الجيولوجي التحكم في ضبط كفاءة البئر وذلك من خلال اختيار كمية الضخ المثلى التي عندها تصل البئر إلى مرحلة الاستقرار لتتعدى الفواقد المضطربة وتسود الفواقد الخطية كما حدث عند النقطة A وذلك عند تقاطع فواقد الخزان الجوفي مع الانخفاض الكلي في المنسوب.

ثانياً: طريقة المنحنى

يختلف تفسير نتائج بيانات الضخ باختلاف الطرق التفسيرية، ويلاحظ وجود اختلاف بسيط عند تطبيق طريقة المنحنى مقارنة مع النتائج المتحصل عليها من طريقة الخط المستقيم كما هو الحال في الطرق التي تدرس اختبار الضخ المستمر.



شكل (9.18):- توقيع قيم بيانات الضخ في شكل منحنى على ورقة رسم بياني.

تتساوى قيم فاقد الخزان الجوفي مع فقد البئر عند ضخ البئر بمعدل 7500 م³/يوم، وفي هذه المرحلة من الضخ تعادل قيمة الهبوط الكلي في المنسوب 1.4 متر وهي ضعف قيمة فاقد الخزان الجوفي وضعف فقد البئر وعندها تكون كفاءة البئر 50%. وفي مرحلة أخرى من الضخ بمعدل 6500 م³/يوم تنعدم فواقد البئر، وفي هذه الحالة تتساوى قيمة فاقد الخزان الجوفي مع الهبوط الكلي في المنسوب بقيمة 0.65 متر، وتقيد هذه المرحلة من الضخ بمقدار التصريف المذكور بأن البئر قد وصلت إلى مرحلة كفاءتها العظمي.

9.8 اختبار المجال الهيدروليكي المتعدد:- Multiple hydraulic field test

تسمح طريقة اختبار الضخ متعدد المراحل بتحديد الحد الأقصى لمعدل الضخ الذي يحد من اجهاد الطبقة الحاملة للمياه الجوفية وتلف مكونات البئر، وفيه تصل البئر إلى مرحلة الثبات ولا تحدث الشخوخة المتسارعة للبئر، وعليه يجب اعادة النظر في تصميم البئر لتجنب المزيد من الهبوط في مستوى الماء داخل البئر والذي يعبر عنه بخسائر البئر أو إجمالي الانخفاض في عمود الماء بالبئر Δh_w .

تم تنفيذ إجراء اختبار البئر أعلاه من خلال الضخ على أربعة مراحل مختلفة التصريف، وفيها تم إجراء القياسات من الصفر إلى معدل التدفق الأقصى $Q_{max} = 13132.8 \text{ m}^3/d$. ويظهر الشكل (9.17) تسلسل الضخ والتفسير الرسومي لنتائج اختبار الضخ المتدرج، وكذلك يوضح التحليل الإحصائي لنتائج القياسات أنه في ظل قيم $Q = 5400 \text{ m}^3/d$ و $BQ = 0.55 \text{ m}$ ، s_w ، توجد علاقة خطية بين Q ، BQ و s_w . وهذا يشير إلى حدوث تدفق رقائقي عبر وسط الخزان الجوفي. ولكن بمجرد تجاوز هذه القيم بزيادة كمية الضخ تغيرت طبيعة الرسم البياني من الخطي إلى الأسّي مما يعني الطابع المضطرب لتدفق المياه في منطقة البئر. بالنسبة للتدفق الرقائقي ($Q < 5400 \text{ m}^3/d$)، ومن العلاقة الخطية يقدر معامل المقاومة D

هذه القيمة تعادل قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي B جدول (9.2). $1.0 \times 10^{-4} d/m^2$

$$D = \frac{s_w}{Q} = \frac{0.55}{5400} = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$$

فيما يختص بالتدفق المضطرب ($Q > 5400 m^3/d$) تشير النتائج المتحصل عليها إلى أن معاملات المصفافة تعطي قيم معامل خسارة التكوينة ومعامل فقد البئر على النحو التالي: $B = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$ و $C = 2.5 \times 10^{-8} d^2/m^5$. علاوة على ذلك، فإن إجمالي الانخفاض المقدّر (خسارة التكوين + خسارة البئر) بالطريقة الرسومية عالي للغاية، وبالتالي فإن نسبة فقدان التكوين (كفاءة البئر) 26.4%، وفي المقابل نسبة فقد البئر 73.6%، وعليه تشير هذه النتائج إلى أن البئر تظهر خسائر عالية نسبياً.

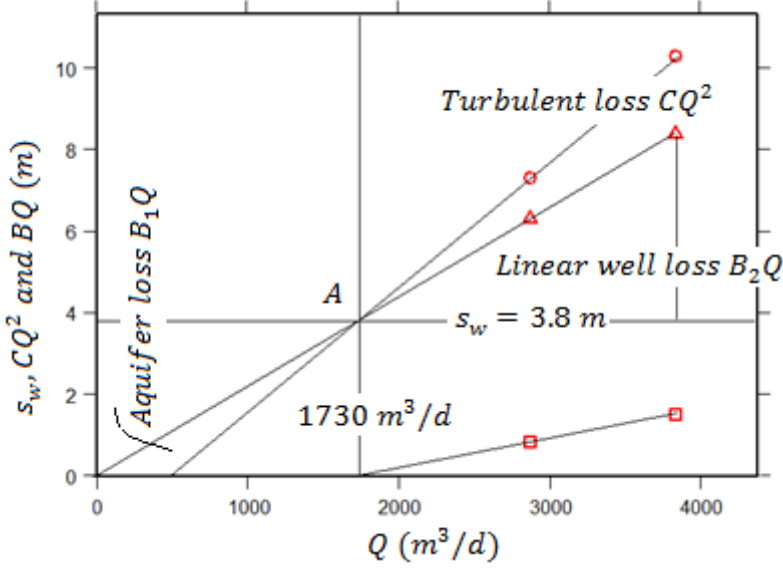
ومن تحليل بيانات نتائج الضخ بالطرق الجديدة شكل (9.17) أظهر الاختبار أن البئر تصل إلى معيارها الهيدروليكي الأمثل إذا كان العائد $5400 m^3/d$ ، وهو يمثل سرعة التدفق المثلى التي تصاحبها علاقة خطية بين الأداء والهبوط في البئر، بينما يؤدي ضخ المياه بكمية أكبر من هذا العائد إلى تسريع تقادم البئر وإلى زيادة سرعة التدفق التي تقود هي الأخرى إلى حدوث اضطراب في منطقة البئر مما يزيد من المقاومة الهيدروليكية، ومجمل هذه الظروف قد يتسبب في زيادة تكاليف ضخ المياه، وكذلك تسريع تقادم مرشح البئر.

مثال (9.6):-

من معلومات البئر المسجلة بالجدول (9.1)، المطلوب تقدير الكفاءة المثلى للبئر والسعة النوعية باستخدام طريقة الخط المستقيم وطريقة المنحنى.
الحل:-

أولاً: طريقة الخط المستقيم

1/ معلومات البئر خلال مرحلة الضخ الأولى والثانية



شكل (9.19):- مسار اختبار الضخ خلال مرحلتي الضخ الأولى والثانية.

يخبرنا الشكل أعلاه أن خط مسار التدفقات الخطية لطبقة المياه الجوفية يتقاطع مع خط مسار الهبوط الكلي في المنسوب عند النقطة A، مما يشير إلى أن البئر وصلت إلى كفاءتها المثلى عند هذه المرحلة من الضخ. ويوضح تفسير الاختبار الهيدروليكي لهذه البئر أن كمية التصريف عند هذه النقطة يساوي 1730 متر مكعب لكل يوم والذي يقابله هبوط في المنسوب يقدر بـ 3.8 متر، وفي هذه النقطة تنعدم خسائر البئر ومنها يمكن تقدير كفاءة البئر رياضياً على النحو التالي:-

أولاً: الهبوط في المنسوب

قيمة الانخفاض في المنسوب بالخران الجوفي وحول محيط البئر عند النقطة A تساوي 3.8 متر وهو يعادل خسارة طبقة المياه الجوفية والبئر معاً Δh_w وعليه فإن كفاءة البئر هي:-

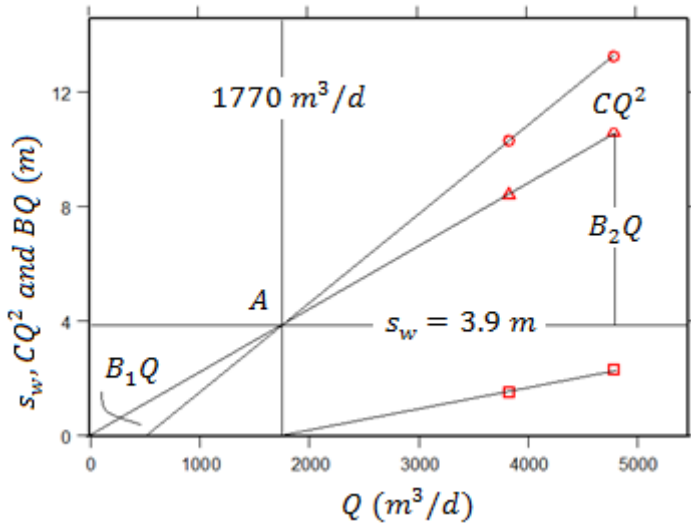
$$E_w = \frac{BQ}{\Delta h_w} \times 100 = \frac{3.8}{3.8} \times 100 = 100\%$$

ثانياً: طريقة الزاوية

زاوية تقاطع مسار خسارة التكوين مع خط الهبوط الكلي في المنسوب عند النقطة A تساوي 11° ومنها يتم تقدير كفاءة البئر من المعادلة الآتية:-

$$E_w = \frac{\alpha BQ}{\alpha s_w} \times 100 = \frac{11^\circ}{11^\circ} \times 100 = 100\%$$

2/ معلومات الضخ خلال المرحلة الثانية والثالثة



شكل (9.20):- يوضح تفسير الاختبار الهيدروليكي خلال مرحلتي الضخ الثانية والثالثة.

خلال هذه المرحلة من الضخ سجلت كمية التصريف عند النقطة A بقيمة 1770 متر مكعب لكل يوم، والهبوط بالخران الجوفي وحول محيط البئر 3.9 متر وهو ما يعادل خسارة طبقة المياه الجوفية والبئر معاً وفيه تنعدم خسائر البئر بسبب وصول البئر إلى مرحلة الثبات وعليه فإن كفاءة البئر هي:-

أولاً: الهبوط في المنسوب

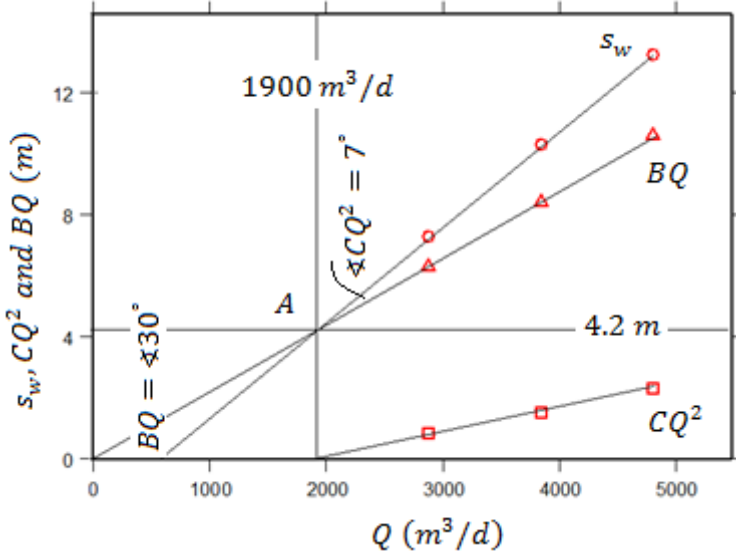
$$E_w = \frac{3.9}{3.9} \times 100 = 100\%$$

ثانياً: طريقة الزاوية

زاوية تقاطع مسار خسارة التكوين مع خط الهبوط الكلي في المنسوب عند النقطة A تساوي 10° ، وعند هذه النقطة تصل البئر إلى كفاءتها المثلى على النحو التالي:-

$$E_w = \frac{10^\circ}{10^\circ} \times 100 = 100\%$$

3/ متوسط بيانات الضخ خلال مراحل الضخ المختلفة



شكل (9.21):- متوسط قيم الاختبار الهيدروليكي للبئر عند ضخها بـ 1900 م³/يوم. تم إجراء القياسات من $Q = 0.0 \text{ m}^3/\text{d}$ إلى $Q = 1900 \text{ m}^3/\text{d}$ ومن هذه القيم تم البحث باستخدام الاستقراء البياني للبيانات المقاسة بالشكل أعلاه، ووصفت هذه البيانات معاملات ظروف التدفق الثابت والمستقر كما يلي:-

1- يتقاطع خط بيانات الخزان الجوفي مع خط بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب

عند النقطة A والتي فيها يبلغ الهبوط في مستوى الماء 4.2 متر وذلك عند الضخ بمعدل 1900 م³/يوم، وفي هذه الحالة تنعدم فواقد البئر لتصبح صفراً، وهو مؤشر يدل على أن البئر وصلت إلى درجة عالية من الكفاءة، وتحسب رياضياً من المعادلة أدناه.

$$E_w = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \times 100 = \frac{4.2}{4.2 + 0.0} \times 100 = 100\%$$

للتأكيد من أن البئر تعمل بطاقتها العظمى يجب قياس الزاوية الحاصرة ما بين خط مسار فاقد الخزان الجوفي ومسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A والتي تساوي 7°، وفي هذه الحالة تكون كفاءة 100% كما يلي:-

$$E_w = \frac{7^\circ}{7^\circ + 0.0^\circ} \times 100 = 100\%$$

2- من خلال تفسير نتائج اختبار الضخ بالطريقة المتعارف عليها عالمياً يبلغ متوسط كفاءة هذه البئر حوالي 85.1% جدول (9.1) وهو أكبر من 50%، ولهذا السبب لم يحدث تقاطع ما بين خط مسار فاقد طبقة المياه الجوفية مع خط مسار فواقد البئر، وهو دليل على أن الكفاءة التشغيلية لهذه البئر عالية وتزيد عن 50%. وهو خلاف ما حدث في المثال السابق شكل (9.17).

3- مع تقدم عملية الضخ يلاحظ أن قيم خسارة التكوينة تزداد بعداً عن قيم الانخفاض الكلي في المنسوب، وهو دليل على تناقص كفاءة البئر ناحية يمين النقطة A شكل (9.21).

ضبط القدرة النوعية:-

يجب ضبط القدرة النوعية Q/s_w للوصول إلى الكفاءة المثلى، ولتحديد القدرة النوعية المناسبة عند كفاءة البئر 100% لابد أن يظل معدل الضخ ثابتاً، وما يجري

تعديله بالفعل هو الانخفاض في المنسوب المقاس كما جاء في المعادلة (2.7)، وفي هذا المثال تقدر قيمة السعة النوعية على النحو التالي:-

$$Q/s_{w100\%E_w} = \left[\frac{Q}{s_w \times E_w} \right] \times 100 = \frac{1900}{4.2 \times 0.85} = 532.2 \text{ m}^2/d$$

الاستنتاجات:-

عند التمييز ما بين مكون خسائر الخزان الجوفي وخسائر البئر نتبع الآتي:-

- تبدأ خسائر البئر غير الخطية CQ^2 عند الضخ بمعدل أكبر من $1900 \text{ m}^3/d$ مما يعني أن تصميم البئر تشوبه بعض الأخطاء الفنية.

- لا يوجد أثر لخسائر البئر غير الخطية عند الضخ بمعدل $1900 \text{ m}^3/d$ وفي هذه المرحلة يتطابق منسوب الماء داخل بالتكوينة الجيولوجية مع منسوب الماء داخل البئر، وتفسر هذه الحالة بأن البئر وصلت إلى حالة الثبات من حيث كمية التغذية والضخ.

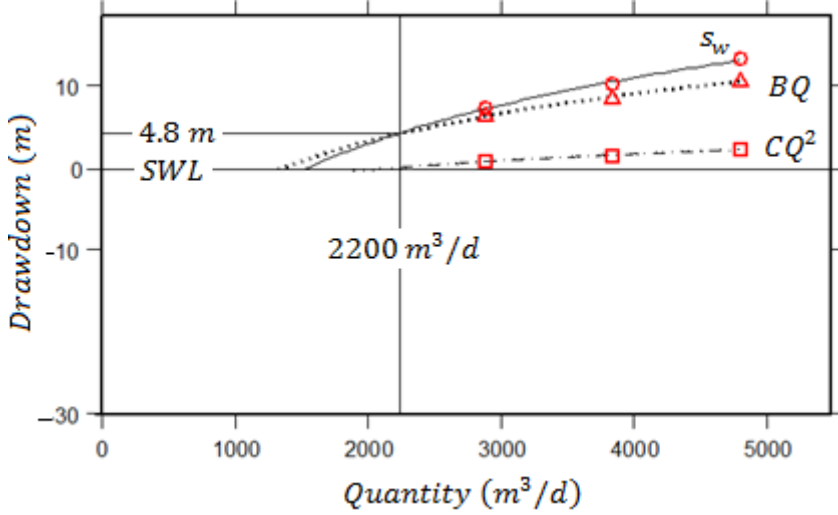
- أيضاً لا يوجد أثر لخسائر البئر غير الخطية عند الضخ بمعدل أقل من $1900 \text{ m}^3/d$ وفي هذه الحالة يتطابق منسوب الماء داخل بالتكوينة الجيولوجية مع منسوب الماء داخل البئر، ولكن البئر لم تصل إلى حالة الثبات حيث أن كمية التغذية تفوق كمية الضخ.

عند تفسير ومناقشة الحالة الهيدروليكية لهذه البئر تكون السيادة للتدفق الرقائقي عند النقطة A والتي فيها تكون كمية التصريف $1900 \text{ m}^3/\text{يوم}$ والهبوط في مستوى الماء 4.2 أمتار، وفي المقابل لا يوجد أثر للتدفق المضطرب حيث تنعدم خسارة البئر عندما تقطع المحور الأفقي للتصريف عند نقطة مقابلة للنقطة A، ولكن مع استمرار زيادة كمية الضخ تبدأ فواقد البئر في الظهور والتكوين داخل البئر حتى تصل إلى 2.3 متر،

إلا أنه ومع ذلك تصبح السيادة للتدفق الرقائقي حتى نهاية عملية الضخ مما يؤكد إلى البئر ذات كفاءة عالية.

ثانياً: طريقة المنحنى:-

الحل:-



شكل (9.22):- توقيع قيم جميع بيانات الضخ في شكل منحنى.

لا يوجد أثر لخواص البئر عند الضخ بمعدل 2200 م³/يوم، وفيه تسود خسائر الخزان الجوفي وتتقاطع مع منحنى الهبوط الكلي في المنسوب عند القيمة 4.8 متر، وفي هذه المرحلة من الضخ يكون السريان أفقياً ورقائقياً، وفيه تكون البئر قد وصلت إلى كفاءتها العظمى. ويلاحظ في هذا المثال أن كمية الضخ المثلى تعادل بالتقريب نصف كمية الضخ عند المرحلة الأخيرة من الضخ.

9.9 تحديد كمية الضخ المثلى:- Determining the optimum pumping amount

يقتضي التحكم في ضبط كفاءة البئر ضبط كمية الضخ المثلى، وفي هذه الحالة يتم تحديد معدل الضخ مقابل علاقة الهبوط التي تلبي الطاقة الهيدروليكية للخزان الجوفي

واحتياجات تشغيل المضخة وذلك دون حدوث اضطرابات عند سريان المياه نحو مصفاة البئر والمعالجة على أفضل وجه. ومن الموجهات التي يجب اتباعها لتحديد كمية التصريف المثلى للوصول بالبئر إلى كفاءتها المثلى ما يلي:-

- أرسم بيانياً قيم تصريف البئر أفقياً مقابل قيم الهبوط في المنسوب أو مع قيم فاقد الخزان الجوفي رأسياً على مقياس رسم بياني أو لوغاريتمي شكل (9.23 و 9.24).

- أرسم خط مستقيم مار بالنقاط المرسومة.

- مد الخط الواصل بالنقاط حتى يقطع محور التصريف عند قيمة معينة، ومن هذا الخط تستخرج المعلومات التالية:-

- من قيمة التصريف المثلى التي يتم تحديدها من المحور الأفقي نمد خط رأسي يوازي محور الهبوط في المنسوب ويقطع الخط المستقيم لبيانات الهبوط في البئر عند النقطة (A)، ومنها نقرأ قيمة الهبوط المثلى في المنسوب التي تعادل وتكافئ قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى، وعند هذه النقطة لا يوجد أثر لتشكل فقد بالبئر بحيث لا تتأثر البئر بأي مكون انخفاض إضافي وهي دلالة على تساوي مناسيب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر.

- من نقطة تقاطع خط معلومات البئر مع كلٍ من معدل التصريف الأمثل والهبوط الأمثل عند النقطة (A) يستطيع الباحث أن يميز خسائر البئر غير الخطية CQ^2 التي تقع على يمين النقطة (A).

- أوجد كفاءة البئر من أي نقطة تصريف مختارة على المحور الأفقي وقارنها مع قيمة التصريف الأمثل.

- في حالة ضخ البئر بمعدل تشغيلي أكبر Q_{max} أو أقل Q_{min} أو مساوي لكمية الضخ المثلى عندها يحتاج الباحث إلى تحديد قيمة عامل التصريف F من قسمة

تصريف البئر المختارة على التصريف الأمثل من المعادلة الرياضية على النحو التالي:-

$$F = \frac{Q_{max.}}{Q_{opt.}} = \frac{Q_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{Q_{min.}}{Q_{opt.}} \dots \dots \dots (9.2)$$

- أحسب مقدار التغير في قيمة فاقد الخزان الجوفي خلال مراحل الضخ المختلفة، ففي حالة ضخ البئر بمقدار يفوق معدل الضخ الأمثل أو قد يكون مساوي له أو أقل منه عندها يتم تقدير قيمة فاقد الخزان الجوفي بضرب قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى التي عندها تتساوي مناسيب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر في عامل تصريف البئر F حسب كمية الضخ، أو من القانون العام لفاقد الخزان الجوفي BQ على النحو التالي:-

$$BQ = BQ_{opt.} \times F \dots \dots \dots (9.3)$$

- أحسب مقدار فقد البئر من طرح قيمة الانخفاض الكلي في المنسوب من فاقد الخزان الجوفي كما يلي:-

$$CQ^2 = s_w - BQ \dots \dots \dots (9.4)$$

ملاحظة:-

أحياناً قد يتم ضخ البئر بمعدل تشغيلي أقل من معدل الضخ الأمثل، ففي هذه الحالة تتطابق مناسيب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر كما هو الحال عند الضخ بمعدل تشغيلي أمثل، إلا أنه في هذه المرحلة من الضخ يحدث نقص وعجز في كل من فواقد الخزان الجوفي وفقد البئر لتقل تبعاً لذلك كفاءة البئر عن 100%، ويعزى هذا السبب إلى أن البئر ما زالت في مرحلة عدم الثبات. رياضياً تقدر الكفاءة والسعة النوعية للبئر على النحو التالي:-

- أقل انخفاض كلي في المنسوب

$$S_{wmin.} = \frac{Q_{min.} \times S_{wopt.}}{Q_{opt.}} \dots \dots \dots (9.5)$$

مقدار العجز في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ_{min} = BQ_{opt.} \times F \dots \dots \dots (9.6)$$

مقدار العجز في فقد البئر والذي يماثل العجز في الفقد بالخزان الجوفي

$$CQ^2_{min} = S_{wopt.} - BQ_{min} \dots \dots \dots (9.7)$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ_{min}}{S_{wopt.}} \times 100 \dots \dots \dots (9.8)$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q_{min}}{S_{wmin.}} \dots \dots \dots (9.9)$$

مثال (9.7):-

من معلومات الجدول (9.1)، المطلوب تعيين كفاءة البئر خلال عدد من مراحل الضخ المختلفة.

الحل:-

أولاً: كمية الضخ المثلى

يحدد الشكل (8.1) كمية التصريف المثلى $Q_{opt.}$ على المحور الأفقي بقيمة 1900 م³/يوم، وهي الكمية المناسبة التي يجب أن تضخ بها البئر حتى نتفادى تشكل فواقد البئر ونضمن أن البئر تعمل بكفاءتها المثلى، وفي هذه الحالة تكون الفرصة مؤاتيه لتطابق مستوى الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر.

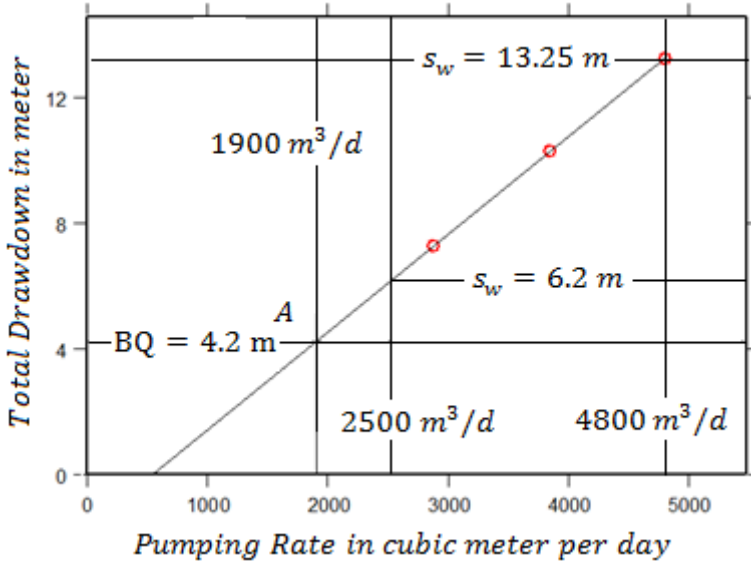
ثانياً: فاقد الخزان الجوفي الأمثل

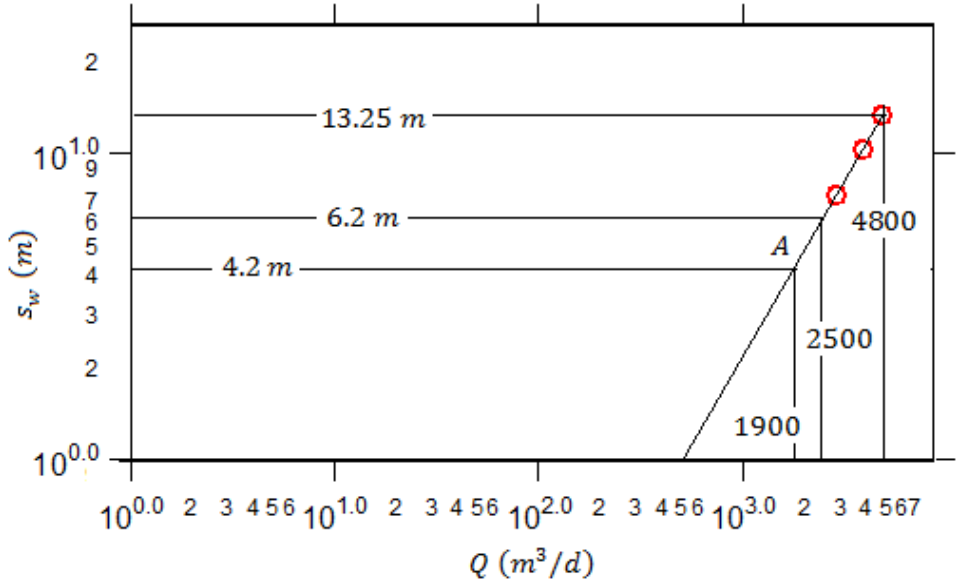
يحدد الشكل (8.9) القيمة المثالية للهبوط الكلي في المنسوب $s_{wopt.}$ بقيمة تكافئ قيمة فاقد الخزان الجوفي الأمثل $BQ_{opt.}$ والتي تقدر بحوالي 4.2 متر، وفي هذه المرحلة من الضخ يتطابق مستوى الماء بالخزان الجوفي مع مستوى الماء داخل البئر. كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ_{opt.}}{s_{wopt.}} \times 100 = \frac{4.2}{4.2} \times 100 = 100\%$$

ثالثاً: ومن نفس معلومات المثال السابق يمكن تعيين كفاءة البئر خلال عدد من مراحل الضخ المختلفة باستخدام ورق رسم بياني أو لو غاريتمي شكل (9.23).
الحل:-

كفاءة البئر عند ضخها بمعدلات تصريف مختلفة





شكل (9.23):- يوضح مسار الضخ بالبئر، ويظهر التفسير الهيدروليكي لنتائج الاختبار عند الضخ بمعدل أكبر من معدل التصريف الأمثل على ورق رسم بياني ولوغاريتمي على التوالي.

أولاً: عند الضخ بمعدل 4800 م³/يوم وهو أكبر من قيمة معدل الضخ الأمثل ففي هذه الحالة يحدث تغير في قيمة فاقد الخزان الجوفي مع تشكل مكونات فقد البئر. من الشكل أعلاه الانخفاض الكلي في المنسوب 13.25 متر. عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{max.}}{Q_{opt.}} = \frac{4800}{1900} = 2.53$$

مقدار التغير أو الزيادة في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ = B \times Q_{max.} = 2.2 \times 10^{-3} \times 4800 = 10.6$$

أو

$$BQ = BQ_{opt.} \times F = 4.2 \times 2.53 = 10.6$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي يزيد عن معدل الضخ الأمثل عندها يحدث تغير في قيمة فاقد الخزان الجوفي يقدر بحوالي 10.6 متر.

ثابت فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{max.}}{Q_{max.}} = \frac{10.6}{4800} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

فواقد البئر

$$CQ^2 = s_w - BQ = 13.25 - 10.6 = 2.65 \text{ m}$$

ثابت فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{(Q_{max.})^2} = \frac{2.65}{(4800)^2} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

بناءً على نتائج اختبار الضخ التدريجي يجب أن ندرك أن قيمة معامل فقد الخزان الجوفي $2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$ أكبر من قيمة معامل فقد البئر. واستناداً إلى تصنيف 1962 Walton جدول (3.1) تم تصميم وتطوير البئر بشكل صحيح نظراً لأن قيمة ثابت فقد البئر $1.0 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$.

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{10.6}{13.25} \times 100 = 80.0\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{4800}{13.25} = 362.3 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثانياً: عند الضخ بمعدل تشغيلي 2500 م³/يوم وهو أيضاً أكبر من قيمة معدل الضخ الأمثل.

الانخفاض الكلي في المنسوب 6.2 متر شكل (9.23).

عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{max.}}{Q_{opt.}} = \frac{2500}{1900} = 1.3 \text{ m}$$

مقدار التغير في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ = 2.2 \times 10^{-3} \times 2500 = 5.5 \text{ m}$$

$$BQ = BQ_{opt.} \times F = 4.2 \times 1.3 = 5.5 \text{ m}$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي يفوق معدل الضخ الأمثل عندها يحدث تغير في قيمة فاقد الخزان الجوفي تقدر بـ 5.5 متر.

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{max.}}{Q_{max.}} = \frac{5.5}{2500} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

فوائد البئر

$$CQ^2 = s_w - BQ = 6.2 - 5.5 = 0.7 \text{ m}$$

معامل فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{Q^2} = \frac{0.7}{2500^2} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{5.5}{6.2} \times 100 = 88.7\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{2500}{6.2} = 403.2 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثالثاً: عند الضخ بمعدل تصريف أمثل 1900 م³/يوم

عند ضخ البئر بهذا المعدل تنعدم فوائد البئر، وفي هذه المرحلة من الضخ يتساوى الانخفاض الكلي في المنسوب مع فاقد الخزان الجوفي ليصل إلى 4.2 متر.

عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{1900}{1900} = 1.0 \text{ m}$$

مقدار التغير في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ = BQ_{opt.} \times F = 4.2 \times 1.0 = 4.2 \text{ m}$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي يعادل معدل الضخ الأمثل 1900 م³/يوم عندها لا يحدث تغير في قيمة فاقد الخزان الجوفي بسبب تكافؤ عمليتي التغذية والضخ. معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{4.2}{1900} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

فواقد البئر

$$CQ^2 = s_w - BQ = 4.2 - 4.2 = 0.0 \text{ m}$$

يشار إلى أن التراجع المرتبط بفقدان البئر منعدم تماماً مقارنة بالتراجع المرتبط بفقدان الخزان الجوفي وهو دليل على أن مكونات السريان بالبئر خطية، وأن نظام التدفق فعال عند هذا المعدل من الضخ (أي أن الخزان الجوفي خطي ويستجيب لنظام وظروف التدفق الصفحي)، وفي هذه الحالة يمكن تحديد معدل الضخ مقابل السحب الذي يلبي احتياجات تشغيل المضخة على أفضل وجه.

معامل فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{(Q_{opt.})^2} = \frac{0.0}{(1900)^2} = 0.0 \text{ d}^2/\text{m}^5$$

$$CQ = 0.0 \times 1900 = 0.0 \text{ m}$$

الانخفاض النوعي

$$\frac{s_w}{Q} = \frac{4.2}{1900} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

أو

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ = 2.2 \times 10^{-3} + 0.0 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{4.2}{4.2} \times 100 = 100\%$$

أو

$$E_w = \frac{B}{B + CQ} \times 100 = \frac{B}{s_w/Q} \times 100 = \frac{2.2 \times 10^{-3}}{2.2 \times 10^{-3}} \times 100 = 100.0\%$$

للتأكيد من أن البئر تعمل بطاقتها العظمى يجب قياس الزاوية الحاصرة ما بين خط مسار فاقد الخزان الجوفي ومسار الانخفاض الكلي في المنسوب عند النقطة A شكل (9.21) وهي كما يلي:-

$$E_w = \frac{7^\circ}{7^\circ + 0.0^\circ} \times 100 = 100\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{1900}{4.2} = 452.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

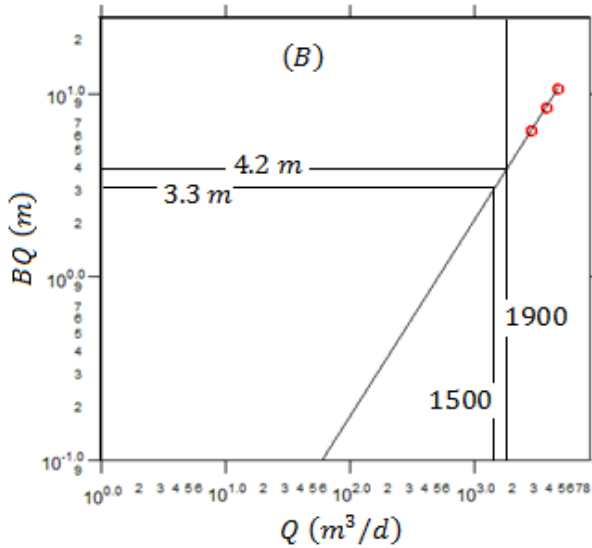
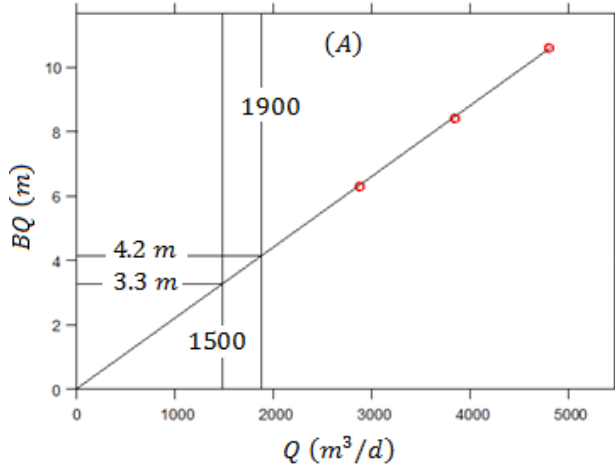
تصف هذه الطريقة نتائج معاملات التدفق عند ظروف التدفق الثابت، وهي تساعد الجيولوجي في إدارة مكمّن المياه الجوفية بالوصول للبئر إلى كفاءتها المثلى وذلك عند تحديد قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى BQ_{opt} . من نقطة تقاطع الهبوط الكلي في

المنسوب مع كمية التصريف المثلى Q_{opt} عند النقطة A شكل (9.21)، وفي هذه الحالة لا يوجد أثر يذكر لمكونات فواقد البئر. ومن نقطة التقاطع A كانت قيمة الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي وداخل البئر متساوية وهي: 4.2 متر وبقية تصريف 1900 م³/يوم. أخيراً تستجيب البئر عند ضخها بالمعدل الأمثل إلى طبيعة التنظيم التلقائي لمعاملات انخفاض معدل التدفق الرقائقي الذي يصاحبه انعدام معدل التدفق المضطرب.

الخلاصة:-

يخبرنا الشكل أعلاه بأن خسائر البئر غير الخطية CQ^2 تتشكل عند الضخ بمعدل أكبر من 1900 متر مكعب لكل يوم مما يعني أن تصميم البئر تشوبه بعض الأخطاء الفنية أو ربما يكون السبب راجع إلى الجهد الذي يقع على الخصائص الهيدروليكية للخزان الجوفي. ومن ناحية أخرى تنعدم خسائر البئر غير الخطية وتصل البئر إلى كفاءتها العظمى عند الضخ بمعدل 1900 متر مكعب لكل يوم وفي هذه الحالة يصل الهبوط في منسوب الماء إلى عمق 4.2 متر، وفيه يظل منسوب الماء متساوي داخل التكوينة الجيولوجية وحول محيط وداخل البئر وتصل البئر إلى كفاءتها القصوى. تفسر هذه الحالة بتقييد خسائر مكونات البئر وأن الخزان الجوفي لا يتأثر بأي إجهاد واقع عليه وذلك بعدم تحريك الحبيبات الدقيقة، مما يجعل الفرصة مؤاتية لسيادة خسائر الخزان الجوفي B_1Q فقط. ومن جانب آخر تدرس هذه الطريقة كيفية رصد قيمة معامل فاقد الخزان الجوفي ومعامل فقد البئر، فقيم معامل فاقد الخزان الجوفي تتساوي في القيمة $2.2 \times 10^{-3} d/m^2$ عند الضخ بمعدلات تصريف مختلفة، بينما تتفاوت قيم معامل فقد البئر حسب كمية الضخ، فهي تتساوى في القيمة عند الضخ بمعدل أكبر من قيمة الضخ المثلى وتبلغ حوالي $1.1 \times 10^{-7} d^2/m^5$ ، وينعدم معامل فقد البئر في حالة الضخ بالمعدل الأمثل.

رابعاً: عند الضخ بمعدل تصريف 1500 م³/يوم وهو أقل من كمية الضخ المثلّي
كفاءة البئر عند الضخ بمعدل أقل من معدل الضخ الأمثل



شكل (9.24):- يوضح التفسير الهيدروليكي عند الضخ بمعدل أقل من معدل
التصريف الأمثل على ورق رسم: بياني وآخر لوغاريتمي على التوالي.
ذكرنا فيما سبق أن من سلبيات تحليل نتائج الضخ المتدرج صعوبة التوصل إلى تحديد
كمية الضخ المثلّي التي تصل فيها البئر إلى كفاءتها العظمى، حيث أثبتت الدراسة

والتجارب الحقلية في هذا الفصل أنه في كثير من الأحيان يتم ضخ آبار المياه بكميات تفوق حد الضخ الأمثل وفي أوقات أخرى ربما قد يتم ضخ البئر بمعدل تشغيلي يقل عن معدل الضخ الأمثل، وفي هذه الحالة يجب على جيولوجي الحقل التمييز ما بين معدلات الضخ المختلفة للوصول بالبئر إلى كفاءتها العظمى عند الضخ بالمعدل الأمثل. وللتحقق من أن البئر تعمل بطاقة أقل من إمكانيات جهد الخزان الجوفي لابد من المقارنة ما بين قيمة الهبوط الأمثل في المنسوب وقيمة الهبوط الذي وصلت اليه البئر في تلك اللحظة من الضخ، ورياضياً يحسب على النحو التالي:-

مقدار الهبوط في حالة الضخ بمقدار أقل من قيمة الهبوط الأمثل

$$Q_{opt.} = 1900 \text{ m}^3/d \quad s_{wopt.} = 4.2 \text{ m}$$

$$Q_{min.} = 1500 \text{ m}^3/d \quad s_{wmin.} = x \text{ m}$$

$$s_{wmin.} = \frac{Q_{min.} \times s_{wopt.}}{Q_{opt.}} = \frac{1500 \times 4.2}{1900} = 3.3 \text{ m}$$

قيمة الهبوط 3.3 متر أقل من قيمة الهبوط الأمثل، هذه الحالة تستدعي زيادة كمية الضخ بغرض زيادة الهبوط في المنسوب حتى يتسنى الوصول بالبئر إلى كمية الضخ المثالية، وعليه فإن مقدار العجز في كمية الضخ Q_x هي:-

$$Q_x = Q_{opt.} - Q_{min.} = 1900 - 1500 = 400 \text{ m}^3/d$$

مقدار الهبوط الإضافي في حالة زيادة كمية الضخ بمقدار 400 م³/يوم

$$Q_{opt.} = 1900 \text{ m}^3/d \quad s_{wopt.} = 4.2 \text{ m}$$

$$Q_x = 400 \text{ m}^3/d \quad s_{wx} = x \text{ m}$$

$$s_{wx} = \frac{Q_x \times s_{wopt.}}{Q_{opt.}} = \frac{400 \times 4.2}{1900} = 0.9 \text{ m}$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي 1500 م³/يوم وهو أقل من معدل الضخ الأمثل عندها يحدث عجز ونقص متساوي القيمة بالخزان الجوفي وحول محيط البئر، ويقدر بحوالي 0.9 متر شكل (9.24).

فاقد الخزان الجوفي عند الضخ بمعدل تشغيلي مقداره 1500 م³/يوم عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{min.}}{Q_{opt.}} = \frac{1500}{1900} = 0.79 \text{ m}$$

قيمة فاقد الخزان الجوفي

$$BQ_{min} = BQ_{opt.} \times F = 4.2 \times 0.79 = 3.3 \text{ m}$$

تتساوى مناسيب المياه بالخزان الجوفي وداخل البئر في حالة ضخ البئر بمعدل تشغيلي 1500 م³/يوم والذي فيه تصل خسائر الخزان الجوفي والبئر إلى حوالي 3.3 متر ولكن دون وصول البئر إلى مرحلة الاستقرار.

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{min.}}{Q_{min.}} = \frac{3.3}{1500} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ d/m}^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ_{min}}{s_{wopt.}} \times 100 = \frac{BQ_{min}}{s_{wmin.} + s_{wx}} \times 100 = \frac{3.3}{4.2} \times 100 = 78.6\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q_{min}}{s_{wmin.}} = \frac{1500}{3.3} = 454.5 \text{ m}^2/\text{d}$$

تمر البئر خلال مراحل عملية الضخ بعدد من المراحل التي تبين الحالة الراهنة للبئر عند كل مرحلة ضخ جدول (9.3) وهي بالتفصيل كما يلي:-

- في بداية عملية الضخ تتساوى مناسيب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر ولكن دون الوصول إلى مرحلة الاستقرار، مما يعني أن البئر لم تصل إلى كفاءتها المثلى جدول (9.3).

- عند مرحلة معينة من الضخ تصل البئر إلى كفاءتها المثلى والتي فيها يتساوى منسوب الماء بالتكوينة وداخل البئر، وهو مؤشر يدل على أن البئر وصلت إلى مرحلة الثبات.

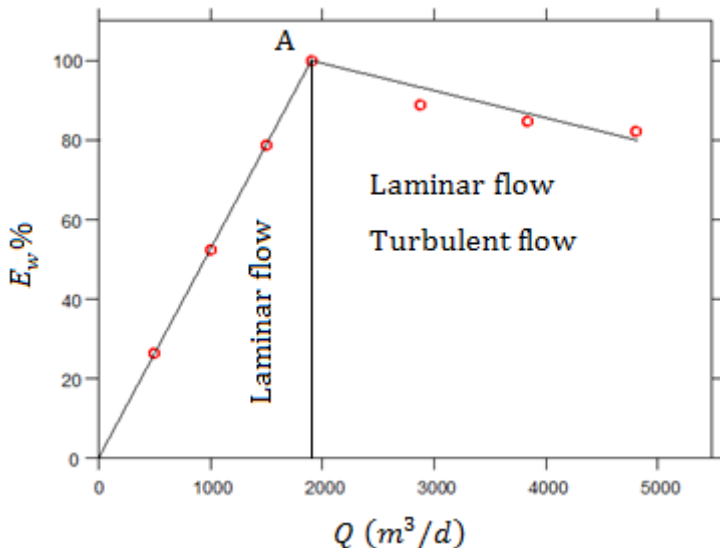
- ربما تستمر عملية الضخ لتصبح الفرصة مؤاتيه لحدوث تكوين وظهور فواید البئر التي تقلل من كفاءة البئر مع زيادة كمية الضخ في كل مرحلة.

يسمح تحديد فقد البئر بحساب الهبوط والسعة المحددة المتوقعة في بئر الضخ بمعدلات تصريف مختلفة. وأيضاً يشمل تقييم فقد البئر تقييم التدفق المضطرب مع زيادة معدل الضخ. بشكل عام تقل السعة المحددة عند معدلات الضخ المرتفعة بسبب زيادة التدفق المضطرب في البئر. ويسمح تقييم فقد البئر بإسقاط أفضل لمعدل الضخ الأمثل وتقدير الهبوط الفعلي في الخزان الجوفي بالقرب من البئر بعيداً عن آثار الخسائر الناجمة عن الضخ وعدم كفاءة البئر، وفقدان الاحتكاك، والتدفق المضطرب. يظهر الجدول (9.3) تلك العلاقة بين السعة المحددة وأنواع إنتاجية الآبار، وتهدف هذه المنهجية إلى تقييم أداء أنبوب البئر وتحديد خصائصه من خلال تقييم معايير فقد البئر، وفقدان الخزان الجوفي، والقدرة النوعية وكفاءة الآبار. وبشكل أساسي تحتاج الإدارة السليمة إلى تتبع المراحل التي تمر بها البئر أثناء عملية ضخها بمعدلات تصريف مختلفة (مثلاً كل 1000 م³/يوم) والتي منها يتم حصر الكفاءات التي تمر بها البئر منذ بداية الضخ حتى النهاية جدول (9.3)، ومن هذه المراحل يستطيع الباحث اختيار كمية الضخ المناسبة التي يجب أن تضخ بها البئر دون حدوث مشاكل تعيق عملية التشغيل والتي

عندها تكون البئر قد وصلت إلى حد الكفاءة المثلى التي تنعدم عندها فواقد البئر شكل (9.25).

جدول (9.3):- يوضح كميات تصريف البئر منذ بداية الضخ والكفاءة عند كل مرحلة.

المرحلة	$Q (m^3/d)$	$BQ (m)$	$CQ^2(m)$	$S_c (d/m^2)$	$E_w \%$
1	500	1.1	0.0	454.5	26.2
2	1000	2.2	0.0	454.5	52.4
3	1500	3.3	0.0	454.5	78.6
4	1900	4.2	0.0	452.4	100
5	2880	6.3	0.83	394.5	88.7
6	3840	8.4	1.5	372.8	84.8
7	4800	10.6	2.3	362.3	82.2



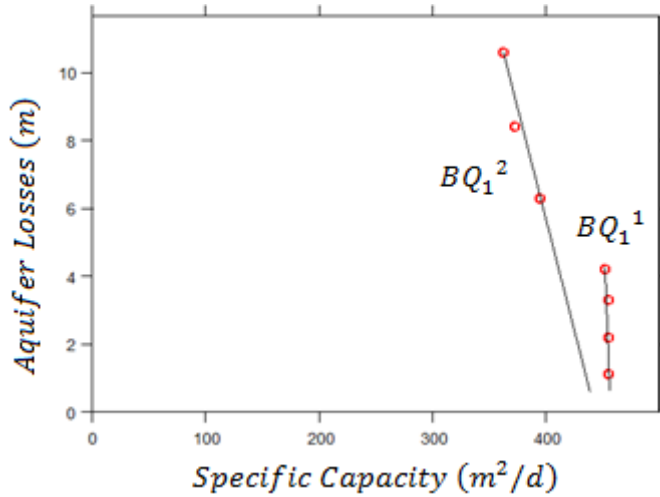
شكل (9.25):- يوضح منحنى تدرج الكفاءات مقابل تصريف البئر، ومن هذا المنحنى

يمكن اختيار كمية التصريف المثلى A التي تكون فيها كفاءة البئر 100%.
يتم تقييم أداء آبار المياه من حيث فقدان الخزان الجوفي، فقد البئر، السعة المحددة وكفاءة الآبار. وفي هذه الحالة يتم عرض نتائج التقييم والرسم البياني للحالة الهيدروليكية التي تمر بها البئر أثناء عملية الضخ، ويشير الشكل أعلاه إلى توفير مقارنة لطيفة عند تباين كفاءات البئر، وبناءً على معلومات السحب التدريجي الواردة بالجدول (9.3) والمكونة من عدة خطوات، تمت الإشارة إلى أن منحنى تدرج كفاءة البئر يزداد تدريجياً مع زيادة كمية الضخ حتى يصل إلى 100% عند النقطة A وذلك عند الضخ بمقدار 1900 م³/يوم، ومن ثم يبدأ المنحنى (كفاءة البئر) في النقصان والاضمحلال مع زيادة كمية الضخ. وهنا يعزى سبب انخفاض كفاءة البئر إلى الأهمية المتزايدة لفقد البئر عند معدلات الضخ الأعلى.

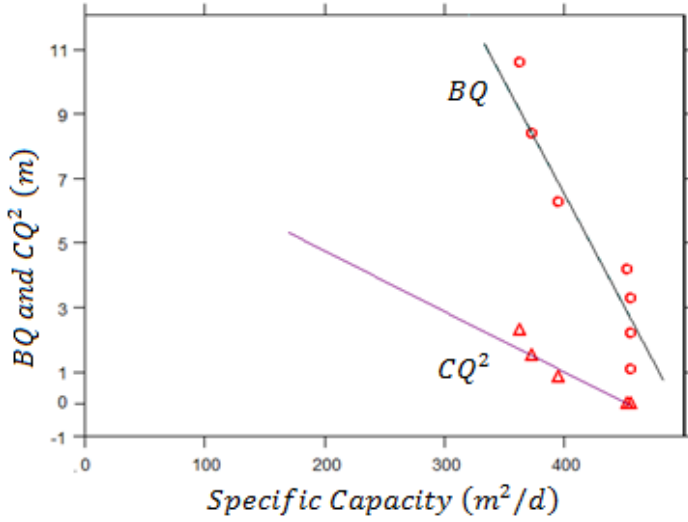
يخبرنا هذا التحليل بأن هنالك نقطة مثيرة للاهتمام وهي أن الخسائر الخطية هي التي تبدأ أولاً عند بداية عملية الضخ وتظل سائدة على الجانب الأيسر من الشكل، وهي تعكس سيادة السريان الخطي ومساهمة خسارة الخزان الجوفي في انخفاض منسوب الماء بالبئر وذلك عند الضخ بكميات تساوي أو أقل من 1900 م³/يوم. أما الشكل الرسومي على الناحية اليمنى فهو يفسر لنا حدوث السريان الخطي والمضطرب والذي يزداد مع زيادة معدل الإنتاج أكثر 1900 م³/يوم، ومن الملاحظ أن التدفق المضطرب غير في الشكل العام للمنحنى ناحية اليمين مقارنة بالطرف الأيسر. وفي هذه المرحلة من الضخ تبدأ كفاءة البئر في النقصان رويداً رويداً مع زيادة كمية الضخ بعد أن وصلت إلى 100% عند النقطة A شكل (9.25). ويعزى سبب نقصان كفاءة البئر إلى تزايد فقد البئر خاصة عند معدلات الضخ العليا.

يبدو أن هنالك علاقة بين السعة النوعية وإجمالي خسائر البئر، هذه العلاقة توضحها تلك الانحرافات التي تحدث عند تحليل نتائج الاختبار شكل (9.26 و 9.27)، هذه

الانحرافات مفيدة في تفسير عدم انتظام الخزان الجوفي خلال مراحل الضخ المختلفة. بشكل عام يتناقص فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر مع زيادة السعة النوعية شكل (9.27)، ولقد لوحظ أن قيمة السعة النوعية في المرحلة الأولى من الضخ أكبر من قيمة السعة النوعية في المرحلة الثانية من الضخ شكل (9.26)، وسجلت قيمة فاقد الخزان الجوفي BQ_1^1 أقل قيمة لها في بداية عملية الضخ ومن ثم بدأت في الزيادة حتى وصلت إلى القيمة المتلى لها 4.2 متر عند نهاية المرحلة الأولى من الضخ، وهي أقل عموماً من قيمة فاقد الخزان الجوفي BQ_1^2 في المرحلة الثانية من الضخ، وتعزى تلك الزيادة إلى زيادة كمية الضخ شكل (9.26).



شكل (9.26):- يوضح السعة المحددة مقابل قيم فاقد الخزان الجوفي خلال مرحلتي الضخ: المرحلة الأولى BQ_1^1 التي تنعدم فيها خسائر البئر، والمرحلة الثانية BQ_1^2 التي تنشأ عندها خسائر البئر.



شكل (9.27):- السعة المحددة مع فاقد الخزان الجوفي وفقد البئر.

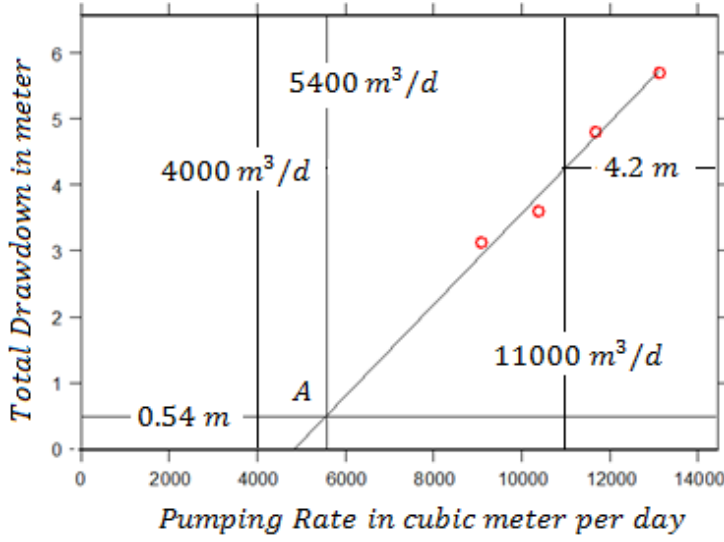
أفضل الحالات التي تكون فيها البئر هي تلك الحالة التي تزيد فيها قيم BQ_1 حتى تصل إلى أعلى قيمة لها 4.2 متر، وبعد هذه المرحلة من الضخ تبدأ خسائر البئر في الظهور لتقل كفاءة البئر مع زيادة خسائر البئر.

مثال (9.8):-

من معلومات بيانات البئر بالجدول (9.2). أوجد الكفاءة المتلى للبئر.

الحل:-

كفاءة البئر عند الضخ بمعدلات تصريف مختلفة



شكل (9.28):- يوضح نتائج ضخ البئر بمعدلات تصريف مختلفة.

أولاً: عند الضخ بمعدل 11000 م³/يوم وهو أكبر من قيمة معدل الضخ الأمثل البالغ 5400 م³/يوم الموضحة بالشكل أعلاه، ففي هذه الحالة تكون قيمة فاقد الخزان أقل من قيمة الهبوط المثلى في المنسوب 4.2 متر وذلك بسبب تشكل مكونات فقد البئر. معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{0.54}{5400} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{max.}}{Q_{opt.}} = \frac{11000}{5400} = 2.04 \text{ m}$$

مقدار التغير أو الزيادة في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ_{max.} = B \times Q_{max.} = 1.0 \times 10^{-4} \times 11000 = 1.1 \text{ m}$$

أو

$$BQ_{max.} = BQ_{opt.} \times F = 0.54 \times 2.04 = 1.1 \text{ m}$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي يفوق معدل الضخ الأمثل عندها يحدث تغير وزيادة في قيمة فاقد الخزان الجوفي تقدر بحوالي 1.1 متر.

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{max.}}{Q_{max.}} = \frac{1.1}{11000} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

فواقد البئر

$$CQ^2 = s_w - BQ_{max.} = 4.2 - 1.1 = 3.1 \text{ m}$$

يشار إلى أن مكونات فاقد الخزان الجوفي أقل من قيمة فقدان البئر وهو دليل يشير أن مكونات السريان بالبئر غير خطية، وأن نظام التدفق غير فعال عند معدلات الضخ الأعلى، وفي هذه الحالة لا يمكن تحديد معدل الضخ مقابل السحب الذي يلبي احتياجات تشغيل المضخة على أفضل وجه.

معامل فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{(Q_{max.})^2} = \frac{3.1}{(11000)^2} = 2.6 \times 10^{-8} \text{ d}^2/\text{m}^5$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ}{s_w} \times 100 = \frac{1.1}{4.2} \times 100 = 26.2\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q}{s_w} = \frac{11000}{4.2} = 2619.0 \text{ m}^2/\text{d}$$

ثانياً: عند الضخ بمعدل تصريف أمثل 5400 م³/يوم

الانخفاض الكلي في المنسوب 0.54 متر وهو مساوي لفاقد الخزان الجوفي.

$$Q_{opt.} = 5400 \text{ m}^3/\text{d} \quad s_{wopt.} = BQ_{opt.} = 0.54 \text{ m}$$

$$CQ^2 = 0.0 \text{ m}$$

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{0.54}{5400} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$$

عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{opt.}}{Q_{opt.}} = \frac{5400}{5400} = 1.0 \text{ m}$$

مقدار التغير في فاقد الخزان الجوفي

$$BQ = BQ_{opt.} \times F = 0.54 \times 1.0 = 0.54 \text{ m}$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي يعادل معدل الضخ الأمثل 5400 م³/يوم عندها لا يحدث تغير في قيمة فاقد الخزان، وفي هذه المرحلة من الضخ تنعدم فواقد البئر.
فواقد البئر

$$CQ^2 = s_w - BQ = 0.54 - 0.54 = 0.0 \text{ m}$$

معامل فقد البئر

$$C = \frac{CQ^2}{(Q_{opt.})^2} = \frac{0.0}{(5400)^2} = 0.0 \text{ d}^2/\text{m}^5$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ_{opt.}}{s_{wopt.}} \times 100 = \frac{0.54}{0.54} \times 100 = 100\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q_{opt.}}{s_{wopt.}} = \frac{5400}{0.54} = 10000.0 \text{ m}^2/\text{d}$$

تصف هذه الطريقة نتائج معاملات التدفق عند ظروف التدفق الثابت، وهي تساعد الجيولوجي في إدارة مكامن المياه الجوفية بالوصول للبئر إلى كفاءتها المثلى وذلك عند

تحديد قيمة فاقد الخزان الجوفي المثلى BQ_{opt} . من نقطة تقاطع الهبوط الكلي في المنسوب مع كمية التصريف المثلى Q_{opt} . عند النقطة A شكل (9.28)، وفي هذه الحالة لا يوجد أثر يذكر لفوائد البئر. ومن نقطة التقاطع A كانت قيمة الهبوط في المنسوب بالخزان الجوفي وداخل البئر متساوية وهي: 0.54 متر وبقية تصريف 5400 م³/يوم.

ثالثاً: عند الضخ بمعدل تصريف 4000 م³/يوم وهو أقل من كمية الضخ المثلى هنالك حالة ربما قد تحدث عند ضخ آبار المياه بمعدل أقل من المعدل الأمثل، وتقود هذه العملية إلى حدوث عجز في خسائر الخزان الجوفي، وفيها تتساوي وتطابق مناسيب المياه بالخزان الجوفي وداخل البئر، ولا يصل منسوب الماء بالخزان الجوفي وداخل البئر إلى مستواه الأمثل مقارنة في حالة الضخ بالمعدل التشغيلي الأمثل. توضح هذه الظاهرة أن البئر لم تصل إلى مرحلة الثبات، وأيضاً لهذه الظاهرة أهمية خاصة في إدارة موارد المياه الجوفية التي تتطلب زيادة كمية الضخ للوصول بالبئر إلى كمية الضخ المثلى. وفي هذه الحالة يتم تقدير الانخفاض الكلي في المنسوب حسابياً من المعادلات الرياضية ويتعذر تقديره من الرسم البياني بسبب أن كمية تصريف البئر 4000 م³/يوم لا تتقاطع مع خط مسار بيانات الانخفاض الكلي في المنسوب، وبالتالي يصعب تحديد مقدار الهبوط الكلي في المنسوب من المحور الرأسي شكل (9.28). رياضياً تحسب المعاملات الهيدروليكية على النحو التالي:-

$$Q_{opt.} = 5400 \text{ m}^3/\text{d} \quad s_{wopt.} = 0.54 \text{ m}$$

$$Q_{min.} = 4000 \text{ m}^3/\text{d} \quad s_{wmin.} = x \text{ m}$$

مقدار الهبوط في منسوب المياه

$$s_{wmin.} = \frac{Q_{min.} \cdot x \cdot s_{wopt.}}{Q_{opt.}} = \frac{4000 \times 0.54}{5400} = 0.4 \text{ m}$$

عامل تصريف البئر

$$F = \frac{Q_{min.}}{Q_{opt.}} = \frac{4000}{5400} = 0.74 m$$

فاقد الخزان الجوفي

$$BQ_{min} = BQ_{opt.} \times F = 0.54 \times 0.74 = 0.4 m$$

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{min.}}{Q_{min.}} = \frac{0.4}{4000} = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$$

عند ضخ البئر بمعدل تشغيلي 4000 م³/يوم وهو أقل من معدل الضخ الأمثل 5400 م³/يوم عندها يكون فاقد الخزان الجوفي في مستوى يقدر بحوالي 0.4 متر وهو أقل انخفاضاً من منسوب الماء عند الضخ بالمعدل الأمثل 0.54 متر، وعليه فإن مقدار العجز في خسائر الخزان يساوي 0.14 متر، وبحسب رياضيّاً على النحو التالي:-

$$s_{wopt.} = BQ_{opt.} = 0.54 m \quad BQ_{min.} = 0.4 m$$

مقدار العجز في الهبوط بالخزان الجوفي وداخل البئر $s_{wx.}$

$$s_{wx.} = s_{wopt.} - BQ_{min.} = 0.54 - 0.4 = 0.14 m$$

معامل فاقد الخزان الجوفي

$$B = \frac{BQ_{min.}}{Q_{min.}} = \frac{0.4}{4000} = 1.0 \times 10^{-4} d/m^2$$

كفاءة البئر

$$E_w = \frac{BQ_{min.}}{s_{wopt.}} \times 100 = \frac{0.4}{0.54} \times 100 = 74.1\%$$

السعة النوعية

$$S_c = \frac{Q_{min.}}{s_{wmin.}} = \frac{4000}{0.4} = 10000.0 m^2/d$$

References:

- Bierschenk, W. H (1963): Determining well efficiency by multiple step – drawdown tests (493-507p). International Association of Scientific Hydrology.
- Clark, L (1977): The Analysis and Planning of Step Drawdown Tests. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 10, 125–143.
- Cooper, H. H. and Jacob, C. E (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, American Geophysical Union Transactions, v. 27, 526–534.
<https://www.researchgate.net/publication/304670447>.
- Driscoll, F.G (1986): Groundwater and wells, Johnson Division, St. Paul, MN, USA.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A (1979): Groundwater: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 604 p. ISBN 0-13-365312-9.
- Helweg, O. J., V .H. Scott, and W. C. Scalmanini (1983): Improving Well and Pump Efficiency, AWWA, Denver, CO.
- Jack Bruin and H. E Hudson JR. (1961): Selected Methods for Pumping Test Analysis, State of Illinois, No.25.

- Jacob, C. E (1947): Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Trans. Amer. Soc. Civil. Engrs.
- Johnson, E. E (1966): Groundwater and wells, Edward E. Johnson Inc., Saint Paul, Minnesota, USA.
- Jwan, S. M (2017): Aquifer Parameters and Well Efficiency Estimation for Selected Site in Erbil Governorate. A Thesis Submitted to the Council of the College of Engineering at Salahaddin University-Erbil in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Water Resources and Environmental Engineering. Erbil – Kurdistan, Iraq.
- Kaergaard, (1982): The step-drawdown test and non-Darcian flow: a critical review of theory, methods and practice. Hydrology Research 13, no. 4: 247-256.
- Kawecki, M.W(1995): Meaningful Estimates of Step-Drawdown Tests. Groundwater, 33, 23–32.
- Lennox, D. H (1966): Analysis and application of step-drawdown test. Jour. Hydraulics Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 92: 25-48.
- Maged El Osta (2012): Relationships between Hydraulic Parameters of the Nubian Aquifer and Wells in El Shab Area, South Western Desert, Egypt (A Case Study).

Geology Department, Faculty of Science, Damanhour University, Damanhour, Egypt. *International Journal of Geosciences*, 2012, 3, 1107-1119 <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.35112> Published Online November 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/ijg>).

Mogheir, Y (2010): The Islamic University of Gaza Faculty of Engineering Civil Engineering Department Water Resources M. Sc. Groundwater Hydrology – ENGC 6301. Lecture 3, Semester: 1st/2010 – 2011, ymogheir@mail.iugaza.edu.

Razack, M. Huntley, D. (1991): Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous aquifer. *Groundwater* 29:856-861.

Rorabaugh M. I (1953): Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian wells. *Transactions, American Society of Civil Engineers* 79 (separate 362): 1–23.

Sen, Z (1995): *Applied Hydrogeology for Sciences and Engineering*: United States of America. CRC Press.

Walton, William C (1970): *Groundwater Resource Evaluation*, McGraw-Hill, Inc.

Walton. W. C (1962): Selected analytical methods for well and aquifer evaluation, Illinois State Water Survey Bulletin 49, Urbana Illinois, 81p.

Yosef Aregaw (2018): Evaluation of Hydraulic Parameters in Old Akaki Well Fields. Thesis Submitted to Addis Ababa Institute of Technology, School of Post graduate Studies in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering (Hydraulic Engineering). Addis Ababa, Ethiopia.



المؤلف في سطور:-

الدكتور/ أحمد بابكر الحاج عبدالقادر

- من مواليد مدينة أبوزبد ولاية غرب كردفان، السودان، ديسمبر 1970م
- حاصل على بكالوريوس علوم التربة والمياه مرتبة الشرف جامعة كردفان 1996م
- حاصل على الدبلوم العالي في الجيولوجيا العامة - جامعة دنقلا عام 2013م
- حاصل على الماجستير في الجيولوجيا تخصص مياه جوفية، جامعة كردفان 2003م
- حاصل على الدكتوراه في الجيولوجيا، تخصص مياه جوفية، جامعة النيلين 2009م
- درّس في العديد من الجامعات داخل السودان، وخارجه (جامعة الملك خالد - كلية الهندسة - قسم الهندسة المدنية - المملكة العربية السعودية).
- شارك في العديد من المؤتمرات العالمية، وله العديد من الأوراق العلمية.

صدرت له الكتب وبراءات الاختراع التالية:-

- طرق جديدة في تحليل وتقييم تجارب ضخ آبار المياه الجوفية الطبعة الأولى 2015م
- New methods of analysis and evaluation of pumping test for groundwater - Lambert Academic Publishing, Germany, 2016.
- تطبيقات جديدة في علم المياه الجوفية، نور للنشر- الطبعة الأولى 2016، والثانية 2018
- جيولوجيا الصخور - نور للنشر - ألمانيا - الطبعة الأولى 2017م
- أساسيات علم المعادن، نور للنشر - ألمانيا - الطبعة الأولى 2018م
- سلالة من طين - إعجاز القرآن الكريم: البياني والعلمي في علم الجيولوجيا - دار المصورات للنشر - السودان 2019م
- حائز على براءتي اختراع في مجال المياه بالملكية الفكرية بالسودان عام 2016م