#	العنوان	ص
	هدف البحث	3
القسم النظري		4
الفصل الأول	**استخدام التحاليل العقدية (Nodal Analysis) لمنظومة الإنتاج**	5
	1-1 نماذج من تطبيق استخدام تحاليل **(Nodal)** في العالم	7
	1-2 المتطلبات الأساسية لتطبيق تحاليل **(Nodal)**	8
	1-3 معادلة الجريان الداخلي **(IPR: Inflow Performance Relationship):**	12
	1-3-1 تأثير الظاهرة الجلدية **(Skin Effect):**	16
	1-3-2 نماذج استخدام معادلة الجريان الداخلي	18
	1-4 معادلة الجريان الخارجي **(Out Flow)**	19
	1-5 مواضع استخدام تحاليل **(Nodal):**	23
	1-5-1 تحديد الإنتاجية المثالية لبئر منتجة من طبقة ما	21
	1-5-2 تحديد القطر المثالي لمواسير الإنتاج لتشغيل البئر والحصول على الإنتاجية المثلى	24
	1-5-3 تأثير فتحة الفالة السطحية المثالي لتشغيل البئر	24
	1-5-4 تأثير نسبة الماء المنتج (الداخل) على الإنتاجية المثالية	28
	1-5-5 تأثير عدد الثقوب (كثافة التثقيب) و قطرها على الإنتاجية المثالية	29

	1-5-6 تأثير ضغط رأس البئر على الإنتاجية المثالية	29
الفصل الثاني	**اختبار الآبار النفطية المنتجة**	31
	2-1 أنواع اختبارات الآبار الرئيسية	31
	2-2 مقياس الذاكرة (Memory Gauge)	32
	2-3 فاصل الاختبار المتنقل (MTU: Mobilized Testing Separator)	34
القسم العملي		36
	أولاً- جمع المعطيات البئرية	38
	دراسة عملية لبئر الثعبان 133 - (SAB-133)	40
	النتائج و المقترحات	64
	المراجع	66

هدف الدراسة

تهدف الدراسة بشكل رئيسي للتعرف على تحاليل نودال Nodal Analysis وتطبيقها بغرض:

تحديد الإنتاجية المثالية للبئر بعد الحل المشترك لمعادلتي الجريان الداخلي (من عمق الطبقة المنتجة حتى قاع البئر) و الخارجي (خلال مواسير الإنتاج و حتى السطح) و هذا ما يمثل جوهر تحاليل نودال.

القسم النظري

الفصل الأول

استخدام التحاليل العقدية (Nodal Analysis) لمنظومة الإنتاج

مقدمة:

تعرف تحاليل (Nodal) كأنظمة تتناول تحسين أداء آبار النفط والغاز, وتستخدم للتقييم الشامل للعملية الإنتاجية أثناء تدفق الموائع الطبقية من الطبقة و حتى السطح, حيث يمكن – من خلال استخدام هذه التحاليل– تحقيق التحسن في أداء كل عنصر من عناصر الإنتاج في الآبار, و من ثم تحقيق الفائدة الاقتصادية المرجوة منه, و ذلك بدءاً من الطبقة النفطية وانتهاءً بالفواصل, بما في ذلك جريان الموائع الطبقية ضمن المنطقة الملوثة بجوار البئر إلى قاع البئر فتشكيلة مواسير الإنتاج – بما تحويه من أجهزة و معدات بئرية جوفية – وصولاً إلى رأس البئر (X-Mas Tree), ثم الفالة السطحية (Choke) فخط الإنتاج (Flow-Line). وبالنهاية إلى الفواصل (Separators).

إن الغاية من عملية الاستثمار تحريك النفط من نقطة ما في المكمن إلى خط الإنتاج، و لهذا سيمر الغاز خلال عدة مناطق ينخفض فيها الضغط، أو مناطق يرتفع فيها الضغط وذلك عند استخدام ضاغط، وقد تشتمل عوائق الجريان على بعض أو كل مما هو مبين في الشكل

رغم أن جميع مكونات منظومة الإنتاج يمكن تحليلها بشكل مستقل إلاّ أن تحديد أدائية البئر تتطلب دراسة تأثير أدائية هذه المكونات مجتمعة وهذا ما يسمى بالتحليل العقدي (Nodal Analysis)

يعتبر التحليل العقدي نظرة منهجية لتحسين تصريف بئر الغاز وهو احد أكثر الوسائل الفعّالة في هندسة الإنتاج لتحليل المنظومة الكلية ابتداء من الحدود الخارجية للمكمن(كونتور التغذية) إلى الوجه الرملي عبر الثقوب (مقطع إكمال البئر) حتى بداية مواسير الإنتاج وصعوداً خلال سلسلة مواسير الإنتاج بما فيها الاختناقات وصمامات الأمان والفالات السطحية وخطوط الجريان السطحية والفاصل.

وتعتمد هذه الطريقة في التحليل على المعطيات التالية:

1- أدائية البئر.

2- أدائية مواسير الإنتاج.

3- أدائية تجهيزات السطح بما فيها الفالات والفاصل.

يعتبر هذا النوع من التحليل عامل مساعد في تحديد:

- الأبعاد التصميمية لمنظومة البئر.
- تأثير قطر مواسير الإنتاج وخط الجريان على أدائية منظومة الإنتاج.
- تأثير ضغط الفاصل على أدائية منظومة الإنتاج.
- تأثير عدد الثقوب على أدائية منظومة الإنتاج.
- استطاعة الضاغط.
- تأثير انخفاض ضغط المكمن على أدائية منظومة الإنتاج.
- صمام الأمان المناسب.

يمكن إنجاز التحليل العقدي بسهولة وذلك بتقسيم المنظومة الكلية إلى منظومتين ثانويتين منفصلتين

وتعيين تأثير التغيرات الحاصلة في إحدى المنظومتين الثانويتين أو كليهما على أدائية البئر.

يعتمد اختيار الموضع أو العقدة التي سيتم عندها تقسيم المنظومة على الهدف من التحليل، حيث يفضل اختيار العقدة عند أو أقرب ما يمكن إلى الجزء المراد تحليله من المنظومة، ويتم التحليل بتعيين ورسم معدل الإنتاج والضغط عند العقدة لكل من المنظومتين الثانويتين ثم تمثلان بيانياً كمنحنيين مستقلين على ذات المخطط، وبما أنه يمكن تواجد ضغط واحد فقط عند العقدة لذلك فان تقاطع منحنيي المنظومتين الثانويتين سيمثل أدائية المنظومة الكلية أو معدل الإنتاج الذي سيحقق المطلوب حيث أنه يجب أن يتساوى معدل الإنتاج الداخل إلى العقدة مع الخارج منها.

و يمكن أن نجمل الأهداف الرئيسية للتحاليل العقدية (Nodal) بما يلي:

1- تقدير معدل الإنتاج الحالي من خلال آبار النفط و الغاز مع الأخذ بالاعتبار حدود عمل التشكيلة الإنتاجية الموجودة في البئر .

2-تحديد ما إذا كان البئر قادراً على الإنتاج الذاتي أم لا عن طريق دراسة و تحليل شروط الجريان.

3-اختيار الوقت المناسب لاستخدام طرق الرفع الصناعي و تقرير اختيار الطريقة الأنسب منها.

4-تحديد الإنتاجية الأمثل للبئر من الطبقة المنتجة.

5-دراسة و تحليل أداء كل جزء من التشكيلة الإنتاجية, و تقدير ما إذا كان يقوم بإعاقة الجريان أو توسيع مجرى التدفق بشكل غير ضروري.

6-السماح لإدارة التشغيل والطاقم الهندسي بالتحقق من طرق زيادة الإنتاج المختلفة و تقييمها.

و قد تم من خلال هذه التحاليل تحسين الإنتاج وتحقيق معدلات إنتاجية أفضل في عدد كبير من الآبار حول العالم مما كانت عليه من قبل. و قد أسهمت تحاليل (Nodal) في تحسين عمليات الإنتاج والكفاءة الإنتاجية للعديد من هذه الآبار, و على الرغم من أن هذا النوع من التحاليل قد تم اقتراحه من قبل (**جلبرت** عام 1954) إلا أنه استخدم بشكل واسع في الولايات المتحدة الأمريكية في السنوات الأخيرة وذلك نتيجة دقة و فعالية هذه الطريقة وبسبب تمكنها من زيادة معدل الإنتاج وأيضاً لتوفر التقانات المعلوماتية التي سمحت بزيادة سرعة إنجاز هذه الحسابات و الخوارزميات المطلوبة.

1-1 نماذج من تطبيق استخدام تحاليل (Nodal) في العالم :

تم تجريب استخدام تحاليل نودال (Nodal Analysis) و توظيفها في الولايات المتحدة الأمريكية على عدد من الآبار النفطية , و أظهرت هذه التحاليل ضرورة إجراء بعض التغييرات في التشكيلة الإنتاجية و معايير التشغيل لزيادة الإنتاجية البئرية , و التي تم تحقيقها بعد توظيفها, وذلك كما يلي:

- دلت تحاليل (Nodal) على ضرورة تغيير مواسير الإنتاج المستخدمة من قياس (2-2.5in) بمواسير إنتاج (4.5-5in), و تغيير كثافة الثقوب في مواسير التغليف الإنتاجية من (4 shot/ft) إلى (16 shot/ft), مما أدى لزيادة إنتاجية هذه الآبار من (10-30 BPD) إلى (100-200 BPD).

- كذلك تم باستخدام التوظيف الصحيح لتحاليل (Nodal) زيادة الإنتاجية في بعض الآبار في الولايات المتحدة الأمريكية من (320 BPD) إلى (510 BPD).

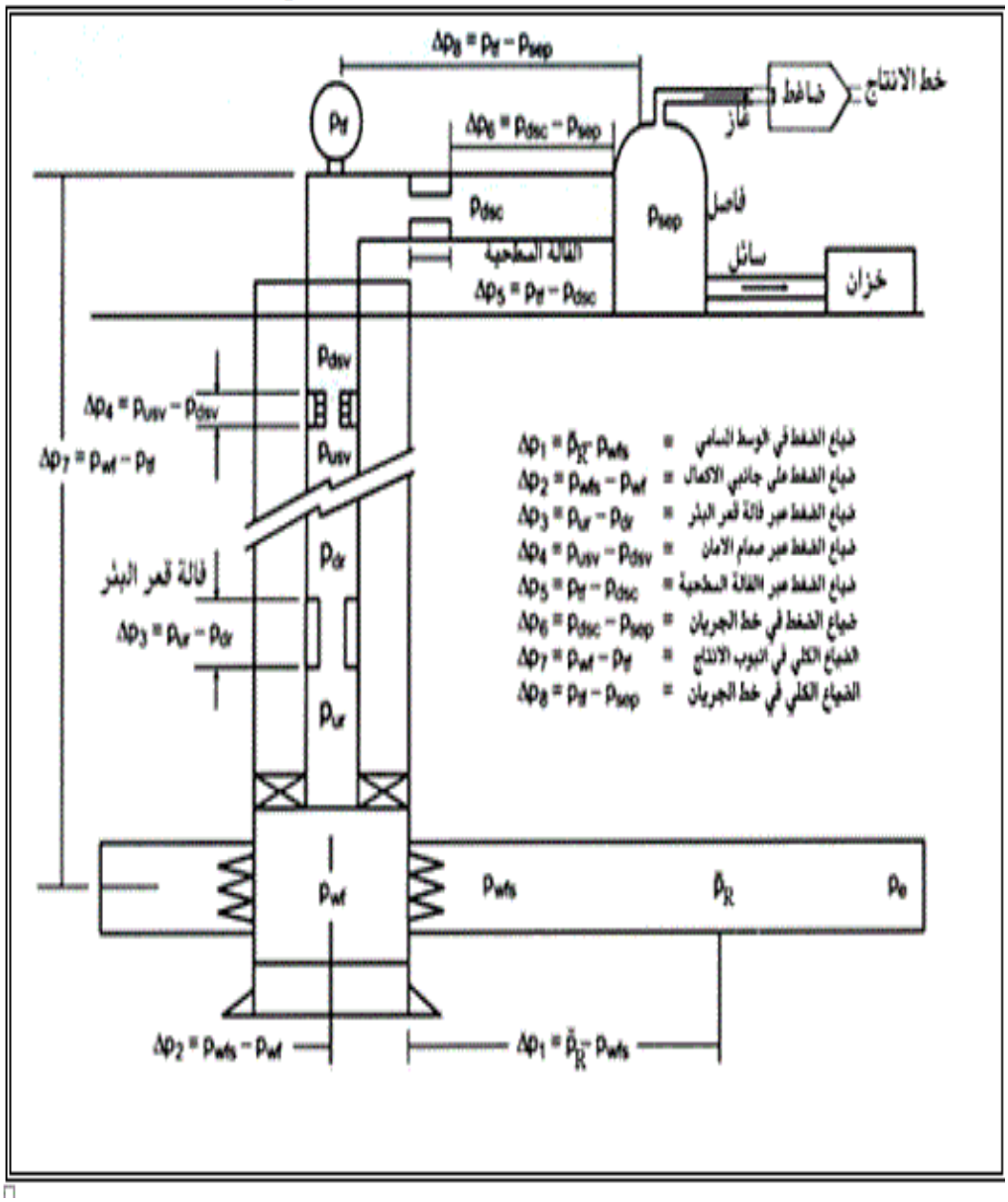
- و أيضاً ازدادت الإنتاجية من آبار الغاز من (1416 Mscf/d) إلى (5663 Mscf/d), بفضل توظيف تحاليل (Nodal), و كل ذلك تم من خلال تغيير في قياسات مواسير الإنتاج , و الضغوط المطبقة على رؤوس الآبار بشكل رئيسي.

و من هنا نجد أن التطبيق الرئيسي لتوظيف معادلات و تحاليل (Nodal) كان بشكل رئيسي لتشغيل آبار النفط و الغاز بهدف الحصول على معدلات إنتاجية أكبر من الآبار.

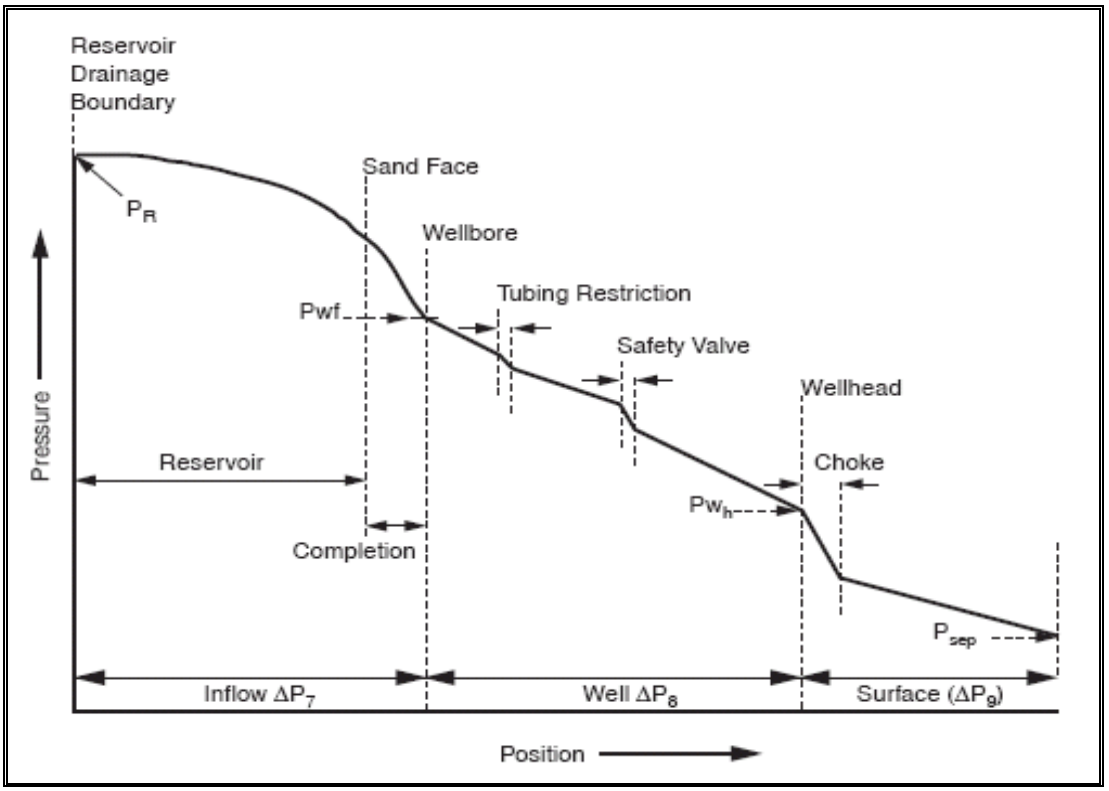
إلا أن التوظيف الصحيح و الأمثل لهذه المعادلات يكمن في التحقق من شروط عمل الآبار , و دراسة أفضل معايير التشغيل و الإنتاج لها, و من ثم تشغيل آبار النفط و الغاز للحصول على الإنتاجية المثلى, كما سنرى في مشروعنا هذا.

2-1 المتطلبات الأساسية لتطبيق تحاليل (Nodal):

لابد قبل البدء بتطبيق تحاليل (Nodal) من تحليل و دراسة معادلة أدائية التدفق الداخلي (IPR: Inflow Performance Relationship), والتي تدرس تتبع و تغير الضغط من المكمن حتى قاع البئر المنتجة, ثم دراسة و تتبع الضغط وفق معادلة الجريان الخارجي (Out Flow) و التي تدرس تتبع و تغير الضغط خلال جريان المائع المنتج من قاع البئر و حتى السطح.



الشكل (1) ضياع الضغط أثناء جريان الموائع الطبقية من الطبقة إلى السطح.



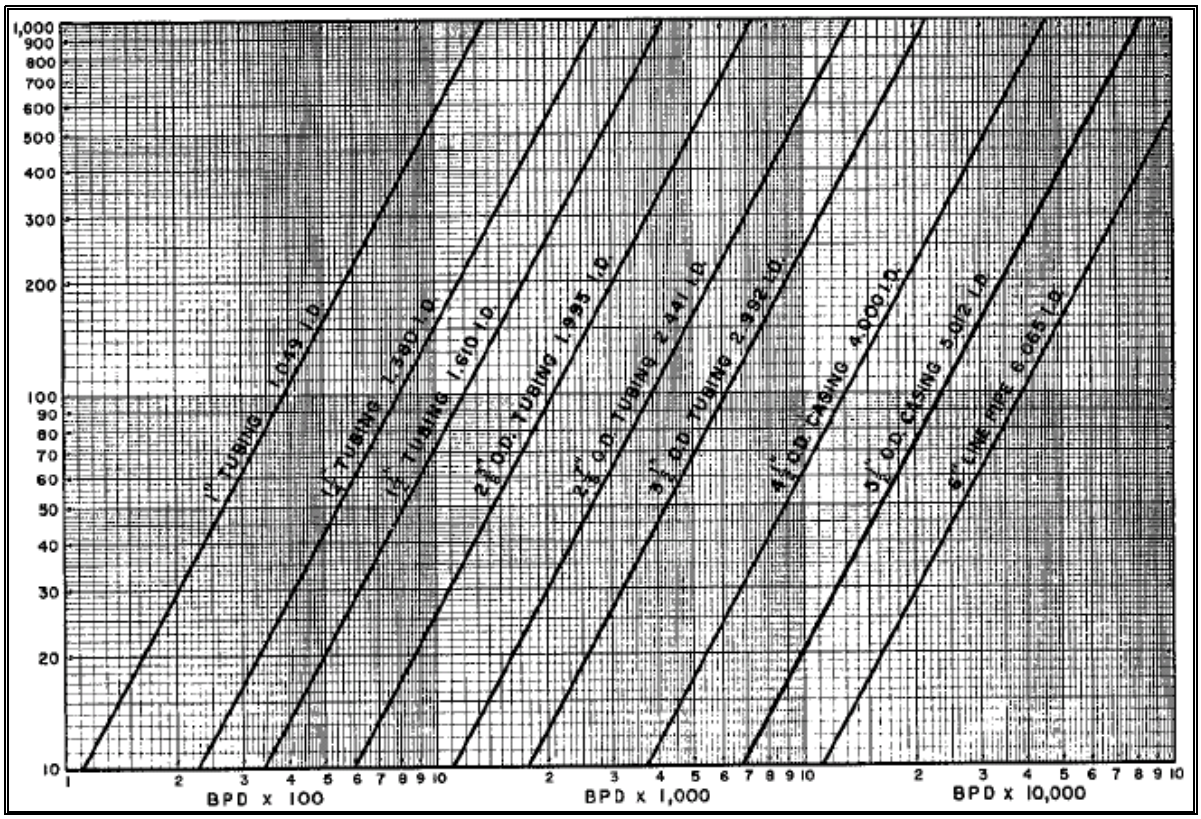
الشكل (2) تدرج الضغط عبر جريان الموائع الطبقية من عمق الطبقة إلى البئر

يبين الشكلان (1 و 2) مراحل انحدار الضغط من عمق الطبقة المنتجة و حتى السطح, حيث يمكن أن يقسم انحدار الضغط فيها إلى ثلاث مراحل أساسية , و هي:

1- انخفاض الضغط خلال مرور الموائع الطبقية من عمق الطبقة (غير الملوثة) حتى قاع البئر: و تمثل الجريان الداخلي للموائع الطبقية (Inflow), و يعبر عنها بمعادلة أدائية التدفق من المكمن إلى قاع البئر (IPR: Inflow Performance Relationship), و يعبر عنها بالعديد من المعادلات الرياضية المتوفرة و المعروفة , و أهمها معادلة دارسي (Darcy) و مؤشر الإنتاجية (PI: Productivity Index) و معادلة فوجل(Vogel). يكون انخفاض الضغط في هذه المرحلة على مرحلتين, الأولى من عمق الطبقة (غير الملوثة) و حتى حدود منطقة التأثير الرئيسية (الطبقة الملوثة المجاورة للبئر), و الثانية من حدود منطقة التأثير إلى قاع البئر, و تكون هذه المنطقة أكثر المناطق التي يتم فيها ضياعات في الضغط على طول مسار جريان المائع الطبقي, بسبب الضياعات الهدروديناميكية الكبيرة , و الناتجة عن التغير في النفوذية, و التي تعود لتلوث هذه المنطقة بسبب ظروف الحفر(نتيجة دخول فاقد الرشح بما يحمله من جزيئات صلبة) وظروف

الإنتاج (التي تتطلب تخفيض ضغط قاع البئر مما يؤدي لانجراف الرمال من الطبقة وسد المسامات) .

2-انخفاض الضغط عبر البئر, أي: بسبب قوى الاحتكاك الداخلي بين طبيقات السائل من جهة و بين السائل و الجدران الداخلية لمواسير الإنتاج ، و تشمل كل الضياعات بالضغط الناتجة عن احتكاك السائل بالجدران الداخلية لمواسير الإنتاج و عن التغير في مقطع الجريان و الذي ينتج عن وجود المعدات الجوفية و المقاعد الخاصة (Nipples) بالتجهيزات السلكية المختلفة (Wire-Line Operation), و من الممكن حساب ضياع الضغط بالاحتكاك من خلال حساب سرعة جريان السائل , ثم تحديد نوع الجريان من خلال قيمة عدد رينولدز (Reynolds) , ثم يحسب معامل الناقلية الهيدروديناميكية و الضياع بالاحتكاك, كما يمكن أن يحسب ضياع الضغط بالاحتكاك عبر مواسير الإنتاج من خلال مخططات خاصة (كما في الشكل (3)) و التي تربط بين قياس مواسير الإنتاج و الإنتاجية, أما ضياع الضغط الناتج عن تغير مقطع الجريان فيتم غالباً تقديره كنسبة مئوية من الضياع بالاحتكاك عبر مواسير الإنتاج , و يحدد غالباً بِـ (2%) من قيمة ضياع الضغط بالاحتكاك على طول مواسير الإنتاج.



الشكل (3) تحديد ضياع الضغط عبر مواسير الإنتاج

3–انخفاض الضغط خلال الخط السطحي (من رأس البئر و حتى الفواصل), و يتميز بوجود الفالات السطحية (Chokes), التي تعتبر أكثر المناطق التي تؤثر على تنظيم الضغط بما ينعكس على تنظيم إنتاج البئر, لذا عادة ما يكون انخفاض الضغط فيها كبيراً جداً.

و للحصول على أكمل فعالية لنظام الإنتاج لا بد من أن يتم تحليل أداء كل جزء من مكونات نظام الجريان السابقة (و التي يمكن التأثير فيها) ثم يتم تقييم المنظومة بالكامل.

3–1 معادلة أدائية التدفق الداخلي للبئر (IPR: Inflow Performance Relationship):

يعرف مؤشر الإنتاج بقدرة الطبقة على إعطاء الموائع الطبقية إلى قاع البئر مقابل انخفاض للضغط (انحدار الضغط) بمقدار واحدة الضغط.

و قد عمل الكثير من العلماء مثل (Brown et al) على منحنيات أدائية التدفق, وربط العلماء معادلات أدائية التدفق بظروف إنتاج البئر عند ضغط قاع معين (FBHP: Flow Bottom Hole Pressure) , مع الضغط السكوني لقاع البئر (SBHP), و تم تمثيل معادلات الجريان الداخلي بأكثر من علاقة, وذلك كما يلي:

- يفضل عند ضغط جريان أكبر من ضغط الإشباع استخدام مؤشر الإنتاجية (PI: Productivity Index) لتمثيل هذه العلاقة, و يمكن استنتاجه من علاقة دارسي (Darcy) , كما سنرى. و هذه العلاقة يمكن استخدامها عند التعامل مع مكامن ذات ضغوط عالية نسبياً (بحيث يكون ضغط الجريان لقاع البئر أكبر من ضغط الإشباع) مثل المكامن المستكشفة حديثاً أو التي تعمل بطاقة الدفع المائي النشيط (Active Water Drive) أو دفع القبعة الغازية (Gas Cap Drive) في المراحل الأولى من الاستثمار, أو عندما تحوي الموائع الطبقية على نسبة مهملة من الغاز.

- أما من أجل ضغط جريان أقل من ضغط الإشباع فيتم تمثيل معادلة أدائية التدفق بعلاقة فوجيل (Vogel) كما في مكامن النفط التي تعمل بطاقة الغاز المنحل (Dissolved Gas Drive), والمكامن التي تعمل بالطاقة المرنة (تمدد كل من الصخر و السائل المنتج).

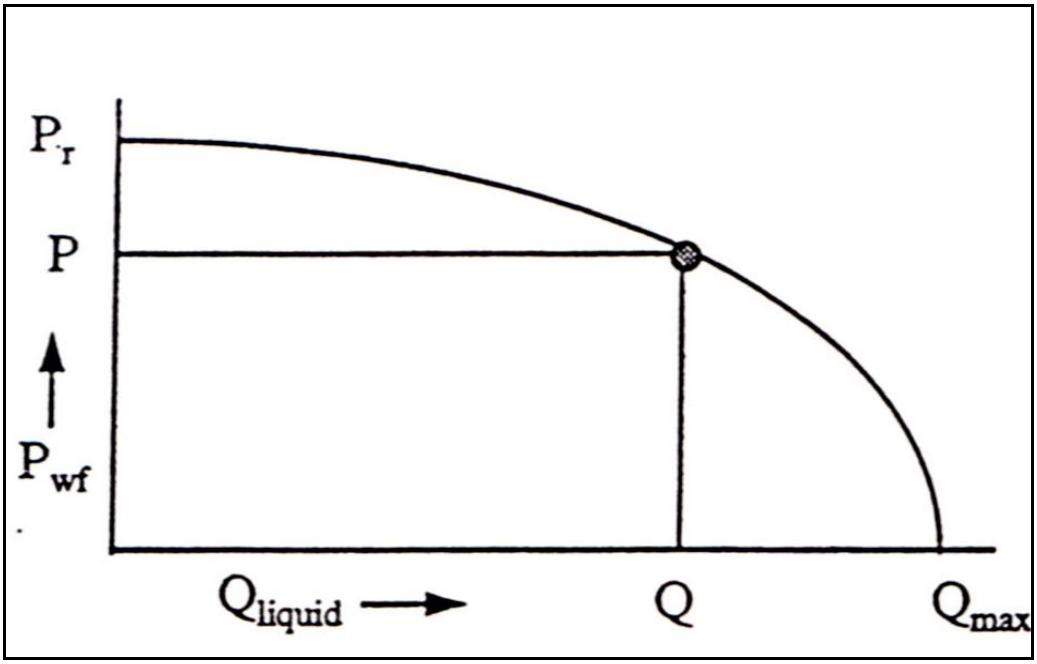
تتأثر أدائية التدفق_بشكل أساسي بالشروط الخزنية (الضغط الطبقي، النفوذية، و نوع السائل المنتج وتركيبه و مواصفاته الفيزيائية .. الخ), و يعتمد شكل منحني الـ IPR على أنظمة استثمار المكمن (ضغط المياه الطبقية– دفع القبعة لغازية...الخ ,وهذا المنحني يحدد العلاقة بين ضغط قاع البئر (Pwf) و كمية الإنتاج (Q).

عند دراسة الحالة العامة لمنحني أدائية البئر (IPR)، والممثلة المكمن ينتج بطاقة تمدد الغاز المنحل, وتمدد جملة الصخر و السائل تكون الاعتبارات الأساسية:

- النفط مشبع كلياً أو جزئياً بالغاز.
- تخرج فقاعات الغاز خارج النفط بمجرد انخفاض الضغط تحت ضغط الإشباع.
- يتم إنتاج النفط بسبب تمدد الغاز أو جملة الصخر والسائل و ذلك عند انخفاض الضغط ومن ثم ينتج كل من النفط والغاز.
- غالباً ما يكون معامل الإنتاجية (PI: Productivity index) قليل.

إن الشروط الأربعة السابقة هي الغالبة في مكامن النفط و الغاز الحالية.

و كما هو معروف يعبر عن معادلة أدائية التدفق بمعادلة فوجيل (Vogel), والتي تمثل بيانياً بالشكل (4) التالي:



الشكل(4) يبين التمثيل البياني لمعادلة أدائية التدفق (Vogel)

من خلال التمثيل البياني لمعادلة أدائية التدفق يلاحظ ما يلي:

أ- بمجرد انخفاض الضغط ينفصل المزيد من الغاز عن المزيج (سائل – غاز) و الذي بدوره يقوم برفع منتجات البئر مسافة معينة.

ب- بزيادة نسبة الغاز المنفصل عن النفط تزداد المقاومة (مقاومة الجريان) للمزيج ويقل مقدار النفط المنتج و ذلك بسبب زيادة النفوذية النسبية للغاز في المنطقة المجاورة للبئر و نقصانها بالنسبة للنفط.

ويعبر عن ذلك رياضياً بعلاقة فوجيل (VOGEL) التالية:

$$\frac{Q}{Q_{(max)}} = 1 - 0.2\left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}}\right) - 0.8\left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}}\right)^2$$

P_{wf} : الضغط الديناميكي لقاع البئر مقدراً بـ (Psi)

P_{ws}: الضغط الستاتيكي لقاع البئر مقدراً بـ (Psi)

Q :الإنتاجية الحالية من السوائل الطبقية عند الضغط P_{wf} لقاع البئر (BBL).

Q_{max} : الإنتاجية العظمى عندما يكون ضغط قاع البئر معدوماً ($P_{wf} = 0$)

تمكننا العلاقة السابقة من تحديد إنتاجية البئر عند ضغوط قاع مختلفة, كما تمكننا من تحديد الإنتاجية عند استخدام طرق الرفع الصناعي المختلفة و يمكن أن يعبر عن معادلة الجريان الداخلي باستخدام مؤشر أو معامل الإنتاجية (PI: Productivity Index) أو عندما تكون الضغوط أعلى من ضغط الإشباع حتى قاع البئر, و يعبر عنه رياضياً بالشكل التالي:

$$PI = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{Q_o + Q_w}{P_{ws} - P_{wf}}$$

حيث:

PI : معامل مؤشر الإنتاجية و يمثل الإنتاجية عند انخفاض الضغط بمقدار (1 Psi).

P_{wf}: الضغط الديناميكي لقاع البئر مقدراً بـ Psi.

P_{ws}: الضغط الستاتيكي لقاع البئر مقدراً بـ Psi .

و يتغير معامل الإنتاجية (PI) عادة بتغير ضغط قاع البئر.

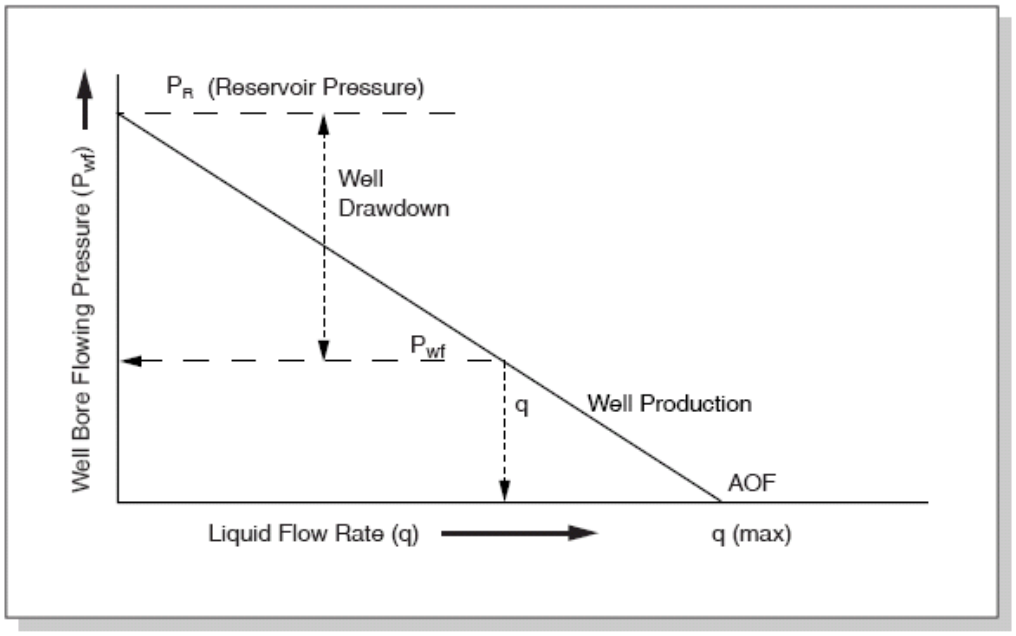
و يتأثر معامل الإنتاجية بما يلي:

1 – حجم الغاز المنحل في النفط في المنطقة المجاورة لقاع البئر و الذي بزيادته تقل النفوذية النسبية للنفط، و بالتالي تتناقص حركية النفط باتجاه قاع البئر.

2 – تغير نوع الجريان (بين جريان خطي إلى مضطرب في المنطقة المجاورة لقاع البئر).

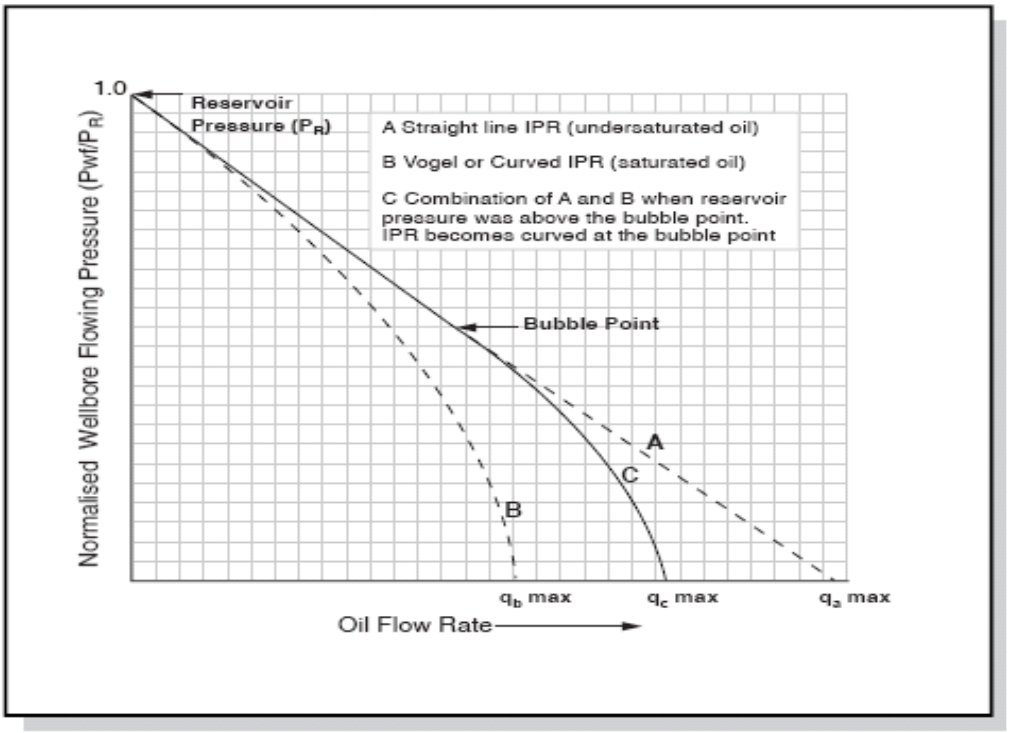
3– تغير معدل الإنتاج المتوافق مع التجهيزات السطحية (ضغط فواصل الغاز – طول خطوط الإنتاج السطحية – ..الخ

تكون معادلة أدائية التدفق عندما يعبر عنها باستخدام مؤشر الإنتاجية من الدرجة الأولى (خطية), كما في الشكل (5).



الشكل (5) التمثيل البياني لمؤشر الإنتاجية (PI: Productivity Index)

<u>ملاحظة:</u> تظهر عادة منحنيات أدائية التدفق بالشكل الخطي (علاقة مؤشر الإنتاجية) عند جريان طور وحيد (سائل) غير قابل للانضغاط, (أو عندما يكون الضغط أعلى من ضغط الإشباع), و بانخفاض الضغط لأقل من ضغط الإشباع تتحول المعادلة لتصبح من الدرجة الثانية (علاقة فوجيل), لذا يجب الانتباه إلى حدود استخدام هاتين المعادلتين, كما في الشكل (6).



الشكل (6) تتبع علاقة الجريان الداخلي

تظهر في الشكل (6) المعادلة الخطية في المرحلة الأولى عندما يكون الضغط أعلى من ضغط الإشباع, وتظهر معادلة فوجيل بمجرد بدء انفصال الغاز عن النفط

1-3-1 تأثير الظاهرة الجلدية (Skin Effect):

تعبر الظاهرة الجلدية (Skin Effect) عن تلوث المنطقة المجاورة للبئر خلال عمليات الحفر و الإنتاج, ففي مرحلة حفر الآبار و بسبب الضغط الزائد لعمود سائل الحفر عن ضغط الطبقة, تتلوث هذه المنطقة بسبب دخول فاقد الرشح إلى الطبقة و ما يحمله من مواد تؤدي إلى انسداد بعض المسامات و نقصان النفوذية, أما في مرحلة الإنتاج فيتطلب الإنتاج أن يكون ضغط قاع البئر الديناميكي أقل من الضغط الستاتيكي (التأثير), و هذا ما سيؤدي إلى انجراف بعض الرمال مع السائل المنتج باتجاه البئر و تجمعها حول القاع في المنطقة المجاورة للبئر مؤدية إلى انسداد المسامات و نقصان النفوذية, و تؤثر الظاهرة الجلدية على منحني أدائية التدفق و انخفاض الضغط في المنطقة المجاورة للبئر, أثناء عبور النفط من الطبقة إلى قاع البئر, و من الممكن تحديد معامل الظاهرة الجلدية من خلال المعادلة التالية:

$$S = \left(\frac{K}{K1} - 1 \right) . \ln \frac{R_e}{R_w}$$

K1 : نفوذية المنطقة المجاورة للبئر (الملوثة).

K : نفوذية الطبقة الأولية.

R_e : نصف قطر منطقة التأثير.

r_w : نصف قطر البئر.

- S=0 تكون K=K1 و لا يوجد تلوث في البئر.
- S>0 تكون K>K1 في هذه الحالة يوجد تلوث في المنطقة المجاورة للبئر .
- S<0 تكون K<K1 و تشير على تحسن في النفوذية في المنطقة المجاورة للبئر.

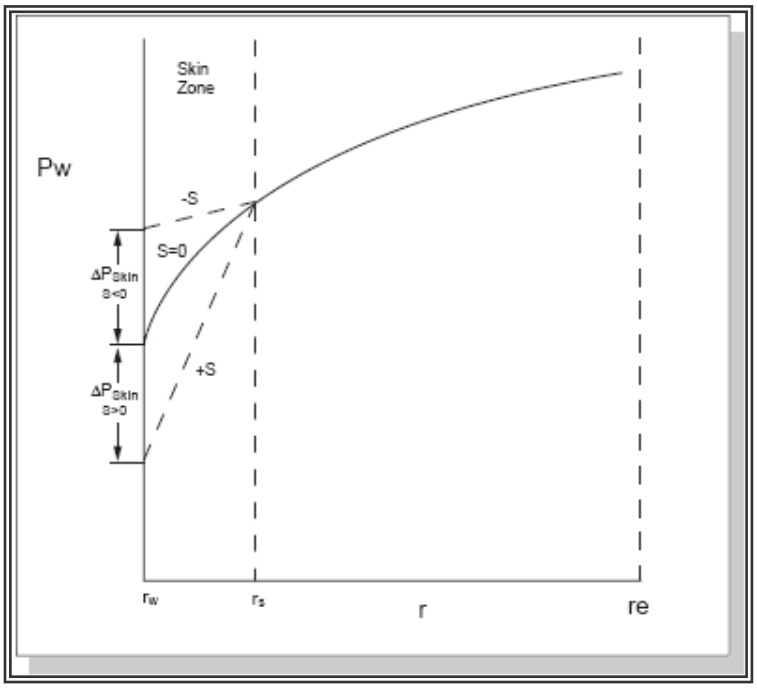
تؤثر الظاهرة الجلدية على إنتاج البئر , ما يؤدي إلى نقصان النفوذية و زيادة المقاومة الهيدروليكية لحركة السوائل باتجاه البئر و نقصان الإنتاجية, بسبب الحاجة إلى فرق ضغط تشغيلي أكبر للحصول على الإنتاجية المطلوبة, و تتغير معادلة الجريان (Darcy) لتصبح كما يأتي:

$$\left[P_e - P_{wf_{actual}}\right] = 141.2 \frac{q_s \mu B}{kh}\left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S\right]$$

و عند دراسة انخفاض الضغط في المنطقة المجاورة للبئر يتبين لنا أهمية تقييم الظاهرة الجلدية التي تظهر أكبر منطقة انخفاض و ضياع الضغط مع العلم أن نصف قطرها قد لا يتجاوز (1 m), كما هو موضح في الشكل (7).

و تعتبر المنطقة المجاورة للبئر من أهم المناطق التي تنجز لأجلها أعمال إصلاح الآبار.

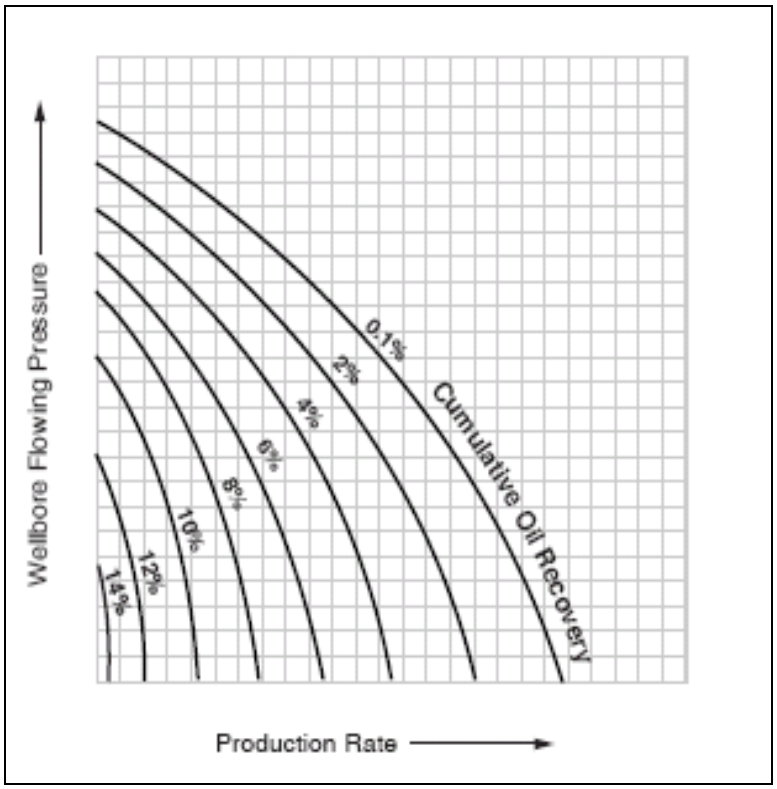
ΔP skin: هو فاقد الضغط اللازم للتغلب على الظاهرة الجلدية (السطحية) و الذي يجب إضافته إلى (Pe–Pws) للحصول على إنتاجية معينة.



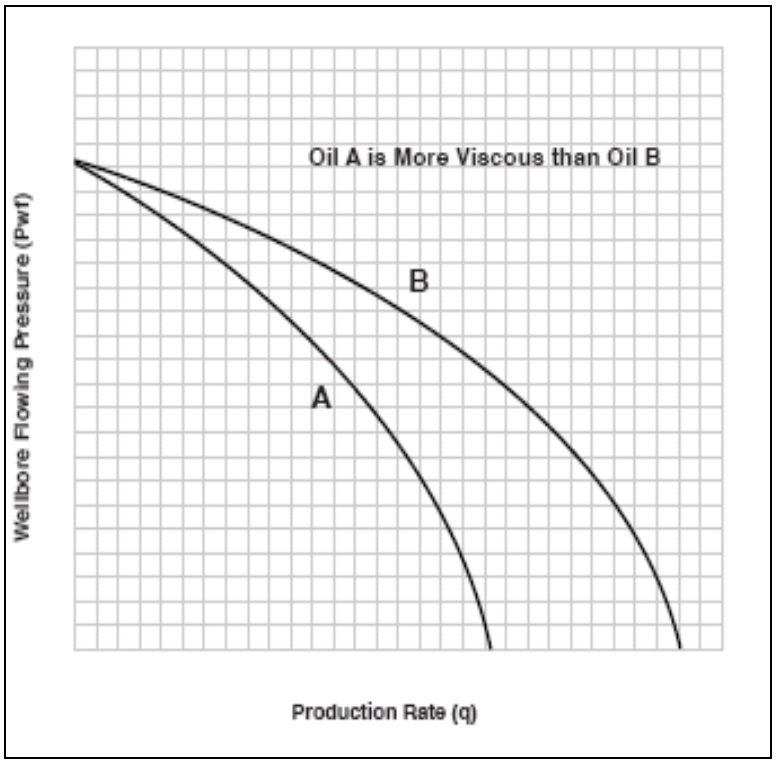
الشكل (7) انحدار الضغط من الطبقة إلى قاع البئر.

1–3–2 نماذج استخدام معادلة أدائية التدفق:

تعبر معادلة أدائية التدفق عن الاستطاعة الطبقية و مقدرة الطبقة في تعويض الموائع الطبقية باتجاه البئر, و مع زيادة الاستخلاص (الإنتاج) تقل مقدرة الطبقة على الإنتاج, كما يظهر في الشكل (A–8), كذلك تقل اللزوجة العالية للموائع الطبقية من قدرة الطبقة على الإنتاج, كما في الشكل (B–8).


Wellbore Flowing Pressure
0.1%
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
Cumulative Oil Recovery
Production Rate

(8-A)


Oil A is More Viscous than Oil B
B
A
Wellbore Flowing Pressure (Pwf)
Production Rate (q)

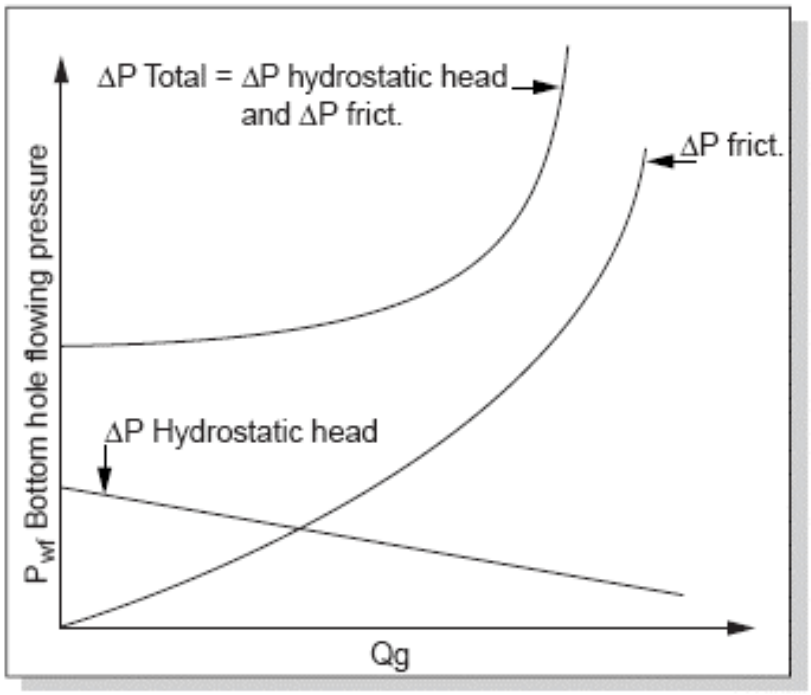
(8-B)

4-1 معادلة الجريان الخارجي (Out Flow):

يعرف الجريان الخارجي بأنه الجريان من قاع البئر وحتى المعدات السطحية (فواصل- أنابيب نقل النفط السطحية) عبر مواسير الإنتاج و يتأثر بما يلي:

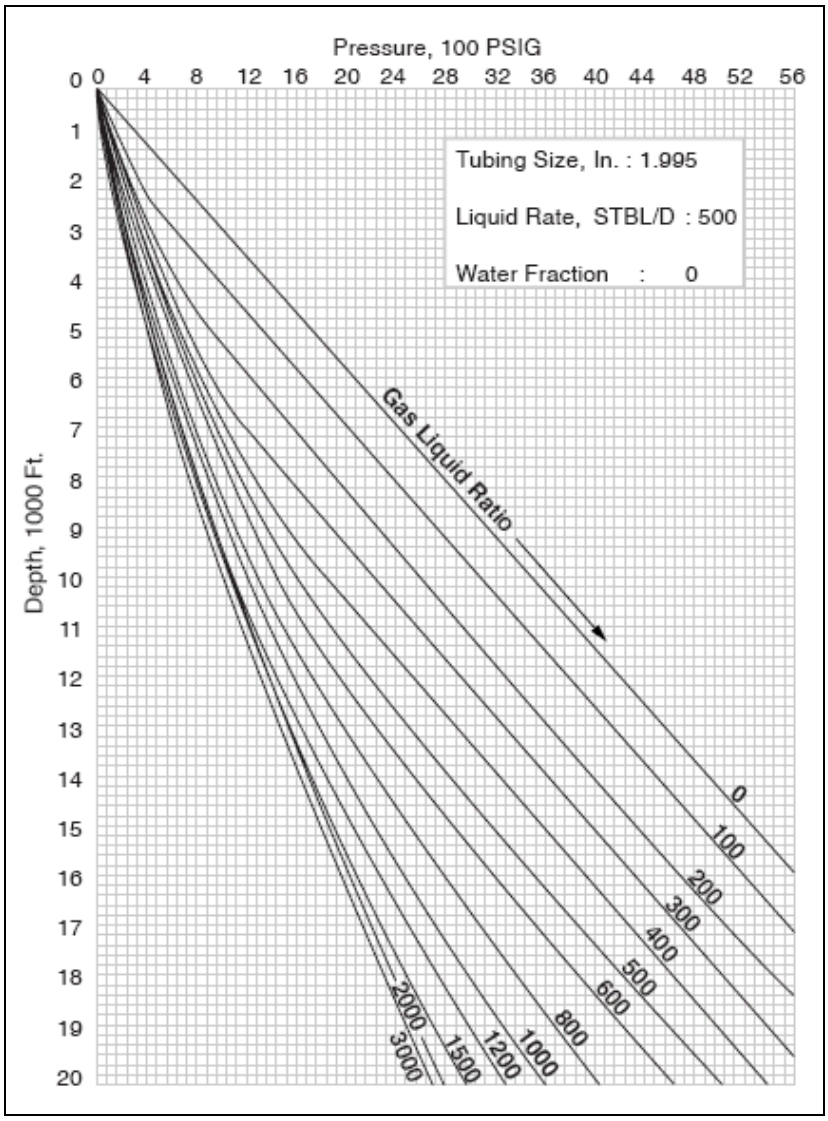
- مواصفات تشكيلة الإنتاج و التي تضم مواسير الإنتاج و تجهيزاتها (الطول – القطر الداخلي-خشونة سطح الجريان)
- ضغط رأس البئر (متغلباً على ضغط الفالة و ضغط الفاصل و الضغط اللازم لوصول المائع إلى الفاصل).
- نوع السائل المنتج وتركيبه و مواصفاته الفيزيائية.

و يعبر عن معادلة الجريان الخارجي بيانياً بالشكل (9) التالي :



الشكل (9) معادلة الجريان الخارجي أو المنحني المميز لعمل مواسير الإنتاج

تستخدم معادلات انخفاض الضغط عبر مواسير الإنتاج للتعبير عن معادلة الجريان الخارجي, و التي تقوم على أساس تتبع الضغط من رأس البئر و حتى قاع البئر, و من أجل إنجاز المخططات البيانية – لتدرج الضغط عبر مواسير الإنتاج – من الضروري تتبع الكثافة الوسطية للسائل المنتج و من ثم يحسب تدرج الضغط عبر مواسير الإنتاج بالعلاقة مع العمق, الشكل (10).

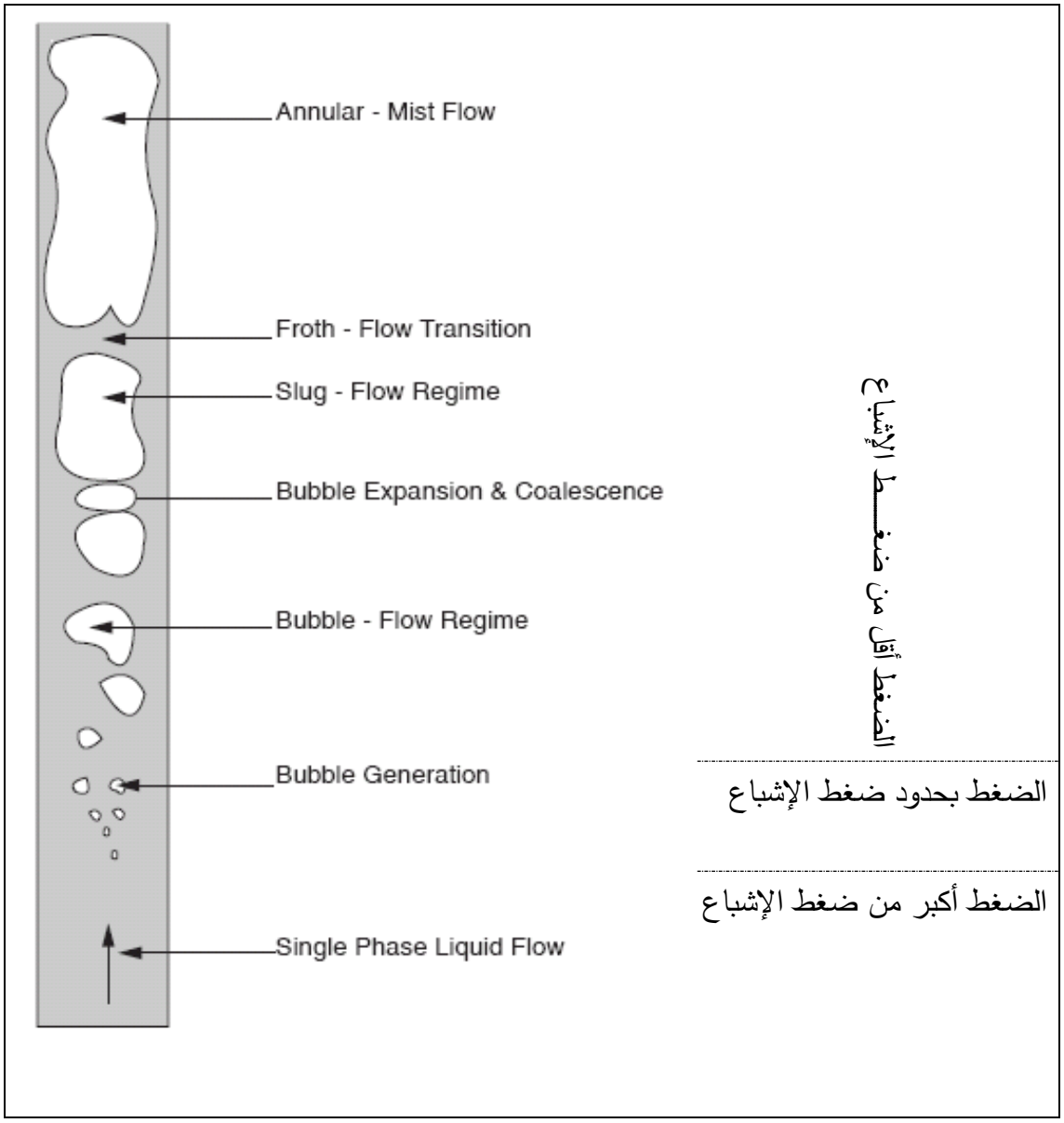


الشكل (10) منحنيات تدرج الضغط في مواسير الإنتاج

وتتغير أشكال المنحنيات الناتجة لعدة عوامل مثل أقطار مواسير الإنتاج المستخدمة و تركيب السائل المنتج , و مقدار الضغط و نوع المائع (وحيد طور سائل– ثنائي طور سائل مع غاز....), لذا من الضروري تتبع حالة المائع في مواسير الإنتاج, و معرفة المقدار المنفصل من الغاز عند انخفاض الضغط عن ضغط الإشباع– عند أعماق مختلفة من مواسير الإنتاج – لأقل من ضغط الإشباع, حيث يتغير الشكل الطوري للمزيج المنتج, كما يلي:

- طور وحيد سائل: يظهر عندما يكون الضغط أعلى من ضغط الإشباع.
- فقاعي (رغوي) (Bubbly): تتحرك هنا فقاعات الغاز المبعثرة ضمن السائل.

- كتلي (coalescence): تبدأ الفقاعات بالتجمع و تبقى بشكل فقاعات مبعثرة و يتبعها كتل من السائل, و هذا التركيب غير ثابت.
- متبعثر :تكون الحالتان الغازية و السائلة موزعتان ببعضهما, لا تكون هذه الحالة مستمرة.
- حلقي (Annular) : يجري فيه السائل شكل حلقات ملاصقة لجدار مواسير الإنتاج الداخلية, و يجري الغاز ضمنها.
- ضبابي (Mist): يكون السائل بشكل نقاط ناعمة ضمن الكتلة الغازية التي تشكل الحالة الأساسية المنتجة.



الشكل (11) أطوار المائع الطبقي المنتج في مواسير الإنتاج بالعلاقة مع الضغط

1-5 مواضع استخدام تحاليل (Nodal):

1- عند قاع البئر , و ذلك من أجل تحليل الأداء (أدائية التدفق الداخلي IPR).

2- عند رأس البئر لتحديد ضغط رأس البئر الأنسب لتشغيل البئر وصولاً إلى الإنتاجية المثلى.

3- ضمن التشكيلة الإنتاجية, لتحديد قياس مواسير التغليف, و تأثيرها على الإنتاجية و الجريان , وصولاً إلى تحديد الإنتاجية المثلى للبئر.

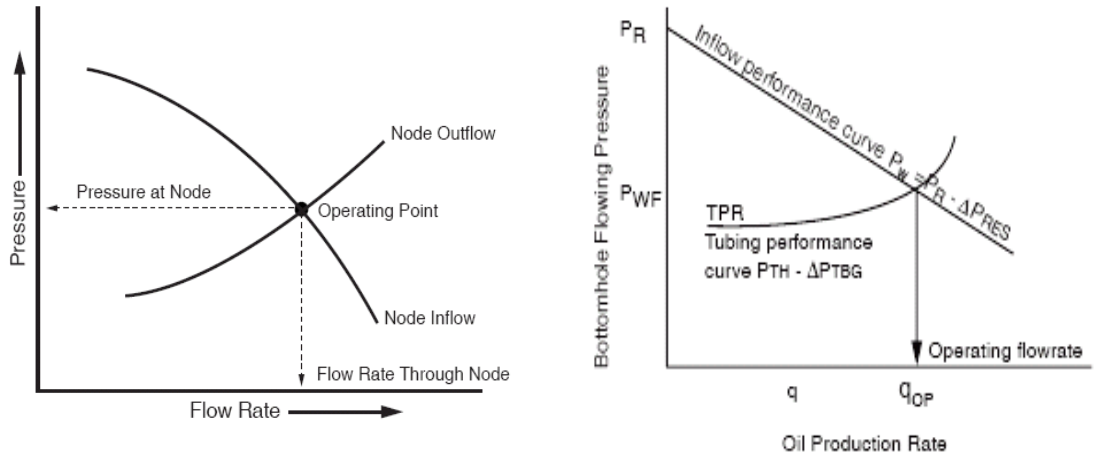
<u>النماذج الأساسية لاستخدام تحاليل نودال (Nodal):</u>

1-5-1 تحديد الإنتاجية المثالية لبئر منتجة من طبقة ما

كان و لازال تحديد الإنتاجية المثالية لبئر منتجة من طبقة ما هو التوظيف الرئيسي هذه التحاليل، و يتم تحديد الإنتاجية المثالية للبئر عن طريق الحل المشترك لمعادلتي الجريان الداخلي (IPR) و الجريان الخارجي (Out Flow).

إن الحل المشترك يعبر عن توافق عمل الطبقة مع عمل مواسير الإنتاج (عند ضغط معين لرأس البئر) , و لسائل بمواصفات معينة.

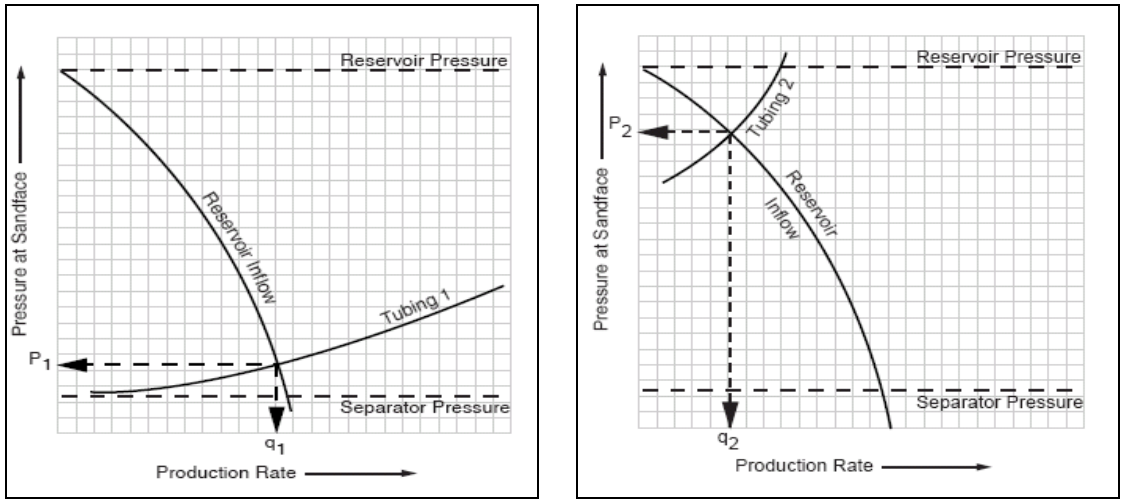
لذا لا بد من رسم معادلتي الجريان الداخلي و الخارجي و تحديد نقطة التقاطع التي تمثل الإنتاجية المثلى و ضغط قاع البئر الديناميكي المثالي لتحقيق هذه الإنتاجية, و التي يتم تحقيقها عملياً من خلال التحكم بقطر الفالة السطحية مما يؤدي لتطبيق ضغط على رأس البئر وفق هذا القطر. يظهر الشكل (12) الحل المشترك لمعادلتي الجريان و الإنتاجية المثالية الموافقة.



الشكل (12) تحديد الإنتاجية المثالية باستخدام الحل المشترك لمعادلتي الجريان

1-5-2 تحديد القطر المثالي لمواسير الإنتاج لتشغيل البئر و الحصول على الإنتاجية المثلى:

يؤثر قطر مواسير الإنتاج المستخدمة في الآبار على الإنتاجية المثالية , و ذلك من خلال تغير معادلة الجريان الخارجي , فيزيد ضياع الضغط بالاحتكاك مع نقصان القطر الداخلي لمواسير الإنتاج, و قد أدى – فقط- تغيير قياس مواسير الإنتاج في كثير من آبار النفط و الغاز الأمريكية إلى زيادة الإنتاج من هذه الآبار دون أن يتم تغيير أي من المعايير الأخرى, و يظهر الشكل (13) تأثر الإنتاجية المثالية لبئر ما بالعلاقة مع قياس مواسير الإنتاج المستخدمة, حيث يظهر و بوضوح نقصان الإنتاجية المثالية في الشكل (13-B) لدى استخدام مواسير إنتاج أصغر.



13-A 13-B

الشكل (13) تأثير قياس مواسير الإنتاج على الإنتاجية المثالية

1-5-3 تحديد فتحة الفالة السطحية المثالي لتشغيل البئر:

الفالة السطحية (The Variable Flow Choke Valve- الخانق): و هي عبارة عن صمام أبري (Needle Valve) تستخدم للتحكم بمعدل الجريان من خلال معايرة فتحة الجريان بأجزاء أو تدريجات (1/64 inch) تدعى بـ (Bean), و تصنع الفالة السطحية من فولاذ ذو نوعية ممتازة لتحمل جريان التيار المتدفق ذي السرعة العالية بما فيه من منتجات أكالة تعبر عبر القطر الصغير للفالة.

وفي عمليات النفط والغاز، يُشير الخانق أو الفالة السطحية – (Choke) إلى جهاز للتحكم في التدفق يُستخدم لتنظيم معدل الإنتاج من البئر

وهو مُكوّن أساسي في نظام الإنتاج، إذ يُساعد على إدارة تدفق سوائل المكمن، مثل النفط والغاز الطبيعي والماء، لتحسين الإنتاج وضمان التشغيل الآمن .

يُركّب الخانق عادةً عند رأس البئر، حيث يتحكم في تدفق السوائل عند خروجها من البئر.

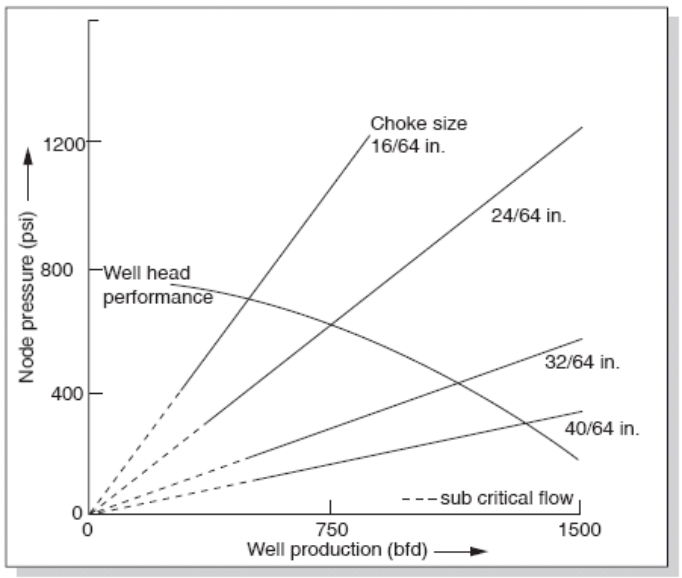
وهو مُصمّم لإنشاء انخفاض في الضغط عبر الخانق، مما يُقيّد التدفق ويُتحكّم في معدل الإنتاج من خلال ضبط الفالة بهدف تشكيل الضغط المعاكس المتوافق مع الإنتاجية المطلوب تحقيقها.

و بالتالي يتمكن المُشغّلون من إدارة ضغط ومعدل تدفق السوائل المُنتجة، مما يضمن تشغيل البئر بكفاءة وضمن حدود التشغيل الآمنة .

تأثير فتحة الفالة السطحية المثالي لتشغيل البئر:

يؤثر قطر الفالة لسطحية (Choke) على الإنتاجية المثلية (عند وجود تشكيلة إنتاجية بئرية معينة), و تعتبر الفالة السطحية الأداة التي تنظم عمل الآبار للحصول على الإنتاجية المثالية, و قد يؤدي عدم وجود الفالات السطحية أو تشغيل الآبار الخاطئ من خلال تطبيق ضغط غير مناسب عند رأس البئر (من خلال الفالات السطحية) إلى قتل الآبار, أو إلى نقصان حاد و كبير في إنتاجية الآبار و خلال وقت قصير.

يظهر الشكل (14) تأثير قياس فتحة الفالة السطحية على تغير الإنتاجية المثالية لبئر نفطية.



الشكل (14) تأثير قياس فتحة الفالة السطحية على تغير الإنتاجية المثالية لبئر نفطية

و عند يتم رسم علاقة الجريان الخارجي بالعلاقة مع الضغط الخارج عن البئر (عند بداية خط الإنتاج Flowline) بالعلاقة مع مقدار فتحة الفالة من العلاقة:

$$P_u = \frac{b * Q_L * R^c}{D^a_{64}}$$

Pu : الضغط عند بداية خط الإنتاج (Upstream Pressure - Psig).

Q_L : الإنتاجية (Stb/d).

D_{64} : قطر (فتحة) الفالة السطحية (جزء من 64 من الإنش).

R : نسبة الغاز إلى السائل (GLR- Scf/STB). أما الثوابت (a,b & c) فهي تمثل بالجدول التالي

الجدول (1) الثوابت في معادلات حساب الضغط الناتج عن الفالة السطحية

Correlation	a	b	c
Ros	2.00	17.40	0.500
Gilbert	1.89	10.00	0.546
Achong	1.88	3.82	0.650
Ausseens	1.97	3.86	0.680
Baxendell	1.93	9.56	0.546

و هناك نوعان رئيسيان من الخانقات شائعا الاستخدام في عمليات النفط والغاز

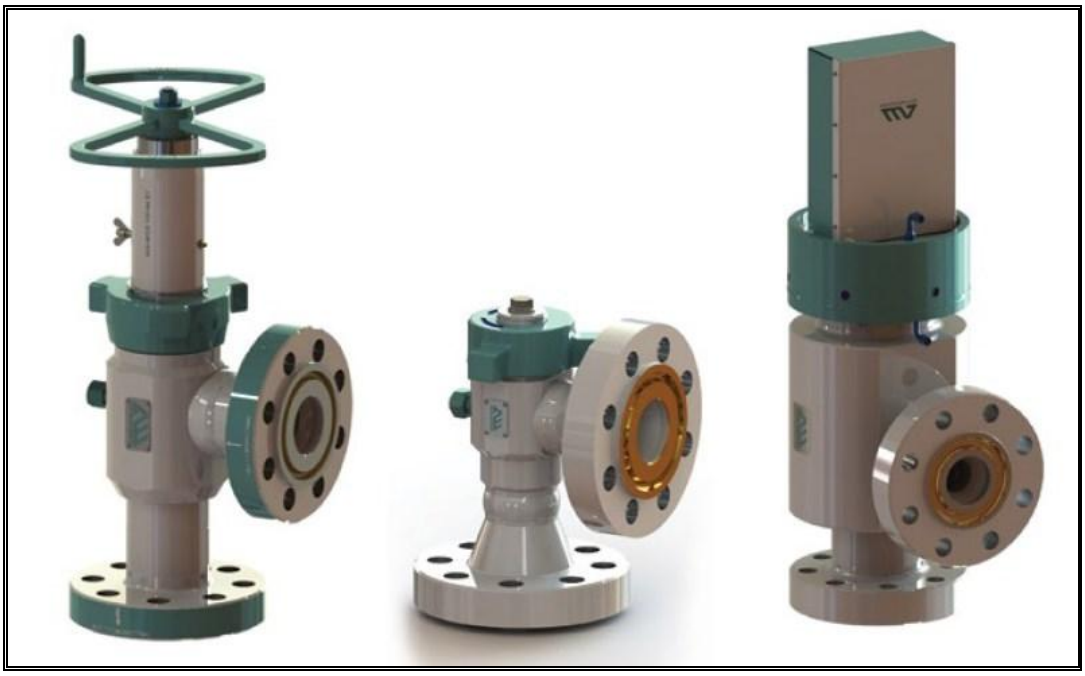
- الخانق الثابت (الفالة الثابتة): يتميز الخانق الثابت بحجم فتحة أو فتحة مُحدّدة مُسبقًا، مما يعني أن سعة تدفقه ثابتة ولا يُمكن تعديلها آنيًا .وهو مُناسب للآبار ذات معدلات الإنتاج المُستقرة نسبيًا وخصائص السوائل المنتجة.
- الخانق القابل للتعديل(الفالة المتغيرة): يسمح الخانق القابل للتعديل، كما يوحي اسمه، للمشغلين بتغيير حجم فتحة الفوهة، مما يُغيّر معدل التدفق والضغط كما يوفر مرونة أكبر، ويُستخدم في الآبار التي تتقلب فيها معدلات الإنتاج أو التي تحتاج إلى تحسين منتظم، و يُعد حجم الخانق أمرًا بالغ الأهمية لإدارة إنتاجية البئر، فإذا كان حجم الخانق صغيرًا جدًا، فقد يؤدي ذلك إلى تشكل ضغط عكسي على البئر، مما يُقلل معدل التدفق، مما قد يُؤدي إلى ترك موارد قيّمة دون استغلال و من ناحية أخرى، إذا كان حجم

الخانق كبيرًا جدًا، فقد يُسبب ظروفًا غير مرغوب فيها، مثل "الاندفاع" أو تدفق غير مُتحكم فيه لسوائل المكمن، مما قد يكون خطيرًا ويؤدي إلى مخاطر على السلامة، وغالبًا ما يتم التحكم في الخانق– الفالة يدويًا من قِبل مشغلي الحقل، ولكن بعض أنظمة الإنتاج الحديثة تستخدم أيضًا أنظمة تحكم آلية في الخانق.

يمكن مراقبة هذه الأنظمة وتعديلها عن بُعد لتحسين الإنتاج استنادًا إلى بيانات آنية، مما يُعزز الكفاءة والسلامة.

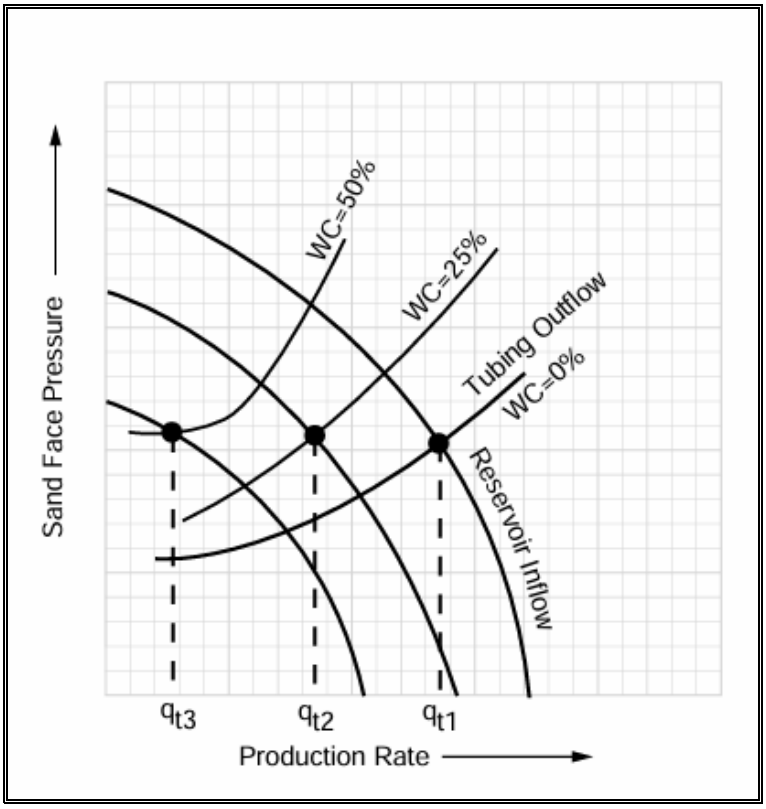
وبالإضافة إلى تنظيم معدل التدفق، تُستخدم الخانقات أيضًا لأغراض أخرى في عمليات النفط والغاز .يمكن استخدامها لما يلي :

- منع إنتاج و تراكم الرمال من الآبار و بالتالي حماية المعدات اللاحقة من أي ضرر محتمل.
- وكذلك للتحكم في معدل الجريان لتفادي تشكل مخاريط المياه (water or gas coning).
- إدارة نسبة الغاز إلى النفط في البئر، مما يساعد على استقرار التدفق والحفاظ على الخليط المناسب من الهيدروكربونات لضمان كفاءة الفصل والمعالجة.
- تضمن تشغيل الآبار بأمان وكفاءة، وبما يتوافق مع الظروف البيئية. ومن خلال التحكم الفعال في معدل التدفق والضغط، تساعد الخانقات على تحسين الإنتاج، وإطالة عمر البئر، و زيادة استخلاص الموائع الطبقية.



الشكل (15) أنواع الفالات السطحية (فالة بتحكم آلي– فالة(خانق) إيجابية ثابتة – فالة متغيرة المقطع)

1-5-4 تأثير نسبة الماء المنتج (الداخل) على الإنتاجية المثالية:



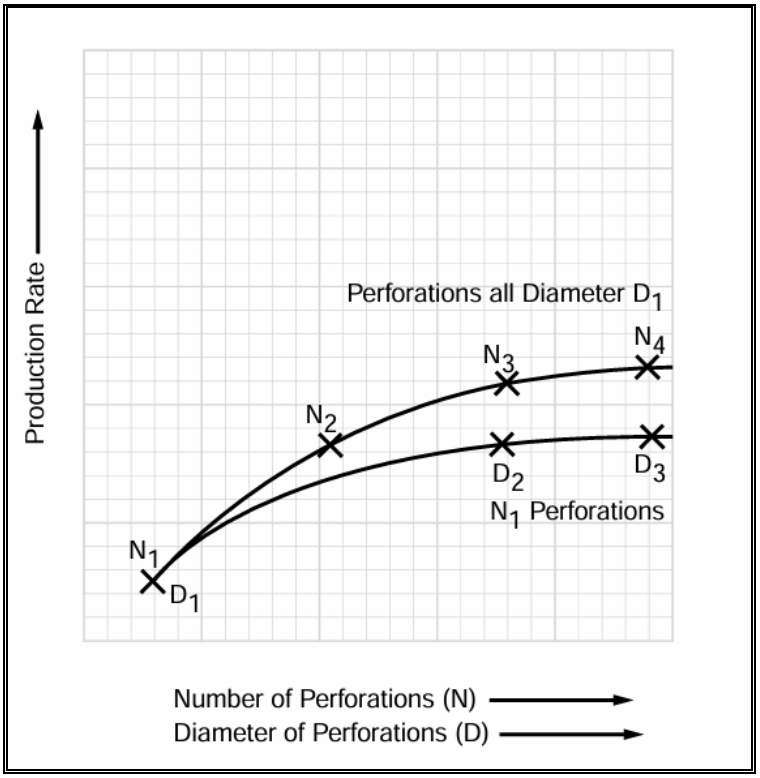
الشكل (16) تأثير نسبة الماء المنتج على الإنتاجية المثالية

يمكن توضيح تناقص إنتاجية الابار بزيادة نسبة المياه الطبقية المرافقة المنتجة بسبب زيادة ضغط عمود الماء العكسي و المؤثر على قاع البئر مما يعاكس و يعرقل العملية الإنتاجية، و يوضح الشكل (16) ذلك.

1-5-5 تأثير عدد الثقوب (كثافة التثقيب) و قطرها على الإنتاجية المثالية:

كذلك فمن العوامل التي يتحكم فيها مهندس الإنتاج لتحقيق أفضل إنتاجية هو عدد الثقوب قطرها . فيؤثر كل من عدد الثقوب قطرها على الإنتاجية و بشكل مباشر و تزداد الإنتاجية المثالية بزيادة عدد الثقوب و بزيادة أقطارها و يمكن أن نعزو ذلك إلى انخفاض في فقدان الضغط الاحتكاكي في القنوات المتشكلة من هذه الثقوب.

علمً أنه ستزداد تكلفة عملية التثقيب مع زيادة عدد وقطر الثقوب – و يكون هنا المطلوب إيجاد الحل الاقتصادي الأمثل – للبئر. الشكل (17).

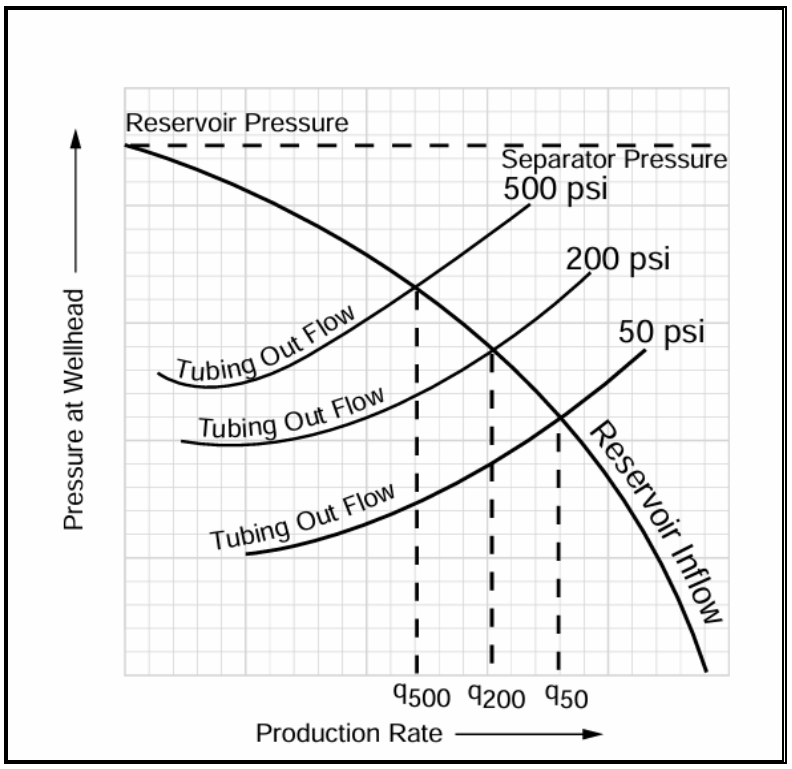


الشكل (17) تأثير قطر و عدد الثقوب على الإنتاجية المثالية

1-5-6 تأثير ضغط رأس البئر على الإنتاجية المثالية:

ينتج ضغط رأس البئر عن كل من ضغط الفالة والذي يتم ضبطه للحصول على الإنتاجية المثالية وبما يتوافق لعمل ضغط الفاصل السطحي.

وغالبًا ما يكون ضغط الفاصل العامل الرئيسي في خسائر الضغط السطحي. فهو يُمارس ضغطًا عكسيًا على إنتاج البئر، مما يحدّ من إجمالي انخفاض الضغط المتاح لتدفق السوائل من الطبقة المنتجة ونقلها إلى السطح. ويوضح الشكل (18) هذا التأثير، حيث تم اختيار رأس البئر كنقطة يُجرى تحليل الضغوط والإنتاجية حولها. وغالبًا ما يكون خفض ضغط الفاصل وسيلة فعّالة لزيادة إنتاج البئر، وبالعكس يكون فاصل النفط – في بعض الأحيان– من الأسباب المؤدية لقتل الآبار عندما يكون ضغط تشغيل الفاصل والضغط الضائع في خط الجريان السطحي أكبر من اللازم.



الشكل (18) تأثير ضغط رأس البئر (الضغط العكسي) على الإنتاجية المثالية

الفصل الثاني

اختبار الآبار النفطية المنتجة

مقدمة: اختبار الآبار النفطية المنتجة هو عملية تقييم لأداء البئر من خلال قياسات الإنتاج والضغط لتحديد خصائص المكمن والطبقات الجيولوجية بغرض تحديد الإنتاجية المثالية لتشغيل الآبار النفطية و بذلك تمثل الخطوة الرئيسية و الأساسية لإجراء الدراسات الإنتاجية (و منها تحاليل نودال Nodal Analysis) .

تشمل هذه الاختبارات إجراءات مثل اختبار تصاعد الضغط (build-up test) واختبار تنازل الضغط (drawdown test) ، بالإضافة إلى تقييمات أخرى تساعد في تحديد مؤشرات مثل النفاذية، وضغط المكمن، ودرجة تضرر الطبقة، وتحديد مشاكل مثل تغلغل المياه أو الغاز .

أهداف اختبارات الآبار المنتجة:

- **قياس معدلات التدفق :**تحديد كميات النفط والغاز التي ينتجها البئر.
- **تقييم أداء المكمن :** فهم سلوك المكمن والتنبؤ بقدرته الإنتاجية.
- **تحديد خصائص الطبقات :** حساب نفاذية الطبقة، حجم المسام، وخصائصها الهيدروليكية.
- **تقييم حالة البئر :** تحديد درجة تضرر الطبقة (skin factor) وتقييم فعالية عمليات التحفيز أو الإنعاش السابقة.
- **اكتشاف مشاكل الإنتاج :** تحديد مشاكل مثل تغلغل المياه أو الغاز في المكمن.
- **التخطيط للإنتاج :** توفير البيانات اللازمة لاتخاذ قرارات حول خطط تطوير البئر والإنتاج المستقبلي .

2-1 أنواع اختبارات الآبار الرئيسية:

- **اختبار تصاعد الضغط:(Build-up test)**
  - يتم الإنتاج من البئر لفترة من الزمن بمعدل تدفق ثابت.
  - بعد ذلك، يتم إغلاق البئر لتسجيل استجابة الضغط مع مرور الزمن حتى تصل قيمة الضغط المسجل إلى حدود المكمن (قيمة الضغط الطبقي).

- **اختبار تنازل الضغط(Drawdown test):**
  - يتم فتح بئر مغلق في البداية بغرض الإنتاج.
  - يتم تسجيل استجابة الضغط ومعدل التدفق مع مرور الزمن.
- **اختبار التداخل(Interference test):**
  - يُجرى على أكثر من بئر في نفس الوقت.
  - بئر يتم قياس معدل التدفق فيه (من البئر الحقيقي)، بينما يُقاس الضغط في الآبار الأخرى المحيطة به (آبار المراقبة).

تجرى هذه الاختبارات من خلال مقاييس تحديد تدرج ضغوط الآبار وحرارة الآبار وصولاً إلى أقرب نقطة لقاع البئر و ذلك من خلال جهاز مقياس الذاكرة (Memory Gauge) بينما يتم قياس إنتاجية البئر (للأطوار الثلاثة) بواسطة فاصل اختبار الآبار (MTU: Mobilized Testing Separator – PTS: Portable Testing Separator)

2-2 مقياس الذاكرة (Memory Gauge)

الوظيفة: و يتم من خلالها تسجيل بيانات الضغط ودرجة الحرارة في قاع البئر بتردد (فاصل زمني قليل) محدد لتحليلها لاحقًا.

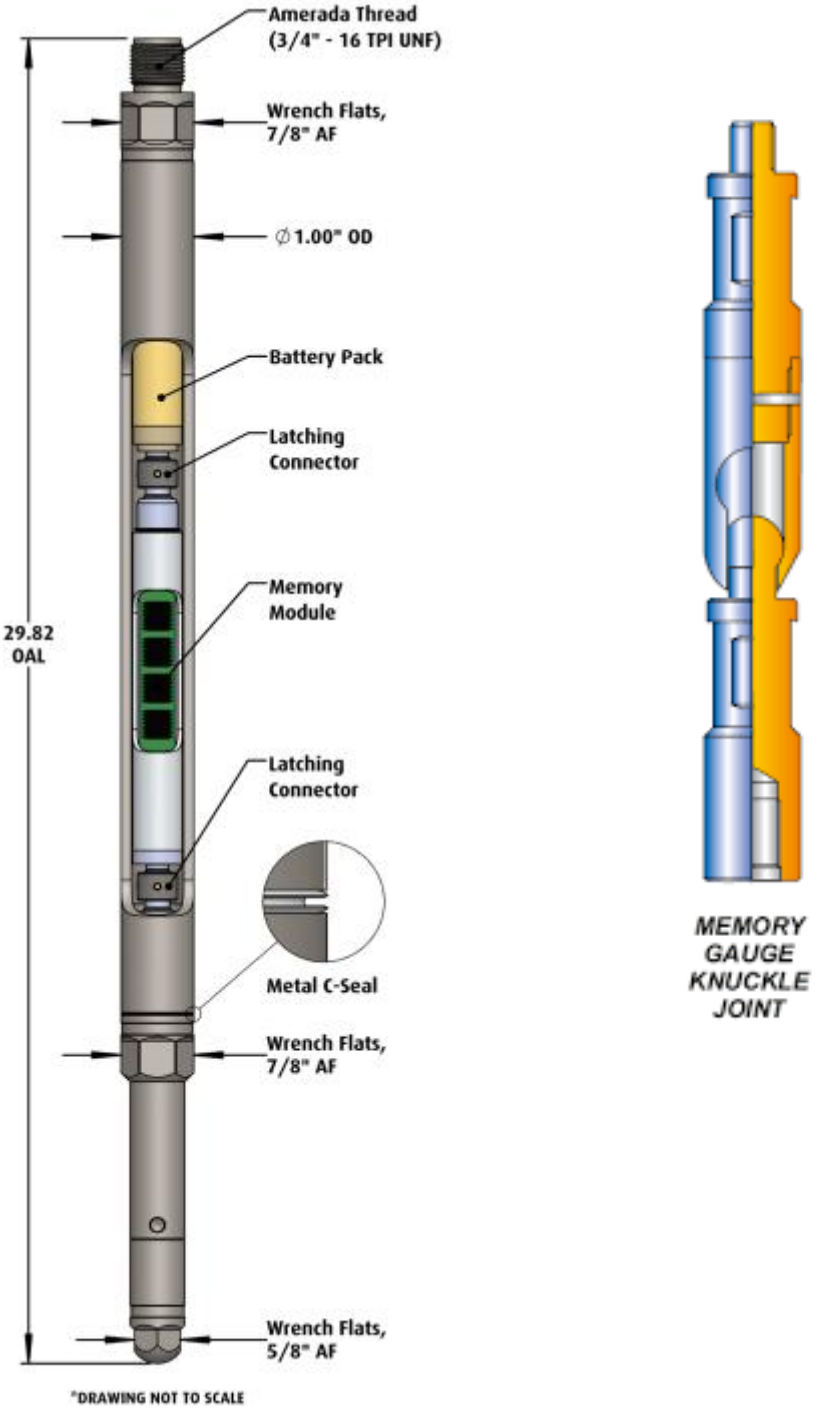
الاستخدام: و هي تستخدم عادةً بالقرب من قاع البئر خلال فترة الاختبار (التدفق والإغلاق) للحصول على تمثيل دقيق لأداء البئر وسلوك السوائل، و بالتالي يتم تسجيل كل من:

1- ضغط قاع البئر السكوني (SBHP: Static Bottom Hole Pressure) وذلك عند إغلاق البئر.

2- ضغط قاع البئر الديناميكي (FBHP: Flow Bottom Hole Pressure) و المسجل عند قاع البئر عند إنتاج البئر و هذا ما يترافق مع تشغيل فاصل الاختبار ثلاثي الطور لتحديد إنتاجية البئر و من الأطوار الثلاثة.

3- تدرج الضغط (Pressure Gradient).

4- التدرج الحراري (Temperature Gradient) و درجة حرارة قاع البئر (Bottom Hole Temperature).



الشكل (18) أجزاء جهاز الذاكرة (Memory Gauge) و جهاز إنزالها في البئر

يوفر جهاز الذاكرة تسجيل بيانات الضغط و الحرارة مما يساعد في تحديد إنتاجية البئر و يضمن قياسًا دقيقًا للتدفق.

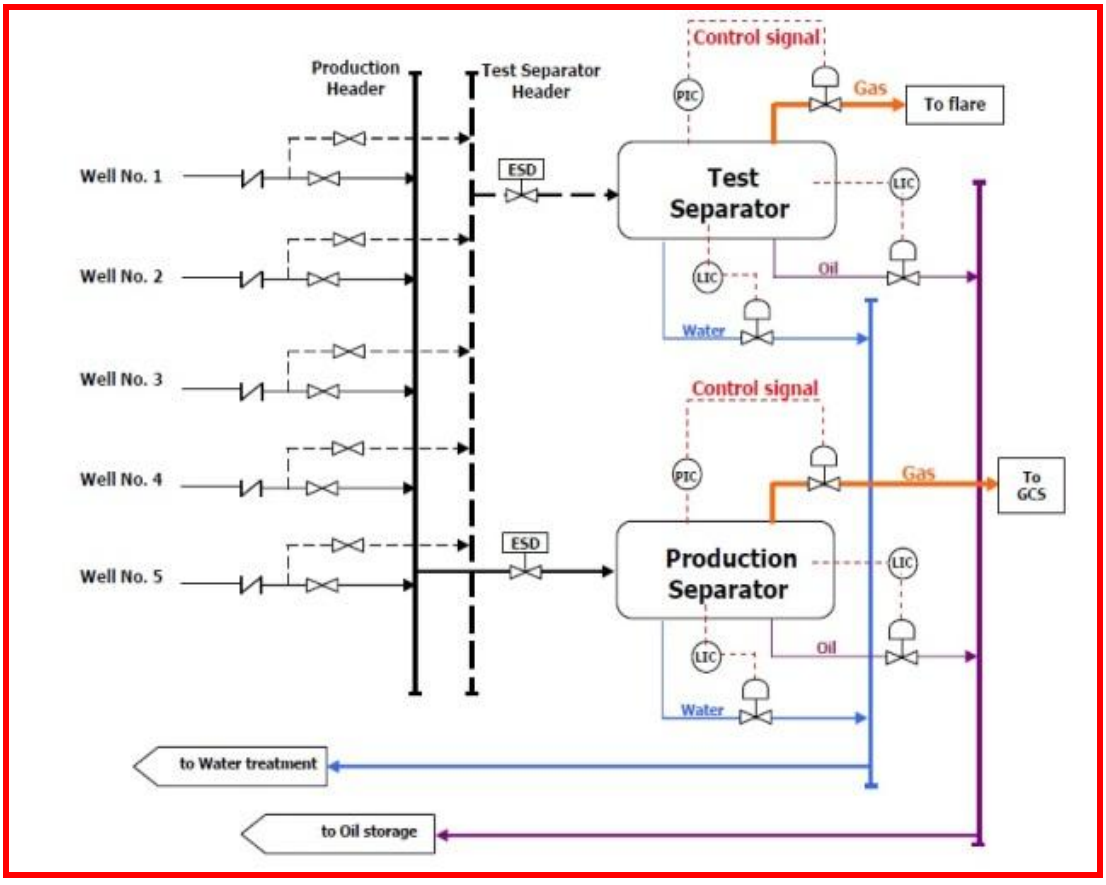
كما يمكن برمجته للحصول على قراءات كثيرة جدا – كما سنرى– لالتقاط البيانات الكبيرة و بفواصل زمنية قليلة جداً و يتم استرجاع البيانات بعد سحب المقياس من البئر.

3-2 فاصل الاختبار المتنقل (MTU: Mobilized Testing Separator)

و هو عبارة عن مستوعب سطحي يفصل أطوار سوائل البئر المنتجة (النفط، الغاز، الماء)، و عادة ما يكون عبارة عن فاصل أفقي ثلاثي الطور.

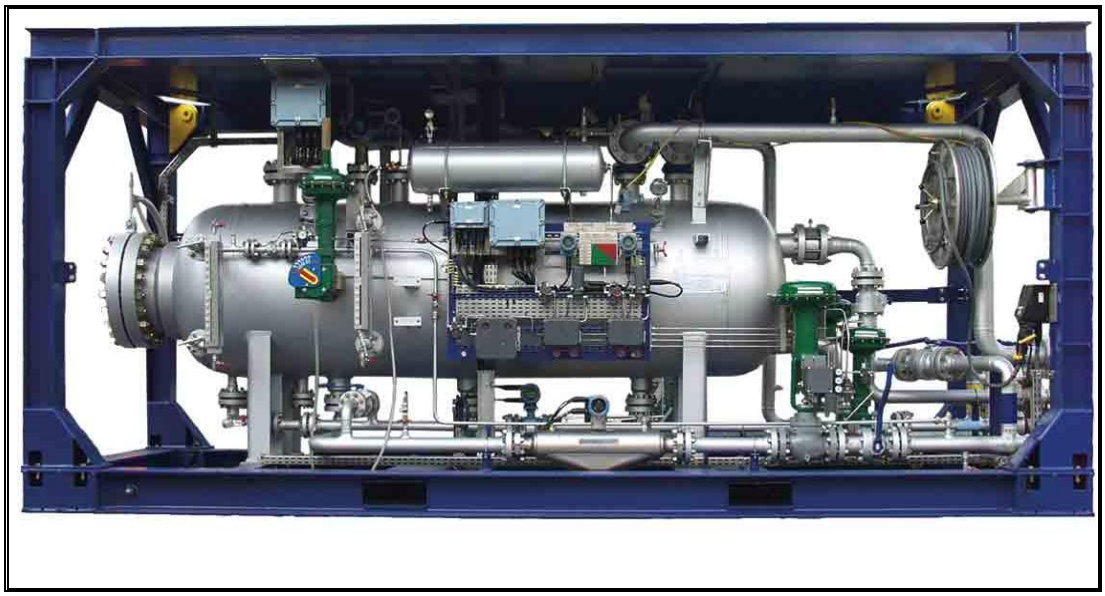
يتم عادة تحويل خط إنتاج كل البئر شهرياً – كإجراء دوري – إلى فاصل الاختبار و لمدة محددة (مثل 12–24 ساعة)، و ذلك بغرض قياس معدلات إنتاج الآبار الفردية من خلال فصل الأطوار الثلاثة المنتجة (النفط والغاز والماء) و باستخدام مقاييس تدفق أحادية الطور على مخارج الأطوار المفصولة.

و في الآبار المنتجة يتم تحديد إنتاجية البئر (من الماء و النفط و الغاز) من خلال ربطه بخط فاصل الاختبار (Test Manifold) في المحطة (الشكل 19).



الشكل (19) مخطط لمحطة إنتاجية مجهزة بفاصل اختبار

أما عندما تكون الآبار حديثة فلا بد من اختبار البئر بواسطة فاصل ثلاثي الطور المحمول – المتنقل (MTU: Mobilized Testing Unit- PTS: Portable Testing Unit) و الذي سيمكن من تحديد إنتاجية البئر الحقيقية و التي سيتم ربطها مع معطيات ضغط قاع البئر الديناميكي المقاس فعليا باستخدام جهاز الذاكرة (Memory Gauge).



الشكل (20) فاصل اختبارمحمول – MTU Mobilized Testing Unit

ومن خلال توفر فواصل الاختبار بيانات عالية الدقة التي تعطي معدلات الإنتاج الحقيقية للأطوار المنتجة مع توفر معطيات ضغوط الآبار الجوفية و تحليل مجموعات البيانات هذه معًا نكون قد حصلنا على تحليل شامل لأداء البئر وإنتاجيته.

كذلك فلا بد من استخدام فواصل الاختبار المحمولة (MTU) مع جهاز الذاكرة (Memory Gauge) لدى إجراء أعمال تحميض الآبار و تنشيط الابار باستخدام النيتروجين و غيرها، لمعرفة مدى تحسن أداء هذه الآبار.