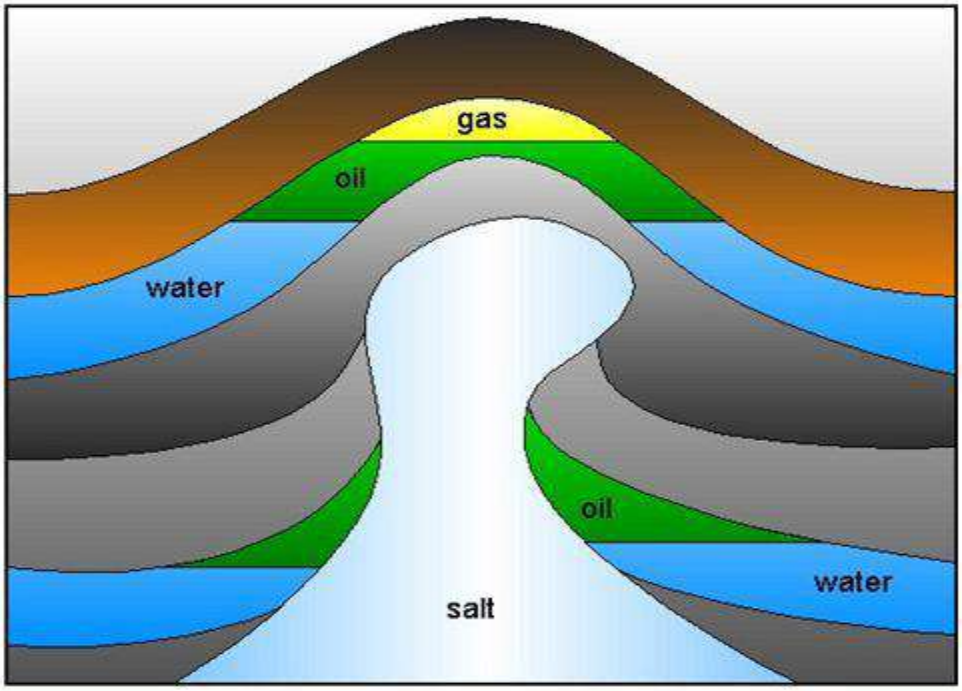
الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
الجامعة السورية الخاصة
كلية هندسة البترول

الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

هندسة مخزون النفط - ٢



تأليف الدكتور المهندس

أيمن أحمد شقوف

الفصل الاول

استثمار المكامن النفطية غير المتجانسة والخاضعة لنظام دفع المائي

١-١- اشكال الطبقات غير المتجانسة وطرق دراستها:

ان جميع طبقات الحقول النفطية بشكل عام غير متجانسة حسب التركيب الجيولوجي، ولتقييم عدم تجانس الطبقات النفطية عند وضع التصاميم والتحاليل لاستثمار الحقول النفطية فمن الضروري تطبيق طريقة علمية تساعدنا على تعيين المؤشرات الاساسية الكمية والنوعية لدرجة عدم التجانس الجيولوجي.

يفهم من عدم التجانس الجيولوجي بانه المؤشرات غير الثابتة للطبقة (السماكة – المسامية – النفوذية) او بتعبير اخر هو التغيرات الليتولوجية والستراتغرافية للطبقة حسب المساحة (عدم التجانس النطاقي) والمقطع (عدم التجانس الصفائحي اي حسب سماكة الطبقة).

تقسم الطبقات غير المتجانسة شرطيا الى زمرتين :

ا-عدم التجانس حسب المؤشرات (السماكة – المسامية – النفوذية) للطبقات غير المتقطعة.

ب- عدم التجانس حسب المؤشرات للطبقات المتقطعة (العدسية).

يمكن ان يأخذ توزع مؤشرات الطبقة غير المتجانسة صفة التوزع النظامي او صفة التوزع الاحتمالي او بالأحرى الصفة التوقعية. ولكن بشكل عام فان توزع مؤشرات الطبقة سيأخذ صفة الاحتمالية والصفة النظامية. وبهذا يمكننا توزيع اشكال عدم تجانس الطبقات حسب المؤشرات الى الاشكال التالية :

١" – توزع نظامي لمؤشرات الطبقة غير المتقطعة وغير المتجانسة.

٢" – توزع احتمالي لمؤشرات الطبقة غير المتقطعة وغير المتجانسة.

٣" – عدم تجانس نطاقي حسب المساحة أوحسب حجم الطبقة وذلك عندما يمكن تقسيم الطبقة الى نطاقات منفردة ذات مؤشرات مختلفة عن مؤشرات المجالات المتاخمة.

٤" – عدم التجانس الصفائحي او عدم التجانس حسب سماكة الطبقة غير المتقطعة ، في هذه الحالة يمكن من مقطع الطبقة فصل:

أ – فصل طبقة رقيقة ذات مسامية ونفوذية وسماكة ودرجة تشبع مختلفة.

ب – فصل تداخلات غضارية منفردة ذات نفوذية ضعيفة.

٥" – في الشكل العام يعتبر عدم التجانس للطبقات العدسية من اصعب الانواع.

مما ذكر سابقا يمكننا القول انه لدى دراسة عدم تجانس الطبقات يمكن استخدام الحلول الاتية:

١"– الحلول التعينية : في هذه الحالة واعتمادا على الدراسات الجيولوجية والجيوفيزيائية والحقلية لعدم تجانس الطبقات حسب المؤشرات يتم رسم خارطة توزع مؤشرات الطبقة حسب المساحة والرسم التخطيطي لتوزعها حسب المقطع.

٢"– الحلول الاحتمالية: في هذه الحالة تستخدم الطرق الرياضية الاحصائية ،حيث واعتمادا على كميات معينة من المعلومات حول مؤشرات الطبقة يعين قانون التوزع الذي تحققه هذه المؤشرات الحقيقية.

من المحبذ استخدام الطريقتين معا ففي مثل هذه الحالة فان الدراسة الجيولوجية تساعد على تبيان عمليات الترسيب الطبقية والتي تسمح فيما بعد باستخدام الطرق الرياضية الاحصائية بالشكل الصحيح ، فمثلا لدى دراسة عدم التجانس حسب المؤشرات في الطبقات العدسية ولتقييم صفات توزع المؤشرات حسب حجم الطبقة من المحبذ استخدام الحل الاحتمالي ،أما ولدراسة التوزع في طبقة رقيقة منفردة أو في عدسة أو في نصف عدسة فانه يفضل استخدام

الحل التعييني وذلك برسم الخرائط اللازمة، لدى دراسة عدم التجانس الجيولوجي للطبقات ندخل بعض المفاهيم منها:

الرملية ، التقسيم ، انتشار الخزان حسب المساحة ، هذه المفاهيم ضرورية للخصائص الكميية لدرجة عدم تجانس الطبقات ومقارنتها حسب درجة عدم التجانس.

لدراسة تغير التركيب الليتولوجي والسترتغرافي وبالتالي حسابات عامل المردود النفطي فانه يعبر كميا عن عدم تجانس الطبقات بالمعاملات التالية:

(الرملية k_p – التقسيم k_o – الانتشار حسب المساحة k_s – التبديل k_z – التقسيم k_c).

١- **معامل الرملة** (k_p) لكل بئر: هو نسبة السماكة الفعالة الى سماكة الطبقة ككل (من الغطاء العلوي الى الغطاء السفلي) اي :

$$k_{pi} = \frac{h_{ie}}{h_{eT}} (1-1)$$

وللمكمن ككل تصبح : $$K_P = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_{ie}}{h_{iT}}}{N} \qquad (1-2)$$

حيث ان :

h_{ie} = السماكة الفعالة للطبقة الرملية في البئر i

h_{iT} =السماكة الكلية للطبقة الرملية في البئرi

N = عدد الابار

٢- **معامل التقسيم:** هو نسبة عدد الطبقات الرملية في كل الابار الى العدد الكلي للآبار.

$$k_o = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \cdots n_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i}{N} \qquad (1-3)$$

حيث ان :

N =عدد الابار الكلي التي تخترق الطبقة.

n_i = عدد الطبقات الرملية في عدد من الابار i

عند تعيين معامل الرملية والتقسيم، يقسم المقطع المنتج الى مجموعتين شرطيتين هما:

١"- الخزان

٢"- غير الخزان

٣- معامل الانتشار حسب المساحة هو نسبة سطح انتشار الخزان الى سطح المكمن ضمن مجال الكونتور النفطي الخارجي ويحسب هذا المعامل لطبقة واحدة كما يلي:

$$k_{S_1} = \frac{S_1}{S_H} \qquad (1-4)$$

وللطبقات ككل :

$$K_S = \frac{\sum_{I=1}^{n} S_i}{n_1 S_H} \qquad (1-5)$$

حيث ان :

S_i = مساحة انتشار الخزان لعدد من الابار.

S_H= سطح المكمن ضمن مجال الكونتور النفطي الخارجي

n = عدد الطبقات المفروزة.

٤- **معامل التبديل** $K_Z(S)$ أو عدم وجود طبقة خازنة ويعطى بالعلاقة:

$$K_Z(S) = 1 - K_S \qquad (1-6)$$

٥- **معامل الالتقاء :** هو نسبة سطح نطاقات الالتقاء مع طبقة فوقية او سفلية الى سطح نتشار
المكمن ويعطى بالعلاقة الاتية:

$$K_{C_I} = \frac{S_C}{S_I} \qquad (1-7)$$

حيث ان:

S_C =السطح الكائن بين مجالين متجاورين غير منفصلين عن بعضهما بمجال غضاري.

S_i= سطح انتشار الخزان لعدد nمن الابار.

كلما كان معامل الالتقاء كبيرا كلما كانت درجة الاتصال الهيدروديناميكي لرقائق منفردة (عن بعضها) كبيرة فيما بينها.
للطبقات ككل نكتب :

$$K_C = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_C}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \qquad (1-8)$$

١-٢- <u>عدم تجانس الطبقات حسب النفوذية:</u>

يعتبر تعيين قانون تغير النفوذية حسب حجم الطبقة ورسم تابع وكثافة توزع النفوذية هو الكثر اهمية للحسابات الهيدروديناميكية لعامل المردود النفطي .
يستخدم بشكل واسع لرسم المخططات الحسابية لنفوذية الطبقات غير المتجانسة الطرق الاحصائية الرياضية ونظرية الاحتمالات ، حيث يستخدم الصف الاحصائي للقيم الفعلية للنفوذية والقيم الحصول عليها بالطرق المخبرية من تحليل العينات الاسطوانية او بالطرق الجيوفيزيائية او بطرق بحث الابار.
الشكل (١-١) يوضح مجالات التوزيع المختلفة في المستوي β_1 و β_2 وهذه التوزعات هي:

١- الطبيعية (النظامية)

٢- توزع -β

٣- توزع - γ

٤- التوزع الطبيعي اللوغاريتمي.

لاستخدام الشكل (١-١) يجب معرفة قيم المؤشرات β_1 و β_2 التي نحصل عليها من المعادلات (١-٩) و(١-١١) والتي تنقل فيما بعد على النوموغرام الموضح بالشكل(١-١).

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{M_3}{(M_2)^{3/2}} \quad ; \quad \beta_2 = \frac{M_4}{M_2^2} \qquad (1-9)$$

حيث ان :

M_1, M_2, M_3 معاملات تحسب كما يلي:

$$M_2 = a_2 - a_1^2$$

$$M_3 = a_3 - 3a_2a_1 + 2a_1^3 \qquad (1-10)$$

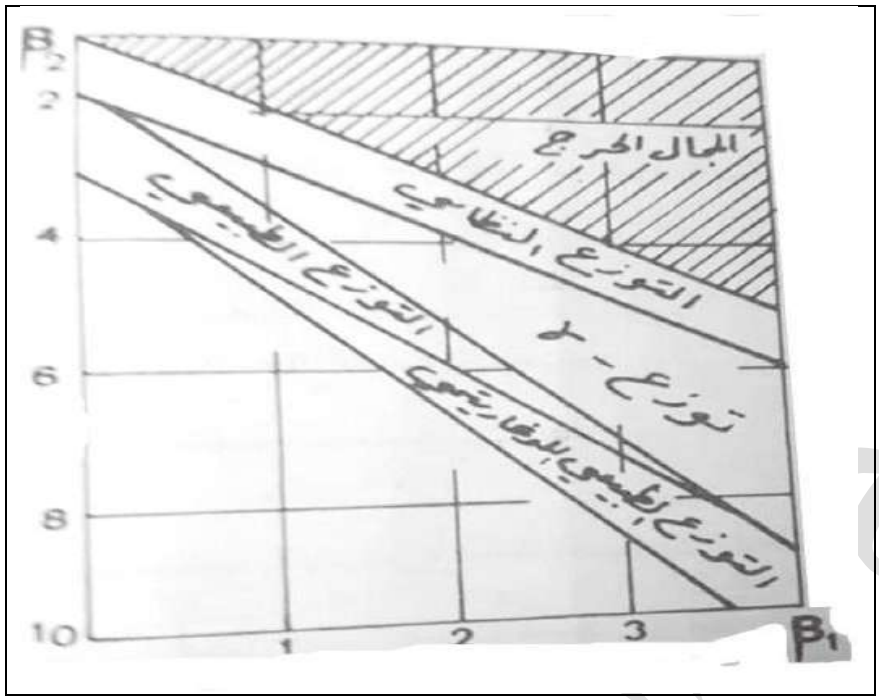
$$M_4 = a_4 - 4a_3a_1 + 6a_2a_1^2 - 3a_1^4$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i \times n_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i} \quad , a_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i^2 \times n_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i} \qquad (1-11)$$

$$a_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i^3 \times n_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i} \quad , \quad a_4 = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i^4 \times n_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i}$$

حيث ان :

N_i تردد التوزيع. K_i النفوذية في صف التوزيع.



الشكل (١-١) نموغرام تعيين قانون توزع مؤشرات الطبقة الفعلية

اذا توضعت النقطة ذات الاحداثيات β_1 و β_2 على النوموغرام قريبة جدا من المنحني او من احد مجالات التوزيع (توزع γ ، التوزع الطبيعي اللوغاريتمي ،.....الخ) فانه حسب نوع التوزيع هذا يمكن تعيين مؤشرات التوزيع.

مثال: في هذا المثال سنوضح الطريقة التي يتم بها تعيين التابع النظري لتوزع النفوذية اعتمادا على التوزع الفعلي (الحقيقي).

الجدول (١-١) يبين قيم النفوذية المحصول عليها مخبريا والقيم المساعدة لحساب β_1 وβ_2

مجال النفوذية k_i, D	القيمة الوسطية للمجال K,D	التردد N_i	$k_i = \frac{\varepsilon_i - 1.25}{0.5}$	$k_i.n_i$	$k_i^2 n_i$	$k_i^3.n_i$	$k_i^4.n_i$
0−0.5	0.25	44	−2	−88	176	−352	704
0.5−1	0.75	78	−1	−78	78	−78	78
1−1.5	1.25	53	0	0	0	0	0
1.5−2	1.75	37	1	37	37	37	37
2−2.5	2.25	19	2	38	76	152	304
2.5−3	2.75	13	3	39	117	351	1053
3−3.5	3.25	9	4	36	144	567	2304
3.5−4	3.75	7	5	35	175	875	4375
4−4.5	4.25	2	6	12	72	432	2592
4.5−5	4.75	1	7	7	49	343	2401
المجموع		263	25	38	925	2336	13848

الجدول (١−١)

$$M_2 = 3.6 - 0.14^2 = 3.48$$

$$M_3 = 8.9 - 3 \times 3.5 \times 0.14 + 2 \times 0.14^3 = 7.44$$

$$M_4 = 52.7 \times 4 \times 0.14 \times 8.9 + 6 \times 0.14^2 \times 3.5 - 3 \times 0.14^4 = 48.13$$

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{7.44}{3.48^{3/2}} = 1.15 \Rightarrow \beta_1 = 1.322$$

$$\beta_2 = \frac{48.13}{3.482} = 3.97$$

من النوموغرام الموضح بالشكل (١-١) نستنتج انه من القيم المحصول عليها لـ β_1 و β_2 ان توزع النفوذية يمكن ان يحقق وبدقة جيدة توزع $-\gamma$

ان اي تابع نظري من التوابع المذكورة سيعكس بدقة الخصائص الفعلية(الحقلية) لتوزع نفوذية الطبقات وبالتالي التأثير على صحة الحسابات الهيدروديناميكية للإنتاجية من الموائع وحساب عامل المردود النفطي مع الزمن .

ان تغير شروط الترسيب عند مراحل جيولوجية مختلفة ومن ثم حصول عملية تراص المكونات المترسبة وعملية سمنتتها وبالتالي تشكل الصخور الطبقية فان القسم الاعظم من الصخور من سيكتسب صفة عدم تجانس الصفات الفيزيائية.

بسبب عدم انتظام مسامية الصخور فانه يجب حساب القيمة الوسطية للمسامية عند اجراء الحسابات الهيدروديناميكية لتحديد الاحتياطي من النفط.

لنفترض ان الطبقة تتكون من n طبقة رقيقة ذات السماكة H_1 ،H_2 ،H_3 ،.....H_n وذات المسامية m_1 ، m_2 ، m_3 ،..... m_n فان القيمة الوسطية لمسامية الطبقة ستكون مساوية :

$$\overline{m} = \frac{H_1 \times m_1 + H_2 \times m_2 \ldots\ldots + m_n \times H_n}{H_1 + H_2 \ldots\ldots\ldots + H_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i \times m_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i} \qquad (1-12)$$

اذا تم حفر n بئر في الطبقات ذات السماكة H_1 ,H_2 , H_3 ,.....H_n عند القيم الوسطية لمسامية الصخور $\overline{m_1}$ ’$\overline{m_2}$ ’ ... ... $\overline{m_n}$: وسطح الارتشاح يساوي:

$F_1, F_2, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots F_n$ فان القيمة الوسطية لمسامية الصخور تحسب بالعلاقة الاتية:

$$\overline{m} = \frac{F_1 \times H_{1\times}\overline{m_1} + F_2 \times H_2\overline{m_2} + \cdots F_n \times H_n\overline{m_n}}{F_1 \times H_1 + F_2 \times H_2 + \cdots + F_n \times H_n}$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i \times H_i \times m_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i \times H_i} \qquad (1-13)$$

تتغير الصفات الفزيائية حسب مساحة المكمن ضمن مجال واسع، حيث يحمل هذا التغير صفة الاحتمالية ، وستكون القيم الوسطية لمؤشرات الطبقة غير كافية لكي تعكس خصائص تركيب الطبقات المذكورة. ولهذا السبب ولعكس الصورة الحقيقية عن عدم تجانس تركيب الطبقات تستخدم ،كما ذكرنا سابقا الطرق الاحصائية ونظرية الاحتمالات ، حيث تساعدنا هذه الطرق على رسم نموذج للطبقات المسامية غير المتجانسة .

تعتبر الصفات الفيزيائية للصخور (النفوذية والمسامية وغيرها) والتي تم الحصول عليها مخبريا من تحليل العينات الاسطوانية الماخوذة من الطبقة اثناء الحفر لها صفة الاحتمالية ولها تابع توزيع معين f(x) حيث ان مشتق هذا التابع $f'(x)$ يعطي كثافة التوزيع. واعتمادا على هذه الطريقة يمكننا تعيين القيمة الوسطية ، حيث ان كل القيم الاحتمالية ستكون قريبة منها وذلك باستخدام مفهوم التوقع الرياضي.

لنفترض ان العينات الاسطوانية الماخوذة من الطبقة لها النفوذيات التالية:

$$X_1 \ ,X_2, \ X_3\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots,X_n$$

فان القيمة الوسطية لنفوذية الطبقة تحسب بالمعادلة التالية:

$$M_X = \frac{X_1 \times P_1 + X_2 \times P_2 + \cdots \ldots . X_n \times P_n}{P_1 + P_2 + \cdots \ldots \ldots \ldots \ldots P_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i \times P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} (1-14)$$

من المعروف ان مجموع القيم الاحتمالية الكلي يساوي الواحد فان: $\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$

ومنه فان: $M_X = \sum_{i=1}^{n} X_i \times P_i (1-15)$

ان درجة تبعثر (تشتت) توزع صفات الصخور الطبقية حول التوقع الرياضي يسمى بتبعثر القيم الاحتمالية D(X) ويحسب بالعلاقة التالية:

$$D(X) = \sum_{i=1}^{n} [X_i - M(X)]^2 \times P_i \qquad (1-16)$$

ان واحدة قياس التبعثر هي مربع واحدة قياس القيم الاحتمالية ولهذا ولسهولة الاستخدام ادخل معامل اخر له نفس واحدة قياس القيم الاحتمالية ويسمى بالانزياح المربع ويساوي جزر معامل التبعثر اي : $\sigma(x) = \sqrt{D(x)}$ (١٧-١)

كذلك لتبيان خصائص التبعثر النسبي يستخدم معامل التغير والذي يساوي نسبة الانزياح المربعي الوسطي الى التوقع الرياضي :

$$V = \frac{\sigma(x)}{M(x)} \text{او} V = \frac{\sigma(x)}{M(x)} \times 100 \qquad (1-18)$$

لنفترض ان هناك اعدادا كبيرة n من التحاليل التي توضح صفات الصخور الطبقية،

يعين من هذه المعلومات الاحصائية الصف الاحصائي وذلك بتقسيم المجال الكلي للقيم الى اجزاء اصغر ،حيث يقسم عادة من ١٠-٢٠ جزء وفيما بعد تعين لكل جزء القيم الاحتمالية التي تقع ضمن هذا المجال ومن ثم وبتقسيم القيم الاحتمالية لكل جزء على مجموع القيم الاحتمالية يعين التوقع.

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{n} n_i} \qquad (1-19)$$

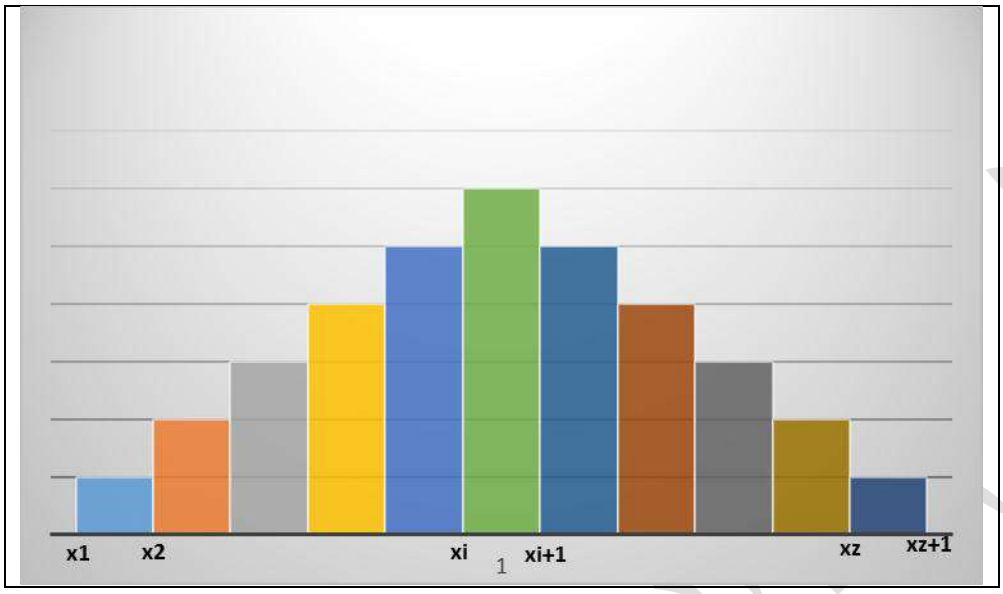
حيث يجب ان تكون مجموع قيم التوقع مساوية الواحد . ان نتائج الحسابات المذكورة توضح بجدول مشابه للجدول رقم (١-٢) والذي يطلق عليه بالصف الاحصائي.

$x_i - x_{i+1}$ حدود الجزء I وحيث Z هي عدد الاجزاء

مجالات الاجزاء	$X_1 - X_2$	$X_2 - X_3$	.....	$X_i - X_{i+1}$	.....	$X_Z - X_{Z+1}$
التوزع P_i	P_1	P_2	.....	P_i	.....	P_Z

الجدول رقم (١-٢)

لتوضيح الصف الاحصائي بيانيا يستخدم المخطط البياني الموضح بالشكل (١-٢).



الشكل (٢-١)

د. ايمن شقوف

الفصل الثاني

اجتياح الماء للمجال النفطي وحسابات تدفق الماء من المنطقة المائية الى المجال النفطي

٢-١- <u>دفع المياه الجوفية (التعدي المائي)</u> :

المياه الجوفية : هي طبقة من الصخور المسامية الحاملة للمياه المرافقة للنفط والتي تتدفق الى اي مساحة متاحة من صخور المكمن النفطي.

تجدر الاشارة هنا الى ان المكمن هو تجمع كبير من المياه الجوفية والهيدروكربونات والتي تتوضع حسب اختلاف كثافتها ، وتعتبر هذه المياه مصدرا رئيسيا للطاقة الطبقية والتي تساعد على انتاج الهيدروكربونات من الابار النفطية.

يمكن تصنيف الدفع المائي اعتمادا على :

١- ظروف الحفاظ على الضغط الطبقي:

أ- دفع مائي نشيط (قاسي).

ب- دفع مائي متوسط (جزئي).

ج- دفع مائي ضعيف (محدود).

٢- نظام التدفق:

أ- الحالة المستقرة.

ب- الحالة شبه المستقرة (المستقرة الزائفة).

ج- الحالة غير المستقرة.

٣- هندسة التدفق:

أ- دفع المياه الجانبية.

ب- دفع المياه القاعدية.

ج- دفع مائي ذو جريان خطي.

د- دفع مائي ذو جريان شعاعي.

٤- ظروف الحدود الخارجية للمكمن النفطي:

أ- نظام المكمن المحدود.

ب- نظام المكمن غير المحدود.

عند نظام الدفع المائي سيحدث انخفاض تدريجي لضغط المكمن والذي يؤدي الى عامل مردود نفطي جيد ، كما ستكون نسبة الغاز الى النفط ايضا ثابتة الى حد ما مع زيادة انتاج المياه في الابار الضحلة.

عند تقييم ادائية المكامن النفطية نحتاج الى تحديد كمية المياه التي تدخل الى الجزء النفطي من المكمن والتي تعتمد على :

أ- لزوجة الماء.

ب- النفوذية في المنطقة المائية.

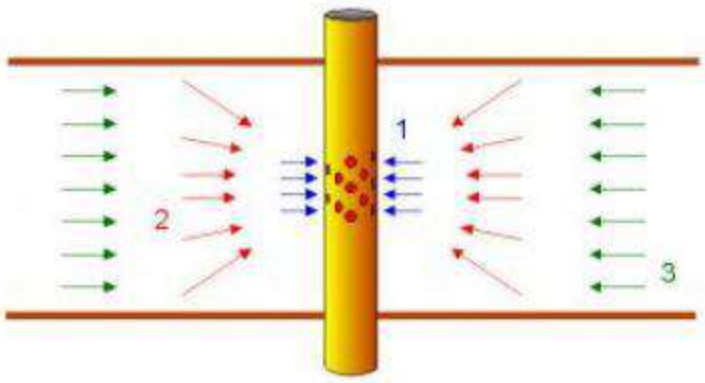
ج- مساحة المقطع العرضي بين المنطقة المائية والمنطقة النفطية.

وبشكل عام يمكن القول انها تعتمد على مدى الاتصال الهيدروديناميكي بين الطبقة المائية والنفطية في المكمن.

تصنف حركة الموائع باتجاه قيعان الابار وذلك حسب اتجاه تدفق المائع الى نوعين هما:

١- **الجريان الخطي:** يحدث هذا التدفق عندما تكون مسارات المائع على شكل خطوط متوازية باتجاه واحد، حيث يفترض في هذا النوع من التدفق ان تكون مساحة المقطع العرضي للجريان ثابتة .

٢- **الجريان الشعاعي :** يحدث هذا التدفق عندما تتحرك الموائع الى البئر باتجاهات مختلفة ضمن التركيب حول البئر.



الشكل يبين التدفق الشعاعي والخطي في بئر واحدة مثقبة

1,3 – جريان خطي

2 – جريان شعاعي

٢-٢- انظمة تدفق الموائع:

٢-٢-١- تدفق (جريان) الموائع بالحالة المستقرة:

يحدث هذا النوع من التدفق عندما تكون الشروط في اي نقطة من المكمن (الضغط ، درجة الحرارة ، سرعة المائع ،.....) ثابتة لا تتغير بمرور الزمن.

يمكن تعريفه بانه الجريان الذي يكون فيه معدل تغير الضغط مع الزمن في اي نقطة من المكمن يساوي الصفر اي: $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

في هذا النوع من الجريان تتأثر كل الحدود لكن دون اي انخفاض في الضغط الستاتيكي وتدعى في هذه الحالة حدود الضغط الثابت.

ان نظام **الحالة المستقرة** اكثر قابلية للتطبيق على **تجارب الازاحة المخبرية** منها في ظروف المكمن، يمكن رؤية هذه الحالة من الجريان فقط في المكامن التي يتم فيها الحفاظ على الضغط الطبقي اما عن طريق حقن الماء او الغاز او عن طريق وجود طبقة مياه جوفية قوية ذات احتياطي جيد من المياه وهذا يعني انه يوجد تدفق للسائل عبر حدود المكمن (مكمن غير محدود). ان معادلات التدفق الخطي للموائع غير القابلة للانضغاط عند الحالة المستقرة تعطى كما يلي

$$q = \frac{KA}{\mu}\frac{(P_K - P_{wf})}{L} \qquad (2-1)$$

بواحدات دارسي :

$$q\left(\frac{cm^3}{s}\right) = \frac{K(D).A(cm^2).(P_K - P_{wf})(atm)}{\mu(CP).L(cm)}$$

بالواحدات الحقلية حيث :

$1D=1000\ md$; $1ft^2=(30.48)^2\ cm^2=(0.3048)^2\ m^2$; $1atm=14.7\ psia$

نعوض بالطرف اليساري من المعادلة (٢-١) نجد:

$$q\left(\frac{cm^2}{s}\right) = q\left(\frac{STB}{day}\right)\times B_O\left(\frac{bbl}{STB}\right)\times\left(\frac{1day}{24\ h}\times\frac{1\ h}{3600\ s}\right)\times\frac{0.15899m^3}{bbl}\times\frac{10^3cm^3}{m^3} =$$

$$= 1.84013\times q\left(\frac{STB}{day}\right)\times B_O\left(\frac{bbl}{STB}\right) = 1.84013\times q\times B_O\left(\frac{bbl}{day}\right) \quad (1)$$

وبالتعويض بالطرف اليميني للمعادلة (٢-١) نجد

$$= \frac{K(md)\times\frac{1D}{1000\ md}\times A(ft^2)\times\frac{(30.48)^2}{1\ ft^2}\times cm^2\times(P_K - P_{wf})(Psia)\times\frac{1atm}{14.7\ psia}}{\mu(cp)\times L(ft)\times\frac{30.48\ cm}{1\ ft}}$$

$$= 0.002073469\frac{K(md)\times A(ft^2)(P_K - P_{wf})(psia)}{\mu(cp)\times L(ft)} \quad (2)$$

نعوض المعادلات (١) و(٢) بالمعادلة (٢-١) فنجد:

$$1.84013\ q.B_O\left(\frac{bbl}{day}\right) = 0.002073469\frac{K(md)\times A(ft^2)\times(P_K - P_{wf})(psia)}{\mu(cp)\times L(cm)}$$

$$q\left(\frac{STB}{day}\right) = 1.127\times10^{-3}\frac{K(md)\times A(ft^2)\times(P_K - P_{wf})\times(psia)}{\mu(cp)\times B_O\left(\frac{bbl}{STB}\right)\times L(ft)} \qquad (2-2)$$

٢-٢-٢- تدفق الحالة غير المستقرة (المكمن غير محدود) والمائع غير قابل للانضغاط:

معادلة الجريان هي:

$$u_r = \frac{q}{A} = \frac{k}{\mu}\frac{dp}{dr} \Rightarrow q = \frac{k.A}{\mu}\frac{dp}{dr} = \frac{k(2\pi rh)}{\mu}\frac{dp}{dr} \Rightarrow$$

$$dp = \frac{q.\mu}{2\pi kh}\frac{dr}{r} \qquad (2-3)$$

نكامل المعادلة (٢-٣) وفق الشروط التالية:

$$p = p_{wf} \longrightarrow p_k \qquad ;r = r_w \longrightarrow R_k$$

$$\int_{p_{wf}}^{p_k} dp = \frac{q\,.\mu}{2\,\pi\,k\,h}\int_{r_w}^{R_k}\frac{dr}{r} \Rightarrow \frac{q.\mu}{2\,\pi\,k\,h}\left(\ln R_k - \ln r_{wf}\right) = p_k - p_{wf}$$

$$\Rightarrow \frac{q.\mu}{2\,\pi k\,h}\ln\frac{R_k}{r_{wf}} = \left(p_k - p_{wf}\right) \Rightarrow$$

$$q = \frac{2\pi kh}{\mu}\frac{\left(p_k - p_{wf}\right)}{\mu\,\ln\frac{R_k}{r_w}} \qquad (2-4)$$

وبالواحدات الحقلية تصبح:

$$q = \frac{7.08\times10^{-3}\,k(md).h(ft).\left(p_k - p_{wf}\right)(psia)}{\mu.B_O.\ln\frac{R_k}{r_w}} \qquad (2-5)$$

٢-٢-٣- معادلة التدفق بالحالة المستقرة عند ادخال تأثير الظاهرة السطحية:

عمليا، اثناء عمليات الحفر والاكمال تكون النفوذية حول جدران البئر في اغلب الابار قد انخفضت مما يؤدي الى اعاقة تدفق المائع وبالتالي حدوث انخفاض اضافي في الضغط بالقرب من جدران البئر والذي يعرف بالظاهرة السطحية وبإدخال تأثيرها في معادلة التدفق نجد:

$$q = \frac{2\,\pi\,k\,h\left(p_k - p_{wf}\right)}{\mu\left[\ln\frac{R_k}{r_w} + S\right]} \qquad (2-6)$$

حيث ان: S هو معامل الظاهرة السطحية.

وبالواحدات الحقلية : $q = \frac{7.08\,10^{-3}\,k(md).h(ft).(p_k - p_w)(psia)}{\mu.B_O\left[\ln\frac{R_k}{r_w}+S\right]}$ $(2-7)$

٢-٢-٤- معادلة التدفق الشعاعي للحالة المستقرة (مكمن غير محدود) للمائع غير القابل للانضغاط مع الاخذ بعين الاعتبار تأثير الظاهرة السطحية هي:

$$q = \frac{7.08\,10^{-3}k\,h\,\left(p_k - p_{wf}\right)}{\mu\,B_O\left[\ln\frac{R_k}{r_w} + s\right]} \qquad (2-8)$$

٢-٣- نماذج حسابات طبقات (خزانات) المياه الجوفية:

عند التدفق الطبيعي للماء في كل من مكامن النفط والغاز وباستخدام موازنة المادة تحسب كمية المياه المتدفقة من المعادلة التالية :

$$w_e = \bar{c} \times w_i(p_i - p) \qquad (2-9)$$

حيث ان :

W_i الحجم الاولي من المياه في الطبقة المائية و هو يعتمد على هندسية الطبقة المائية.

P_i الضغط الاولي للطبقة المائية في المكمن.

P الضغط الحالي للمكمن والذي يساوي هنا الضغط على سطح التقاء النفط او الغاز مع الماء

$\bar{c}$ الانضغاطية الكلية للطبقة المائية $\bar{c} = c_w + c_f$

هذه المعادلة بسيطة ويجب اعادة صياغتها للانضغاطية وهي قابلة للتطبيق على طبقات المياه الصغيرة جدا . وللطبقات المائية الكبيرة نحتاج لوجود نموذج رياضي يتضمن الاعتماد على الزمن لتلبية حقيقة ان تغير الضغط في المكمن يستغرق زمنا محدودا .وسيتم دراسة عدة نماذج (نموذج بوت– نموذج سيلزيوس–نموذج هورست المعدل عند الحالة المستقرة– نموذج فان افريدينجن وهورست– نموذج كارتر وتريسي– نموذج فيكتوفيتش).

٢–٣–١– نموذج بوت :

تعتبر هذه الطريقة واحدة من ابسط النماذج لتقدير كمية المياه التي تجتاج مكامن لهيدروكربون، ورياضيا يعبر عنها كما يلي:

$$w_e = (c_w + c_f)f \times w_i(p_i - p) \qquad (2-10)$$

$$w_i = \frac{\pi(r_a^2 - r_e^2)h \times \emptyset}{5.615} \; ; \; f = \frac{\theta}{360} \qquad (2-11)$$

حيث ان:

θ زاوية الطبقة المائية.

P, Pi الضغط الحالي والضغط الاولي للمكمن على الترتيب

W_e , W_i الكمية الكلية للمياه المتدفقة و الحجم الاولي للمياه في الطبقة المائية .

C_w, C_f هي انضغاطية المياه والصخر على الترتيب.

r_a, r_e هي نصف قطر المكمن ونصف قطر الطبقة المائية.

$\emptyset, h$ هي مسامية وسماكة الطبقة المائية على الترتيب.

٢-٣-٢- نموذج سيلزيوس:

ان سيلزيوس (١٩٣٦) كان اول من طور تعابير مفيدة لحسابات تدفق المياه في المكمن الهيدروكربوني. وتعبيره بالحالة المستقرة هو كما يلي:

$$w_e = c_s \int_0^t (p_i - p)dt \qquad (2-12)$$

يعطى معدل تدفق المياه بالشكل التفاضلي كما يلي:

$$\frac{dw_e}{dt} = c_s(p_i - p) \qquad (2-13)$$

اضافة الى ذلك قد ينخفض ضغط المكمن من الضغط الاولي$(t = 0)$ الى اي قيمة له عند الزمن (t) .

تدفق المياه التراكمي هو تابع لانخفاض الضغط التراكمي بدا من الضغط الاولي للمكمن كما هو موضح في الشكل رقم (٢-١) ان المنطقة (المساحة) تحت المنحني يمكن حسابها باستخدام اية تقنية من تقنيات التكامل العددي . ونحن هنا نطبق طريقة لحساب كمية المياه التراكمية بعد كل مرحلة زمنية .

$$w_e = c_s \left\{ \frac{(t_{n+1} - t_n)}{2} (p_i - p_n) \right\} \qquad (2-14)$$

حيث ان :

P_i ,P_n ضغط المكمن الاولي وضغط المكمن عند الزمن t_n

C_s ثابت تدفق المياه (ثابت سيلزيوس)

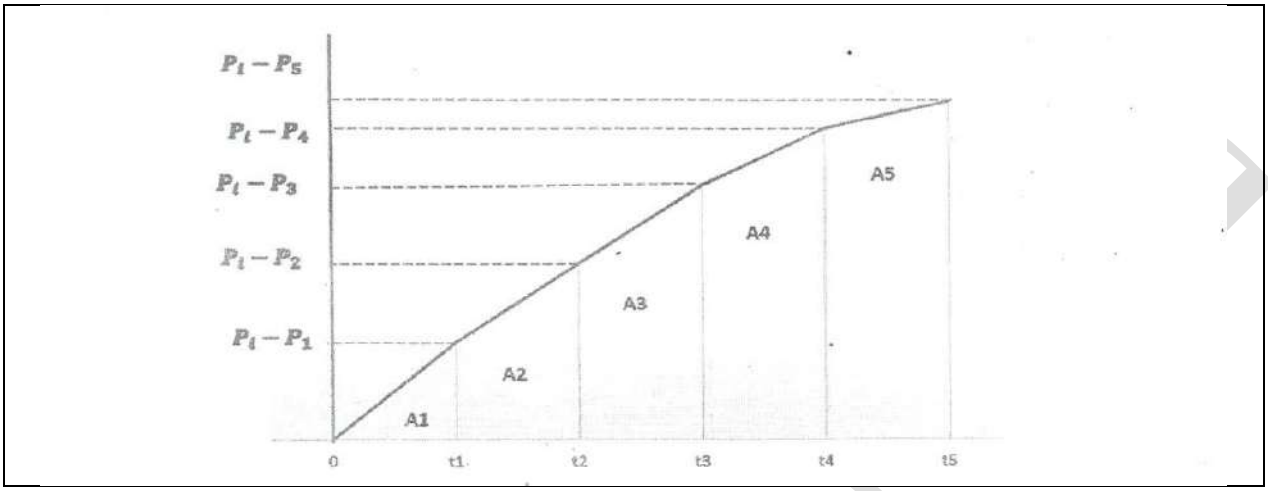
خطوات الحل لحساب كمية المياه المتدفقة حسب نموذج سيلزيوس عند حالة الجريان المستقر هي كما يلي:

الخطوة الاولى: حساب انخفاض الضغط بالعلاقة مع الزمن.

الخطوة الثانية: حساب تدفق المياه بالعلاقة مع الزمن.

الخطوة الثالثة: حساب تدفق المياه التراكمي بالعلاقة مع الزمن.

تمثل هذه الخطوات بجدول كما في الجدول رقم (٢-١)



الشكل (٢-١) يمثل انخفاض الضغط كتابع للزمن

الجدول (٢-١) حسابات التدفق وفق نموذج سيلزيوس

الزمن days	الضغط Psi	انخفاض الضغطpsi	تدفق المياهbbl	التدفق التراكمي للمياهbbl
0	p_i	0	0	0
t_1	p_1	$\Delta p_1 = p_i - p_1$	$w_{e1} = c_s \left\{ \frac{(\Delta p_1 + 0)}{2} (t_1 - 0) \right\}$	w_{e1}
t_2	p_2	$\Delta p_2 = p_i - p_2$	$w_{e2} = c_s \left\{ \frac{(\Delta p_2 + \Delta p_1)}{2} (t_2 - t_1) \right\}$	$w_{e1} + w_{e2}$
t_3	p_3	$\Delta p_3 = p_i - p_3$	$w_{e3} = c_s \left\{ \frac{(\Delta p_3 + \Delta p_2)}{2} (t_3 - t_2) \right\}$	$w_{e1} + w_{e2} + w_{e3}$
t_4	p_4	$\Delta p_4 = p_i - p_4$	$w_{e4} = c_s \left\{ \frac{(\Delta p_4 + \Delta p_3)}{2} (t_4 - t_3) \right\}$	$w_{e1} + w_{e2} + w_{e3} + w_{e4}$
t_5	p_5	$\Delta p_5 = p_i - p_5$	$w_{e5} = c_s \left\{ \frac{(\Delta p_5 + \Delta p_4)}{2} (t_5 - t_4) \right\}$	$w_{e1} + w_{e2} + w_{e3} + w_{e4} + w_{e5}$

٢-٣-٣- نموذج هورست المعدّل عند نظام التدفق المستقر:

يشير التحليل الموسع لتدفق المياه داخل المكمن الى ان تدفق المياه يجب ان يكون في الغالب عملية غير مستقرة ، حيث قام هورست عام ١٩٥٨ بوضع معادلة معدّلة لتدفق المياه عند الحالة غير المستقرة والتي ستعطي نتائج افضل وهذه المعادلة هي التالية:

$$w_e = c_h \int_0^t \frac{(P_i - P)}{\log \alpha t} dt = c_h \sum_0^t \left(\frac{\Delta p}{\log \alpha t}\right) \Delta t \qquad (2-15)$$

ويعبر عن تدفق المياه بالشكل التفاضلي كما يلي:

$$\frac{dw_e}{dt} = c_h \frac{(p_i - p)}{\log \propto t} \qquad (2-16)$$

C_h ثابت تدفق المياه (ثابت هورست) .

$\propto$ ثابت تحويل الزمن والذي يعتمد على واحدة الزمن.

٢-٣-٤- نموذج فان افريدنجن وهورست:

تتطلب طريقة فان افريدنجن وهورست لحساب تدفق المياه تطابقا اساسيا للمعلومات (اسلوب التكرارية) وهذه العملية شاقة ومتعبة لكنها تؤمن حلا دقيقا لمعادلة الانتشارية عند الجريان الشعاعي ويمكن تطبيقها عند مرحلة مبكرة من عمر المكمن.

ولتقليل التعقيد عند تحديد كمية المياه التراكمية الكلية المتدفقة الى المكمن فقد قدم كارتر وتريسي و فان افريدنجن وهورست طريقة تتمثل في ثبات معدلات تدفق المياه خلال كل فترة من الزمن، وعندها يمكن تحديد كمية المياه التراكمية المتدفقة عند الزمن (t_n) مباشرة من القيم التي تم الحصول عليها عند الزمن(t_{n-1}).

$$w_e = c \times \Delta p \times w_{eD(t_D)} \qquad (2-17)$$

C هو ثابت تدفق المياه ويعطى بالواحدات الحقلية كمايلي:

من اجل المنظومة الشعاعية : bbl/psi

$$c = 1.119.\mathrm{f}\ .\emptyset\ .\mathrm{h}\ .c_{tw}.r_e^2 \quad ,f = \frac{\theta}{360} \qquad (2-18)$$

اذا كان الزمن بالساعات فان: $(2-19)$

$$t_D = \frac{0.000264\ k\ .t}{\mu_w.\emptyset_w.c_{tw}.r_e^2}$$

من اجل المنظومة الخطية :bbl/psi

$$c = 0.1781\ w\ .l.\emptyset\ .h\ .c_{tw} \qquad (2-19)$$

اذا كان الزمن بالساعات فان: $t_D = \frac{0.000264\ k\ .t}{\mu_w\ .\emptyset_w\ .c_{tw}\ .r_e^2}$ (٢-١٢)

تدفق المياه عند الزمن t_D هو :

$$w_e(t_D) = C[\Delta P_O.w_{eD}(t_D) + \Delta p_1.w_{eD}.(t_D - t_{D1}) + \Delta p_2 w_{eD}(t_D - t_{D2})] \quad (2-13)$$

حيث يحسب فرق الضغط لكل مرحلة كما يلي:

$$\Delta p_j = \frac{p_i - p_{j+1}}{2} \quad ,, j \le 1 \text{ حتى } j = 0.1 \quad (2-20)$$

$$\Delta p_j = \frac{p_{j-1} - p_{j+1}}{2} \quad ,, j > 1 \quad \text{حتى } j = 2 \dots\dots\dots n \quad (2-21)$$

$$\Delta p_o = p_i - p_{av1} = p_i - \frac{(p_i + p_1)}{2} = \frac{p_i - p_1}{2}$$

$$\Delta p_1 = p_{av1} - p_{av2} = \frac{(p_i + p_1)}{2} - \frac{(p_1 + p_2)}{2} = \frac{p_i - p_2}{2}$$

$$\Delta p_2 = p_{av2} - p_{av3} = \frac{p_1 + p_2}{2} - \frac{p_2 + p_3}{2} = \frac{p_1 - p_3}{2}$$

$$\Delta p_3 = p_{av3} - p_{av4} = \frac{p_2 + p_3}{2} - \frac{p_3 + p_4}{2} = \frac{p_2 - p_4}{2}$$

يمكن معرفة تدفق المياه اللابعدي من الجداول(2-5),(2-4), (2-3) كتابع للزمن اللابعدي للطبقات المائية المحدودة واللامحدودة (اللانهائية) كما يمكن ايضا حساب قيم تدفق المياه اللابعدي باستخدام العلاقات متعددة الحدود التي طورت من قبل ادواردسون عام ١٩٦٢ كتابع للزمن كطبقات المياه الجوفية ذات التأثير اللانهائي ولكن هذه العلاقات مقيدة بقيم محددة للزمن اللابعدي وهي كما يلي:

$$w_{eD}(t_D) = \sqrt[2]{\frac{t_D}{\pi}} \quad ,,, t_D \le 0.01$$

$$w_{eD}(t_D) = \frac{1.2838\sqrt{t_D} + 1.19328t_D + 0.269872t_D^{1.5} + 0.0085524t_D^2}{1 + 0.616599\sqrt{t_D} + 0.0413008t_D}$$

$$0.01 < t_D < 200 \pm 2\%$$

$$w_{eD}(t_D) = \frac{-4.29881 + 2.02566t_D}{\log t_D} \ ;\ t_D \ge 200 \pm 0.07\%$$

الجدول (٢-٢) يبين حسابات تدفق المياه وفق نموذج فان افريدينجن وهورست:

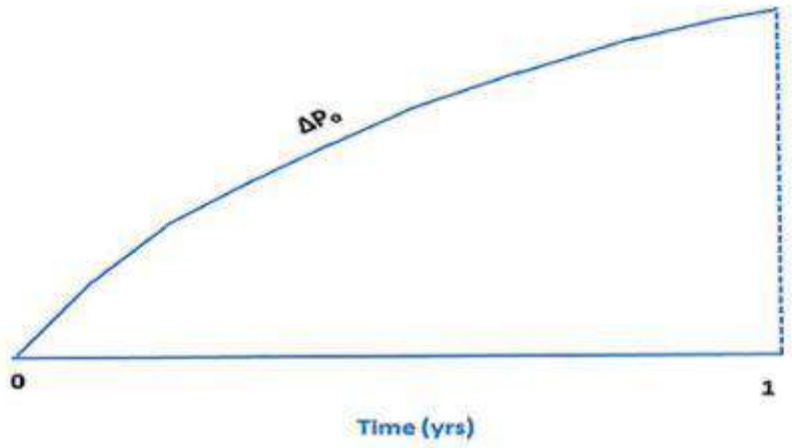
Time (yr)	Pressure (psi)	ΔP (psi)	t_D	W_{eD}	W_e
0	p_i		–	–	0
1	p_1	$\Delta p_0 = \frac{p_i - p_1}{2}$	t_{D1}	W_{eD1}	W_{e1}
2	p_2	$\Delta p_1 = \frac{p_i - p_2}{2}$	t_{D2}	W_{eD2}	W_{e2}
3	p_3	$\Delta p_2 = \frac{p_1 - p_3}{2}$	t_{D3}	W_{eD3}	W_{e3}
4	p_4	$\Delta p_3 = \frac{p_2 - p_4}{2}$	t_{D4}	W_{eD4}	W_{e4}
5	p_5	$\Delta p_4 = \frac{p_3 - p_5}{2}$	t_{D5}	W_{eD5}	W_{e5}
6	p_6	$\Delta p_5 = \frac{p_4 - p_6}{2}$	t_{D6}	W_{eD6}	W_{e6}

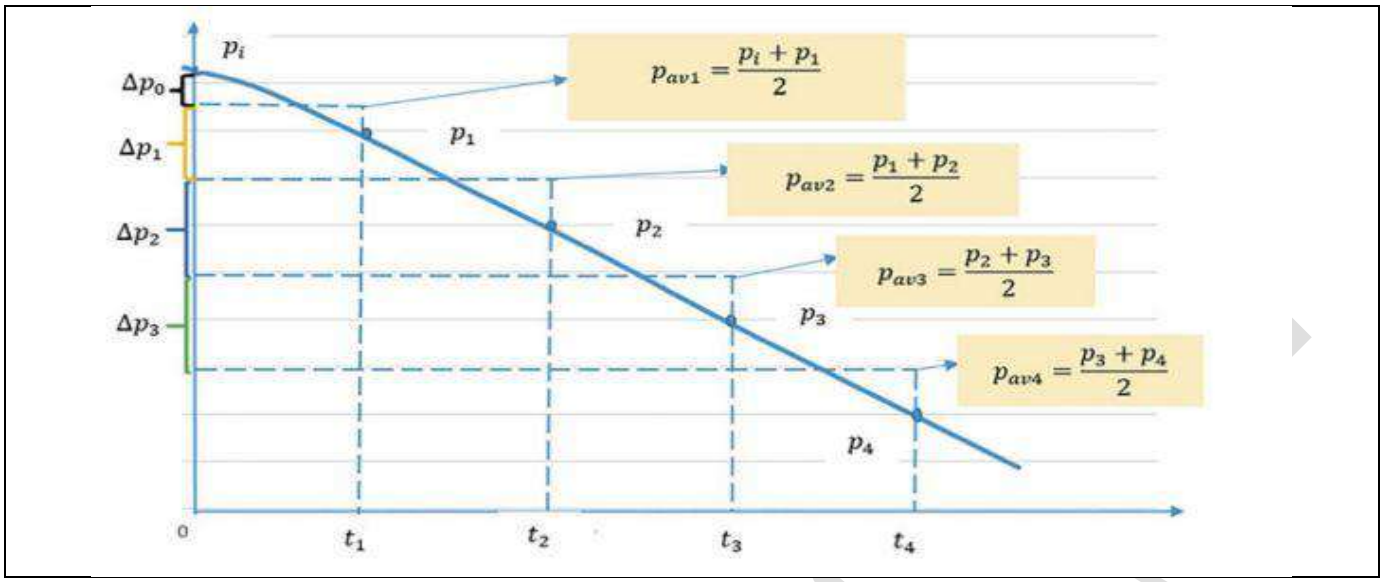
شرح كيفية حساب تدفق المياه في الجدول (٢-٢) اعلاه:

١- عند الزمن (t=0) لا يوجد تدفق مياه من الطبقة المائية الى داخل المكمن.

٢- عند الزمن (t=1) تتدفق المياه بسبب تمددها عند اول هبوط للضغط Δp_o كما هو موضح بالشكل رقم (٢-٢) . اعتمادا على الازمنة في الجدول فان اول هبوط للضغط يكون نشطا لعام واحد من الانتاج اي:

$$w_e(t_1) = c.\Delta p_o we_D(t_D) \quad ; w_e(t_1) = c\,.\Delta p_e w_e(\Delta p_o)$$





الشكل (٢-٢)

٣- عند نهاية العام الثاني (t=2):

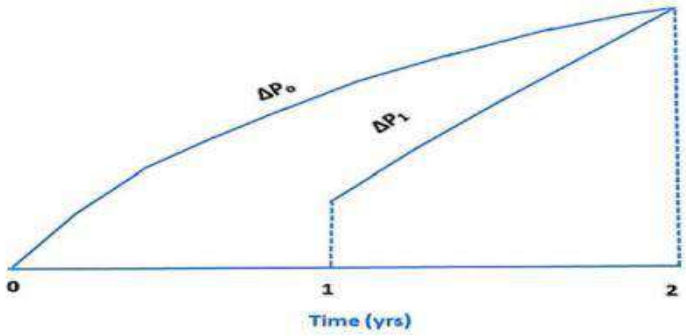
اجمالي تدفق المياه هو مجموع تدفق المياه للضغط الاول والثاني Δp_1 و Δp_2 على الترتيب.

بناء على ذلك فان كمية المياه المتدفقة عند هذه الفترة تعطى بالعلاقة التالية:

$$w_e(t_2) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1)$$

عند حسابات هذه الفترة علينا ان نلاحظ ان الضغط Δp_o هو نشط لمدة عامين مما يعني انه سيتم استخدام $(t = 2)$ لحساب الزمن اللابعدي (t_D)والذي سيستخدم بعد ذلك لتحديد (w_{eD}). وان انخفاض الضغط الثاني ΔP_1 نشط فقط للعام$(t = 1)$ومعادلات الحساب هي:

$$w_e(\Delta p_o) = c\,.\,\Delta p_o w_{e_D}@t_2 \;\; ; \;\; w_e(\Delta p_1) = c\,.\,\Delta p_1@t_1$$



t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
0	0	79	35.697	455	150.25	1190	340.84	3250	816.09	35	6.780.247		
0.01	0.112	80	36.058	460	151.64	1200	341308	3300	827.088	40	7650.096		
0.05	0.278	81	36.418	465	153.03	1210	345.77	3350	838.067	50	9363.099		
0.1	0.404	82	36.777	470	154.42	1220	348.23	3400	849.028	60	11.047,299		
0.15	0.52	83	37.136	475	155.8	1225	349.46	3450	859.974	70	12.708.36		
0.2	0.606	84	37.494	480	157.18	1230	350.69	3500	870.903	75	13,531,457		
0.25	0.689	85	37.851	485	158.57	1240	353.14	3550	881.816	80	14,350.12		
0.3	0.758	86	38.207	490	159.95	1250	355.6	3600	892.712	90	15.975.39		
0.4	0.898	87	38.563	495	161.32	1260	358.05	3650	903.594	100	17.586.28		
0.5	1.02	88	38.919	500	162.7	1270	360.5	3700	914.459	125	21560.732		
0.6	1.14	89	39.272	510	165.44	1275	361.72	3750	925.309	$1.5(10)^5$	$2.538(10)^4$		
0.7	1.251	90	39.626	520	168.18	1280	362.94	3800	936.144	2.0"	3.308'		
0.8	1.359	91	39.979	525	169.55	1290	365.39	3850	946.966	2.5"	4.066'		
0.9	1.469	91	40.331	530	170.91	1300	367.83	3900	957.773	10"	4817"		
1	1.569	93	40.684	540	173.64	1310	370.27	3950	968.566	4.0"	6.26 T'		
2	2447	94	41.034	550	176.36	1320	372.7	4000	979.344	5.0"	7699"		
3	3.202	95	41.385	560	179.07	1325	373.92	4050	990.108	6.0'	9.113'		
4	3.893	96	41.735	570	181.77	1330	375.14	4100	1000.86	7.0"	$1.051(10)^5$		
5	4.539	97	42.084	575	183.12	1340	377.57	4150	1011.6	8.0"	1.189"		
6	5.153	98	42.433	580	184.47	1350	380	4200	1022.32	9.0"	1326'		
7	5.743	99	42.781	590	187.17	1360	382.43	4250	1033.03	$1.0(10)^6$	1.462"		
8	6.314	100	43.129	600	189.85	1370	384.86	4300	1043.72	1.5"	2.126"		
9	6.869	105	44.858	610	192.53	1375	386.07	4350	1054.41	2.0"	2.781'		
10	7.411	110	46.574	620	195.208	1380	387.283	4400	1065.082	2.5"	3.427"		
11	7.94	115	48.277	625	196.544	1390	389.705	4450	1075.743	3.0"	4.064"		
12	8.457	120	49.968	630	197.878	1400	392.125	4500	1086.39	4.0"	5.313"		

الجدول (٢-٣)

الجدول (٢-٤)

t_D	We_D	t_D	We_D	t_D	We_D	t_D	We_D	t_D	We_D	t_D	We_D
13	8.964	125	51.648	640	200.542	1410	394.543	4550	1097.024	5.0"	6.544"
14	9.461	130	53.317	650	203.201	1420	396.959	4600	1107.646	6.0"	7.761"
15	9.949	135	54.976	660	205.854	1425	398.167	4650	1118.257	7.0"	8.965"
16	10.434	140	56.625	670	208.502	1430	399.373	4700	1128.854	8.0"	$1.016(10)^6$
17	10.913	145	58.265	675	209.825	1440	401.786	4750	1139.439	9.0"	1.134"
18	11.386	150	59.895	680	211.145	1450	404.197	4800	1150.012	$1.0(10)^7$	1.252"
19	11.855	155	61.517	690	213.784	1460	406.606	4850	1160.574	1.5"	1.828"
20	12.319	160	63.131	700	216.417	1470	409.013	4900	1171.125	2.0"	2.398"
21	12.778	165	64.737	710	219.046	1475	410.214	4950	1181.666	2.5"	2.961"
22	13.233	170	66.336	720	221.67	1480	411.418	5000	1192.198	3.0"	3.517"
23	13.684	175	67.928	725	222.98	1490	413.82	5100	1213.222	4.0"	4.610"
24	14.131	180	69.512	730	224.289	1500	416.22	5200	1234.203	5.0"	5.689"
25	14.573	185	71.09	740	226.904	1525	422.214	5300	1255.141	6.0"	6.758"
26	15.013	190	72.661	750	229.514	1550	428.196	5400	1276.037	7.0"	7.816"
27	15.45	195	74.226	760	232.12	1575	434.168	5500	1296.893	8.0"	8.866"
28	15.883	200	75.785	770	234.721	1600	110.128	5600	1317.709	9.0"	9.911"
29	16.313	205	77.338	775	236.02	1625	116.077	5700	1338.486	$1.0(10)^8$	$1.095(10)^7$
30	16.742	210	78.886	780	237.318	1650	452.016	5800	1359.225	1.5"	1.604"
31	17.167	215	80.428	790	239.912	1675	457.945	5900	1379.927	2.0"	2.108"
32	17.59	220	81.965	800	242.501	1700	463.863	6000	1400.593	2.5"	2.607"
33	18.011	225	83.497	810	245.086	1725	469.771	6100	1421.224	3.0"	3.100"
34	18.429	230	85.023	820	247.668	1750	475.669	6200	1441.82	4.0"	4.071"
35	18.845	235	86.545	825	248.957	1775	481.558	6300	1462.383	5.0"	5.032"
36	19.259	240	88.062	830	250.245	1800	487.437	6400	1482.912	6.0"	5.984"
37	19.671	245	89.575	840	252.819	1825	493.307	6500	1503.408	7.0"	6.928"
38	20.08	250	91.084	850	255.388	1850	499.167	6600	1523.872	8.0"	7.865"
39	20.488	255	92.589	860	257.953	1875	505.019	6700	1544.305	9.0"	8.797"

(continued)

الجدول (٢-٥)

t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
40	20.894	260	94.09	870	260.515	1900	510.861	6800	1564.706	$1.0(10)^9$	9.725"
41	21.298	265	95.588	875	261.795	192.5	516.695	6900	1585.077	1.5"	$1.429(10)^8$
42	21.701	270	97.081	880	261.073	1950	522.52	7000	1605.418	2.0"	1.880"
43	22.101	275	98.571	890	265.629	1975	528.337	7100	1625.729	2.5"	2.328"
44	22.5	280	100.057	900	268.181	2000	534.145	7200	1646.011	3.0"	2.771"
45	22.897	285	101.54	910	270.729	2025	539.945	7300	1666.265	4.0"	3.645"
46	23.291	290	101.019	920	273.274	2050	545.737	7400	1686.49	5.0"	4.510"
47	23.684	295	104.495	925	274.545	2075	551.522	7500	1706.688	6.0"	5.368"
48	24.076	300	105.968	930	275.815	2100	557.299	7600	1726.859	7.0"	6.220"
49	24.466	305	107.437	940	278.353	2125	561.068	7700	1747.002	8.0"	7.066"
50	24.855	310	108.904	950	280.888	2150	568.83	7800	1767.12	9.0"	7.909"
51	25.244	315	110.367	960	283.42	2175	574.585	7900	1787.212	1.0(10)10	8.747"
52	25.633	320	111.827	970	285.948	2200	580.332	8000	1807.278	1.5"	1.288"(10)9
53	26.02	325	113.284	975	287.211	2225	586.072	8100	1827.319	2.0"	1.697"
54	26.406	330	114.738	980	288.473	2250	591.806	8200	1847.336	2.5"	2.103"
55	26.791	335	116.189	990	290.995	2275	597.532	8300	1867.329	3.0"	2.505"
56	27.174	340	117.638	1000	293.514	2300	601.252	8400	1887.298	4.0"	3.299"
57	27.555	345	119.083	1010	296.030	2325	608.965	8500	1907.243	5.0"	4.087"
58	27.935	350	120.526	1020	298.543	2350	614.672	8600	1927.166	6.0"	4.868"
59	28.314	355	121.966	1025	299.799	2375	620.372	8700	1947.065	7.0"	5.643"
60	28.691	360	123.403	1030	301.053	2400	626.066	8800	1966.942	8.0"	6.414"
61	29.068	365	124.838	1040	303.560	2425	631.755	8900	1986.796	9.0"	7.183"
62	294.43	370	126.720	1050	306.065	2450	637.437	9000	2006.628	1.0(10)11	7.948"
63	29.818	375	127.699	1060	308.567	2475	643.113	9100	2026.438	1.5"	$1.17(10)^{10}$
64	30.192	380	129.126	1070	311.066	2500	648.781	9200	2046.227	2.0"	1.55"

65	30.565	385	130.550	1075	312.314	2550	660.093	9300	2065.996	2.5"	1.92"
66	30.937	390	131.972	1080	313.562	2600	671.379	9400	2085.744	3.0"	2.92"
67	31.308	395	133.391	1090	316.055	2650	682.640	9500	2105.473	4.0"	3.02"
68	31.679	400	134.808	1100	318.545	2700	693.877	9600	2125.184	5.0"	3.75'
69	32.048	405	136.223	1110	321.032	2750	705.090	9700	2144.878	6.0"	4.47"
70	32.417	410	137.635	1120	323.517	2800	716.280	9800	2164.555	7.0"	5.19"
71	32.785	415	139.045	1125	324.76	2850	727.449	9900	2184.216	8.0"	5.89"
72	33,151	420	140.453	1130	326.000	2900	738.598	10	2203.861	9.0"	6.58"
73	33.517	425	141.859	1140	328.480	2950	749.725	12.5	2688.967	$1.0(10)^{12}$	7.28"
74	33.883	430	143.262	1150	330.958	3000	760.833	15	3164.780	1.5"	$1.08(10)^{11}$
75	34.247	435	144.664	1160	333.433	3050	771.922	17.5	3633.368	2.0"	1.42"
76	34.611	440	146.064	1170	335.906	3100	782.992	20	4095.800		
77	34.974	445	147.461	1175	337.142	3150	794.042	25	5005.726		
78	35.336	450	148.856	1180	338.376	3200	805.075	30	5899.508		

الجداول (٢-٦)

الجدول (٢-٧)

$r_{eD}=1.5$		$r_{eD}=2.0$		$r_{eD}=2.5$		$r_{eD}=3.0$		$r_{eD}=3.5$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
$5.0(10)^{-2}$	0.276	$5.0(10)^{-2}$	0.278	$1.0(10)^{-1}$	0.408	$3.0(10)^{-1}$	0.755	1.00	1.571
6.0"	0.304	7.5"	0.345	1.5"	0.509	4.0"	0.895	1.20	1.761
7.0'	0.330	$1.0(10)^{-1}$	0.404	2.0"	0.599	5.0"	1.230	1.40	1.940
8.0'	0.354	1.25"	0.458	2.5"	0.681	6.0"	1.143	1.60	2.111
9.0"	0.375	1.50"	0.507	3.0"	0.758	7.0"	1.256	1.80	2.273
$(1.1X10)^{-1}$	0.395	1.75"	0.553	3.5"	0.829	8,0'	1.363	2.00	2.427
1.1'	0.414	2.00"	0.597	4.0"	0.897	9.0"	1.465	2.20	2.574
1.2"	0.431	2.25"	0.638	4.5"	0.962	1.00	1.563	2.40	2.715
1.3"	0.446	2.50"	0.678	5.0"	1.024	1.25	1.791	2.60	2.849
14'	0.461	2.75"	0.715	5.5"	1.083	1.50	1.997	2.80	2.976
1.5'	0.474	3.00"	0.751	6.0"	1.140	1.75	2.184	3.00	3.098
1.6"	0.486	3.25"	0.785	6.5"	1.195	2.00	2.353	3.25	3.242
1.3"	0.497	3.50"	0.817	7.0"	1.248	2.25	2.507	3.50	3.379
1.8"	0.507	3.75'	0.848	7.5"	1.299	2.50	2.646	3.75	3.507
1.9"	0.517	4.00"	0.877	8.0"	1.348	2.75	2.772	4.00	3.628
2.0"	0.525	4.25"	0.905	8.5"	1.395	3.00	2.886	4.25	3.742
2.1"	0.533	4.50"	0.932	9.0"	1.440	3.25	2.990	4.50	3.850
2.2"	0.541	4.75"	0.958	9.5"	1.484	3.50	3.084	4.75	3.951
2.3"	0.548	5 00"	0.993	1.00	1.526	3.75	3.170	5.00	4.047
2.4"	0.554	5.50"	1.028	1.10	1.605	4.00	3.247	5.50	4.222
2.5"	0.559	6.00"	1.070	1.20	1.679	4.25	3.317	6.00	4.378
2.6"	0.565	6.50"	1.108	1.30	1.747	4.50	3.381	6.50	4.516
2.8"	0.574	7.00"	1.143	1.40	1.811	4.75	3.439	7.00	4.639
3.0"	0.582	7.50"	1.174	1.50	1.870	5.00	3.491	7.50	4.749
3.2"	0.588	8.00"	1.203	1.60	1.924	5.50	3.581	8.00	4.846
3.4"	0.594	9.00"	1.253	1.70	1.975	6.00	3.656	8.50	4.932
3.6"	0.599	1.00"	1.295	1.80	2.022	6.50	3.717	9.00	5.009
3.8"	0.603	1.10	1.330	2.00	2.106	7.00	3.767	9.50	5.078
4.0"	0.606	1.20	1.358	2.20	2.178	7.50	3.809	10.00	5.138
4.5"	0.613	1.30	1.382	2.40	2.241	8.00	3.843	11.00	5.241
5.0"	0.617	1.40	1.402	2.60	2.294	9.00	3.894	12.00	5.321
6.0"	0.621	1.60	1.432	2.80	2.340	10.00	3.928	13.00	5.385
7.0"	0.623	1.70	1.444	3.00	2.380	11.00	3.951	14.00	5.435
8.0"	0.624	1.80	1.453	3.40	2.444	12.00	3.967	15.00	5.476
		2.00	1.468	3.80	2.491	14.00	3.985	16.00	5.506
		2.50	1.487	4.20	2.575	16.00	3.993	17.00	5.531
		3.00	1.495	4.60	2.551	18.00	3.997	18.00	5.551
		4.00	1.499	5.00	2.570	20.00	3.999	20.00	5.579
		5.00	1.500	6.00	2.599	22.00	3.999	25.00	5.611

الجدول (٢-٨)

$r_{eD}=1.5$		$r_{eD}=2.0$		$r_{eD}=2.5$		$r_{eD}=3.0$		$r_{eD}=3.5$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
				7.00	2.613	24.00	4.000	30.00	5.621
				8.00	2.619			35.00	5.624
				9.00	2.622			40.00	5.625
				10.00	2.624				

$r_{eD}=4.0$		$r_{eD}=4.5$		$r_{eD}=5.0$		$r_{eD}=6$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
2.00	2.442	2.50	2.835	3	3.2	6	5.148
2.20	2.598	3.00	3.196	3.5	3.54	6.5	5.44
2.40	2.748	3.50	3.537	4	3.88	7	5.724
2.60	2.893	4.00	3.859	4.5	4.19	7.5	6.002
2.80	3.034	4.50	4.165	5	4.5	8	6.273
3.00	3.170	5.00	4.454	5.5	4.79	8.5	6.537
3.25	3.334	5.50	4.727	6	5.07	9	6.795
3.50	3.493	6.00	4.986	6.5	5.35	9.5	7.047
3.75	3.645	6.50	5.231	7	5.61	10	7.293
4.00	3.792	7.00	5.164	7.5	5.85	10.5	7.533
4.25	3.932	7.50	5.684	8	6.09	11	7.767
4.50	4.068	8.00	5.892	8.5	6.33	12	8.22
4.75	4.198	8.50	6.089	9	6.55	13	8.651
5.00	4.323	9.00	6.276	9.5	6.76	14	9.063
5.50	4.560	9.50	6.453	10	6.97	15	9.456
6.00	4.779	10.00	6.621	11	7.35	16	9.829
6.50	4.982	11.00	6.930	12	7.71	17	10.19
7.00	5.169	12.00	7.208	13	8.04	18	10.5
7.50	5.343	13.00	7.457	14	8.34	19	10.9
8.00	5.504	14.00	7.680	15	8.62	20	11.2
8.50	5.653	15.00	7.880	16	8.88	22	11.7
9.00	5.790	16.00	8.060	18	9.34	24	12.3
9.50	5.917	18.00	8.365	20	9.73	25	12.5
10.00	6.035	20.00	8.611	22	10.1	31	13.7
11.00	6.246	22.00	8.809	24	10.4	35	14.4
12.00	6.425	24.00	8.968	26	10.6	39	14.9
13.00	6.580	26.00	9.097	28	10.8	51	16.1
14.00	6.712	28.00	9.200	30	11	60	16.6
15.00	6.825	30.00	9.283	34	11.3	70	16.9
16.00	6.922	34.00	9.404	38	11.5	80	17.1
17.00	7.004	38.00	9.481	42	11.6	90	17.3
18.00	7.076	42.00	9.532	46	11.7	100	17.4
20.00	7.189	46.00	9.565	50	11.8	110	17.4
22.00	7.272	50.00	9.586	60	11.9	120	17.5
24.00	7.332	60.00	9.612	70	12	130	17.5

(continued)

الجدول (٢-٩)

$r_{eD}=4.0$		$r_{eD}=4.5$		$r_{eD}=5.0$		$r_{eD}=6$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
26.00	7.377	70.00	9.621	80	12	140	17.5
30.00	7.434	80.00	9.623	90	12	150	17.5
34.00	7.464	90.00	9.624	100	12	160	17.5
38.00	7.481	100.00	9.625	120	12	180	17.5
42.00	7.490					200	17.5
46.00	7.494					220	17.5
50.00	7.499						

$r_{eD}=7$		$r_{eD}=8$		$r_{eD}=9$		$r_{eD}=10$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
9	6.861	9	6.86	10	7.417	15	9.965
9.5	7.127	10	7.4	15	9.945	20	12.32
10	7.389	11	7.92	20	12.26	22	13.22
11	7.902	12	8.43	22	13.13	24	14.95
12	8.397	13	8.93	24	13.98	26	14.95
13	8.876	14	9.42	26	14.79	28	15.78
14	9.341	15	9.9	26	15.59	30	16.59
15	9.791	16	10.4	30	16.35	32	17.38
16	10.23	17	10.8	32	17.1	34	18.16
17	10.65	18	11.3	34	17.82	36	18.91
18	11.06	19	11.7	36	18.52	38	19.65
19	11.46	20	12.1	38	19.19	40	20.37
20	11.85	22	13	40	19.85	42	21.07
22	12.58	24	13.7	42	20.48	44	21.76
24	13.27	26	14.5	44	21.09	46	22.42
26	13.92	28	15.2	46	21.69	48	23.07
28	14.53	30	15.9	48	22.26	50	23.71
30	15.11	34	17	50	22.8	52	24.33
35	16.39	38	18	52	23.4	54	24.94
40	17.49	40	19	54	23.9	56	25.53
45	18.43	45	20	56	24.4	58	26.11
50	19.24	50	21	58	24.9	60	26.67
60	20.51	55	22	60	25.4	65	28.02
70	21.45	60	23	65	26.5	70	29.29
80	22.13	70	25	70	27.5	75	30.49
90	22.63	80	26	75	28.5	80	31.61
100	21	90	27	80	29.4	85	32.67
120	23.47	100	28	85	30.2	90	33.66
140	23.71	120	29	90	30.9	95	34.6
160	23.85	140	30	95	31.6	100	35.48
180	23.92	160	31	100	32.3	120	38.51
200	23.96	180	31	120	34.4	140	40.89

$r_{eD}=7$		$r_{eD}=8$		$r_{eD}=9$		$r_{eD}=10$	
t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}	t_D	W_{eD}
500	24	200	31	140	35.9	160	42.75
		240	31	160	37	180	44.21
		280	31	180	37.9	200	45.36
		320	31	200	38.4	240	46.95
		360	31	240	39.2	280	47.94
		400	32	280	39.6	320	48.54
		500	32	320	39.8	360	48.91
				360	39.9	400	49.14
				400	39.9	440	49.28
				440	40	480	49.36
				480	40		

Table 4.5 Van Everdingen & Hurst aquifer model calculation

Time (yr)	Pressure (psi)	ΔP (psi)	t_D	W_{eD}	W_e
0	p_i		–	–	0
1	p_1	$\Delta p_0=\frac{p_i-p_1}{2}$	t_{D1}	W_{eD1}	W_{e1}
2	p_2	$\Delta p_1=\frac{p_i-p_2}{2}$	t_{D2}	W_{eD2}	W_{e2}
3	p_3	$\Delta p_2=\frac{p_1-p_3}{2}$	t_{D3}	W_{eD3}	W_{e3}
4	p_4	$\Delta p_3=\frac{p_2-p_4}{2}$	t_{D4}	W_{eD4}	W_{e4}
5	p_5	$\Delta p_4=\frac{p_3-p_5}{2}$	t_{D5}	W_{eD5}	W_{e5}
6	p_6	$\Delta p_5=\frac{p_4-p_6}{2}$	t_{D6}	W_{eD6}	W_{e6}

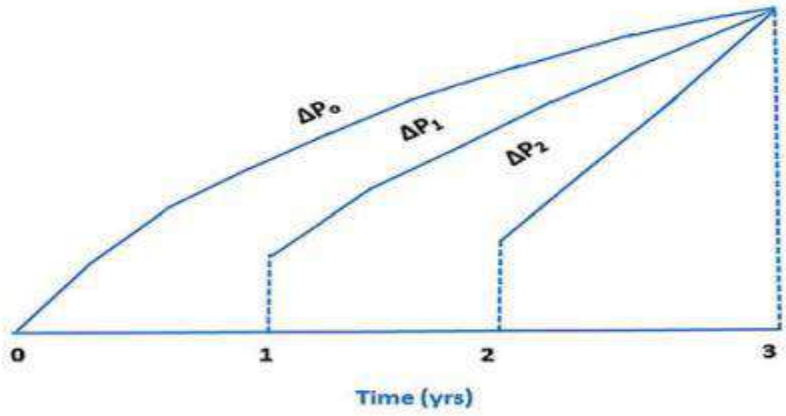
الجداول (٢-١٠)

في نهاية العام الثالث (t=3) فان $w_e(t_3)=w_e(\Delta p_o)+w_e(\Delta p_1)+w_e(\Delta p_2)$

Δp_o نشط لمدة ثلاثة اعوام. $w_e(\Delta p_o)=c.\Delta p_o+w_{eD}\ @t_3$

Δp_1نشط لمدة عامين. $w_e(\Delta p_1)=c.\Delta p_1.w_{eD}@t_2$

Δp_2 نشط لمدة عام واحد. $w_e(\Delta p_2)=c.\Delta p_2 w_{eD}.@t_1$



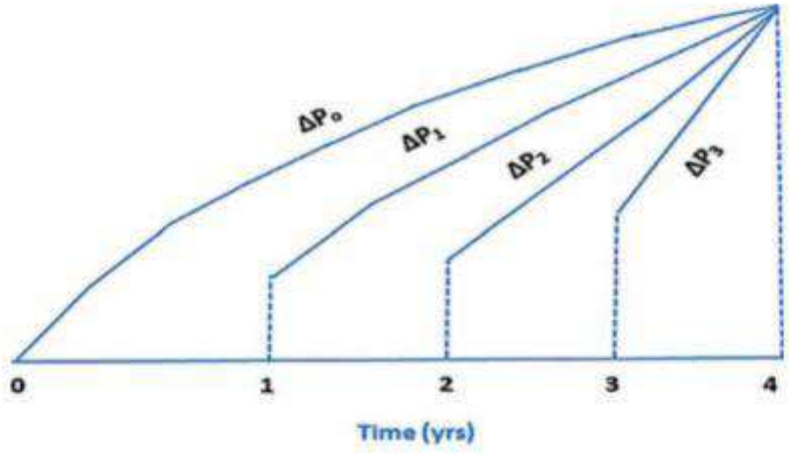
عند نهاية السنة الرابعة (t=4) $w_e(t_4) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2) + w_e(\Delta p_3)$

Δp_o. نشط لمدة اربعة اعوام $w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o.w_{eD}@t_4$

Δp_1 .نشط لمدة ثلاثة اعوام $w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_3$

Δp_2. نشط لمدةعامين $w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2.w_{eD}@t_2$

Δp_3.نشط لمدةعام واحد $w_e(\Delta p_3) = c.\Delta p_3.w_{eD}@t_1$



٢-٣-٥- نموذج كارتر - تريسي :

هذا النموذج هو حل تقريبي لمعادلة الانتشارية مع معادلة توازن المادة المناسبة وذلك للتنبؤ بأدائية المكامن ذات الدفع المائي ويطبق لكل من الطبقات المائية الجوفية المحدودة الفعالية او الفعّالة كما يمكن تطبيقها لكل من الجريان الخطي والجريان الشعاعي للطبقات المائية تطبق فقط للمكامن ذات الدفع المائي وتحسب رياضيا كما يلي:

$$w_e(t_{Dj}) = w_e(t_{Dj-1}) + \left[\frac{c.\Delta p(t_{Dj}) - w_e(t_{Dj-1})p'_D(t_{Dj})}{p_D(t_{Dj}) - (t_{Dj-1})p'_D(t_{Dj})}\right](t_{Dj} - t_{Dj-1}) \qquad (2-22)$$

حيث ان :

C هي ثابت تدفق الماء لفان افريدينجن–هورست.

t_D الزمن اللابعدي.

$p_D; p'_D$ مشتق الضغط اللابعدي والضغط اللابعدي على الترتيب.

j ;j−1 مؤشر الزمن المصحح ومؤشر الزمن المصحح للمرحلة (الخطوة) السابقة.

الضغوط اللابعدية ومشتقاتها والزمن اللابعدي تعطى كما يلي:

$$t_{Dj} = \frac{0.000264\ k\ t(t\ in\ hours)}{\mu_w . \emptyset_w . c_{tw} . r_e^2} \qquad (2-23)$$

$$\Delta p_n = p_i - p_n \ \ ;;\ \ p_D(t_D) = \sqrt[2]{\frac{t_D}{\pi}}\ ;;\ t_D \le 0.01 (2-24)$$

$$P_d(t_D) = \frac{370.529\sqrt{t_D} + 137.582 t_D + 5.69549 t_D^{1.5}}{328.834 + 265.488\sqrt{t_D} + 45.2157 t_D + t_D^{1.5}}\ ;; 0.01 < t_D < 500 \qquad (2-25)$$

$$P_D(t_D) = \left[\frac{1}{2}\ln t_D + 40454\right]\left[1 + \frac{1}{2t_D} + \frac{1}{4t_D}\right];;\ \ t_D \ge 500 \qquad (2-26)$$

$$p'_D(t_D) = \frac{1}{\sqrt{\pi t_D}} \ \ ;;\ t_D \le 0.01 \qquad (2-27)$$

$$P'_D(t_D) = \frac{716.441 + 46.7984\sqrt{t_D} + 270.038 t_D + 71.0098 t_D^{15}}{1269.86\sqrt{t_D} + 1204.73 t_D + 618.618 t_D^{1.5} + 538.072 t_D^2 + 142.41 t_D^{2.5}} \qquad (2-28)$$

$$0.01 < t_D < 500$$

$$p'_D(t_D) = \left[\frac{1}{2}\ln t_D + 40454\right]\left[\frac{1}{2t_D} - \frac{1}{2t_D^2}\right] \quad ;;\ t_D \ge 500 \qquad (2-29)$$

خطوات الحساب وفق نموذج كارتر –تريسي:

الخطوة الاولى: يتم حساب الانخفاض الكلي للضغط عند كل مرحلة من الزمن|.

الخطوة الثانية : يتم حساب الازمنة اللابعدية عند كل مرحلة من الزمن.

الخطوة الثالثة: يتم حساب الضغوط اللابعدية ومشتقاتها عند كل زمن.

الخطوة الرابعة : يتم حساب تدفق المياه عند كل زمن.

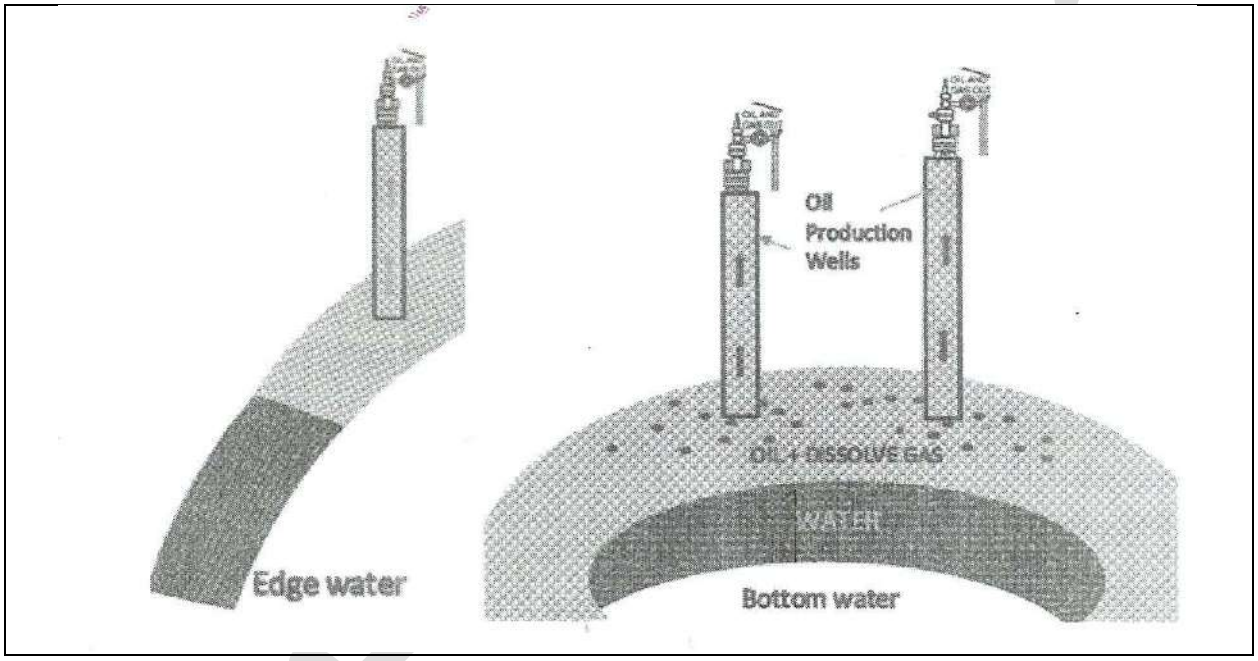
الجدول التالي رقم (٢−١١) يبين كيفية الحساب وفق نموذج كارتر – تريسي.

Time (yr)	Pressure (psi)	t_{Dj}	$\Delta P(t_{Dj})$ (psi)	$P_D(t_{Dj})$	$P'_D(t_{Dj})$	$W_e(t_{Dj})$
0	P_i	-	-	-	-	0
1	P_1	t_{D1}	$\Delta P(t_{D1}) = P_i - P_1$	$P_D(t_{D1})$	$P'_D(t_{D1})$	$W_e(t_{D1})$
2	P_2	t_{D2}	$\Delta P(t_{D2}) = P_i - P_2$	$P_D(t_{D2})$	$P'_D(t_{D2})$	$W_e(t_{D2})$
3	P_3	t_{D3}	$\Delta P(t_{D3}) = P_i - P_3$	$P_D(t_{D3})$	$P'_D(t_{D3})$	$W_e(t_{D3})$
4	P_4	t_{D4}	$\Delta P(t_{D4}) = P_i - P_4$	$P_D(t_{D4})$	$P'_D(t_{D4})$	$W_e(t_{D4})$
5	P_5	t_{D5}	$\Delta P(t_{D5}) = P_i - P_5$	$P_D(t_{D5})$	$P'_D(t_{D5})$	$W_e(t_{D5})$
6	P_6	t_{D6}	$\Delta P(t_{D6}) = P_i - P_6$	$P_D(t_{D6})$	$P'_D(t_{D6})$	$W_e(t_{D6})$

الجدول (٢−١١)

٢-٣-٦- نموذج تدفق المياه لفيتكوفيتش:

وضع فيتكوفيتش (١٩٧١) نموذجا بسيطا لحسابات تدفق المياه حيث يستخدم تدفق المياه بالحالة المستقرة الزائفة وتوازن المادة للطبقة المائية لا عادة تعريف انضغاطية المنظومة ادخل فيتكوفيتش بحساباته فترة الزمن الانتقالي ولاحظ ان كمية تدفق المياه المحسوبة بالطرق السابقة اقل من القيم الفعلية لها. وهذا النموذج قابل للتطبيق لكلمن الجريانات الخطية والشعاعية ويطبق للمكامن ذات الدفع المائي الجانبي والقاعدي كما يظهر بالشكل رقم (٢-٣) .



الشكل (٢-٣) نماذج المياه في المكامن النفطية

يستخدم فيتكوفيتش معادلة بسيطة لتدفق المائع من المكمن الى البئر ولنموذج تدفق المياه الى المكمن ، وافترض ان معدل تدفق المياه بالعلاقة مع الضغط وفي حدود الطبقة المائية يحسب من العلاقة التالية :

$$q = j.\Delta p \qquad (2-30)$$

وللمياه نكتب:

$$q_w = j(\overline{p_a} - p) = \frac{dw_e}{dt} \qquad (2-31)$$

حيث ان معامل الانتاجية للطبقة المائية عند الحالة المستقرة الزائفة يحسب كما يلي:

$$j = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times f \times k \times h}{\mu_w \left[\ln\left(\frac{r_a}{r_e} - 0.75\right)\right]} \qquad (2-32)$$

حيث ان :

q_w معدل تدفق المياه.

j معامل انتاجية الطبقة المائية.

p_a ,pالضغط على خط التقاء النفط مع الماء ومتوسط الضغط بالمنطقة المائية على الترتيب.

w_e الانتاج التراكمي من المياه.

التدفق الكلي للمياه عند الانخفاض الكلي للضغط هو :

$$w_e = c_t.w_i(p_i - \overline{p_a}) = c_t.w_i.p_i - c_t.w_i.\overline{p_a} \qquad (2-33)$$

$$\overline{p_a} = \frac{c_t.w_i.p_i - w_e}{c_t.w_i} = \frac{c_t.w_i.p_i}{c_t.w_i} - \frac{w_e}{c_t.w_i} =$$

$$\overline{p_a} = p_i - \frac{w_e}{c_t.w_i.} = p_i\left[1 - \frac{w_e}{c_t.w_i.p_i}\right] = p_i\left[1 - \frac{w_e}{w_{ei}}\right] \qquad (2-34)$$

حيث ان :

$$w_{ei} = c_t.w_i.p_i \qquad (2-35)$$

$$w_i = \frac{\pi(r_a^2 - r_e^2)h.\emptyset}{5.615} \,,, f = \frac{\theta}{360} \qquad (2-36)$$

وبناء على ذلك يحسب الحجم الاولي للماء المتواجد في الطبقة المائية كما يلي:

$$w_{ei} = \frac{f.\pi.\bar{c}(r_a^2 - r_e^2)h.\emptyset.p_i}{5.615} \qquad (2-37)$$

وبمفاضلة p_a و w_e المعادلة (٢-٢٨) بالنسبة للزمن نحصل على:

$$\frac{d\bar{p}_a}{dt} = p_i\left[0 - \frac{1}{w_{ei}}\frac{dw_e}{dt}\right] = \frac{p_i}{w_{ei}}\frac{dw_e}{dt} \Rightarrow \frac{dw_e}{dt} = \frac{w_{ei}}{p_i}\frac{d\bar{p}_a}{dt} \qquad (2-38)$$

نعوض من المعادلة (٢-٣٨) في المعادلة (٢-٣٠) نحصل على:

$$j(\bar{p}_a - p) = \frac{dw_e}{dt} = -\frac{w_{ei}}{dt}\frac{d\bar{p}_a}{dt} \Rightarrow \frac{d\bar{p}_a}{(p_{a-p})} = -\frac{j\,.p_i}{w_{ei}}dt \qquad (2-39)$$

نكامل المعادلة (٢-٣٩) بالنسبة للزمن فنحصل على:

$$\ln(\bar{p}_a - p) = -\frac{j.p_i.t}{w_{ei}} + c \qquad (2-40)$$

حيث يمكن تحديد الثابت C عند الشروط الاولية التالية :

$$\bar{p}_a = p_i \quad ;; \quad w_e = 0 \;;; \quad t = 0$$

$$\ln(p_i - p) = -\frac{j \times p_i \times 0}{w_{ei}} + c \Rightarrow c = \ln(p_i - p) \qquad (2-41)$$

نعوض من المعادلة (٢-٤١) في المعادلة (٢-٤٠) فنحصل على:

$$\ln(\bar{p}_a - p) = -\frac{j.p_i.t}{w_{ei}} + \ln(p_i - p) \Rightarrow \ln(\bar{p}_a - p) - \ln(p_i - p) = -\frac{j.p_i.t}{w_{ei}} \Rightarrow$$

$$\ln\left[\frac{(\bar{p}_a - p)}{(p_i - p)}\right] = -\frac{j.p_i.t}{w_{ei}} \Rightarrow \frac{(\overline{p_a} - p)}{p_i - p} = e^{\frac{-j.p_i}{w_{ei}}} \Rightarrow (\bar{p}_a - p) = (p_i - p)e^{\frac{-j.p_i.t}{w_{ei}}} \qquad (2-42)$$

نعوض المعادلة (٢-٤٢) في المعادلة (٢-٤١) فنحصل على :

$$\frac{dw_e}{dt} = \mathrm{j}(\bar{p}_a - p) = j(p_i - p).e^{\frac{-jp_i t}{w_{ei}}}$$

نكامل بالنسبة للزمن فنحصل على:

$$w_e = \frac{w_{ei}}{p_i}(p_i - p)\left(1 - e^{\frac{-j.t.p_i}{w_{ei}}}\right) \qquad (2-43)$$

وبذلك فان المعادلة العامة للتدفق التراكمي للمياه بالعلاقة مع الزمن هي:

$$\Delta w_e{}_n^k = \frac{w_{ei}}{p_i}(\bar{p}_{n-1} - \bar{p}_n)\left(1 - e^{-\frac{j.p_i.\Delta t_n}{w_{ei}}}\right) \qquad (2-44)$$

$\bar{p}_n$ متوسط ضغط المكمن النهائي ويحسب كما يلي: $\bar{p}_n = \frac{p_{n-1}+p_n}{2}$

$\bar{p}_{n-1}$ متوسط ضغط الطبقة المائية عند نهاية الفترة الزمنية المذكورة ويحسب كما يلي:

$$\bar{p}_{a(n-1)} = p_i\left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} w_{ej}}{w_{ei}}\right);; \sum_{j=1}^{n-1} w_{ej} = w_{e1} + w_{e2} + \cdots \ldots \ldots \ldots \qquad (2-45)$$

$$w_{en}^k = \sum_{j=1}^{n-1}\left(\Delta w_{ej} + \Delta w_{en}^k\right) \qquad (2-46)$$

وخطوات الحساب في الجدول (٢-١٢) التالي:

الزمن (عام)	P psi	$\bar{P}_a \quad (psi)$	$\bar{p}_{a(n-1)} \quad (psi)$	$\bar{p}_{a(n-1)} - \bar{p}_n$ psi	Δw_e	w_e
0	Pi	Pi	Pi	0	0	$\Delta w_e = 0$
1	P1	$\bar{p}_{n1} = \frac{p_i + p_1}{2}$	$\bar{p}_{a1} = p_i\left(1 - \frac{w_{e0}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a1} - p_{n1}$	Δw_{e1}	w_{e1}
2	P2	$\bar{p}_{n2} = \frac{p_1 + p_2}{2}$	$\bar{p}_{a2} = p_i\left(1 - \frac{w_{e1}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a2} - p_{n2}$	Δw_{e2}	w_{e2}
3	P3	$\bar{p}_{n3} = \frac{p_2 + p_3}{2}$	$\bar{p}_{a3} = p_i\left(1 - \frac{w_{e2}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a3} - p_{n3}$	Δw_{e3}	w_{e3}
4	P4	$\bar{p}_{n4} = \frac{p_3 + p_4}{2}$	$\bar{p}_{a4} = p_i\left(1 - \frac{w_{e3}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a4} - p_{n4}$	Δw_{e4}	w_{e4}
5	P5	$\bar{p}_{n5} = \frac{p_4 + p_5}{2}$	$\bar{p}_{a5} = p_i\left(1 - \frac{w_{e4}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a5} - p_{n5}$	Δw_{e5}	w_{e5}
6	P6	$\bar{p}_{n6} = \frac{p_5 + p_6}{2}$	$\bar{p}_{a6} = p_i\left(1 - \frac{w_{e5}}{w_{ei}}\right)$	$\bar{p}_{a6} - p_{n6}$	Δw_{e6}	w_{e6}

الجدول (٢-١٢)

$$w_{e1} = \Delta w_{e1}$$
$$w_{e2} = \Delta w_{e1} + \Delta w_{e2}$$
$$w_{e3} = \Delta w_{e1} + \Delta w_{e2} + \Delta w_{e3}$$
$$w_{e4} = \Delta w_{e1} + \Delta w_{e2} + \Delta w_{e3} + \Delta w_{e4}$$
$$w_{e5} = \Delta w_{e1} + \Delta w_{e2} + \Delta w_{e3} + \Delta w_{e4} + \Delta w_{e5}$$
$$w_{e6} = \Delta w_{e1} + \Delta w_{e2} + \Delta w_{e3} + \Delta w_{e4} + \Delta w_{e5} + \Delta w_{e6}$$

د. ايمن شقوف

الفصل الثالث

الحساب الهيدروديناميكي للإنتاجية والضغط قبل وبعد عبور الماء عند نظام دفع الماء القاسي للطبقات المتجانسة مع عدم الاخذ بعين الاعتبار اختلاف لزوجة النفط والماء

١-٣- المكمن المستطيلي (نظام السائل وحيد الطور):

عند استثمار الحقول النفطية بنظام دفع الماء يحصل احيانا ارتشاح السوائل في الوسط المسامي نتيجة لمرونتها وهذا يتم غالبا عند الارتشاح غير المستقر، وبما ان عملية الاستثمار بطيئة نسبيا فيمكن اهمال مرونة السوائل والطبقة عند حل المسائل الموضوعة اعتمادا على نظام دفع الماء القاسي. لهذا تم التفكير بتطوير طرق حساب المؤشرات التكنولوجية وذلك بوضع نماذج رياضية قريبة من الظروف الحقيقية للحقول النفطية لهذا تعتبر طريقة المقاومات الارتشاحية المكافئة هي الاساس للطريقة التحليلية لتحديد العلاقة بين انتاجيات الآبار والضغوط عند قاع هذه الابار وعلى كونتور التغذية او خط الحقن في شروط نظام دفع الماء القاسي.

ينحصر جوهر هذه الطريقة في تبديل مقاومة الارتشاح الكاملة للتيار الحقيقي للسوائل ذات الوضع المعقد بمقاومات مكافئة على التسلسل او التفرع لتيارات ابسط مستقيمة (متوازية أو قطرية). وبتوحيد ابار كل مجموعة على المخطط بخطوط تمر عبر مراكزها سنحصل بدلا من صفوف الابار على قناة ،ويكون شكل هذه القناة مستقيما او دائريا او غير ذلك.

ان تيار السائل المرتشح في الطبقة بين هذه القنوات سيكون ابسط بكثير من التيار نحو الصفوف الحقيقية او نحو شبكات الابار، الا ان تغير التيار الحقيقي لارتشاح السائل بين القنوات يعطي اخطاء ليست قليلة عند حساب مقاومات الارتشاح، لذا يتم ادخال مفهوم مقاومات الارتشاح بصيغة مقاومات داخلية لصفوف الابار بالإضافة الى المقاومات الخارجية وهي مقاومات الارتشاح بين الكونتورات وخطوط توزع الصفوف.

باستخدام قوانين اوم وكيرشوف من السهولة كتابة الانظمة الحسابية للمعادلات التي تحدد

انتاجيات الابار والصفوف عندما تكون ضغوط القاع معروفة وبالعكس.

ان مبدا التشابه الكهربائي الهيدروديناميكي هو: ان شدة التيار الكهربائي توافق الانتاجية وفرق الجهد يقابل فرق الضغط وكذلك المقاومة الكهربائية للناقل توافق مقاومة الارتشاح للطبقة.

وهذا المبدأ يمكن اظهاره بسهولة من تحليل صيغ قوانين دارسي او ديوبي وقانون اوم .

ان انتاجية البئر الواحد الكائن في صف يحتوي على عدد لانهائي من الابار في المكمن المستطيلي عند النظام المستقر وبوجود سائل متجانس وغير قابل للانضغاط يمكن تعيينها بالعلاقة التالية :

$$q = \frac{2\,\pi\,k\,h\,(p_k - p_w)}{\mu\left(\ln 2\ .\ sh\ \frac{\pi.l}{\sigma} + \ln\frac{\sigma}{\pi.r_w}\right)} \qquad (3-1)$$

حيث ان:

k نفوذية الطبقة ، h سماكة الطبقة ، μ لزوجة السائل ، sh الجيب القطعي

p_k، p_w ضغط الكونتور وضغط قاع البئر على التوالي.

σ, l المسافة بين الكونتور وصف الابار و نصف المسافة بين بئرين متجاورين على التوالي

r_w نصف قطر البئر.

في الحالة العامة لاستثمار الحقول النفطية التي غالبا ما تكون L≥σ

المعادلة (٣-١) بإمكاننا تبسيطها ، حيث وبدقة عالية يمكن ان نكتب:

$$\ln 2\ \ sh\ \frac{\pi\,l}{\sigma} \approx \frac{\pi\,l}{\sigma}\ \ ;;\ sh(\pi) = \frac{e^{\pi} - e^{-\pi}}{2} \approx \frac{e^{\pi}}{2}$$

بتعويض هذه القيمة بالمعادلة (٣-١) وبضرب المقام والبسط بالقيمة $\frac{\sigma}{\pi}$ نحصل على:

$$q = \frac{2\,\sigma\,k\,h(p_k - p_w)}{\mu\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)} = \frac{p_k - p_w}{\frac{\mu}{k\,h(2\sigma)}l + \frac{\mu}{2\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma/\pi}{r_w}} = \frac{\Delta p}{\Omega + \omega} \qquad (3-2)$$

$$\Omega = \frac{\mu}{k\,h\,(2\sigma)}\,l \quad ;; \quad \omega = \frac{\mu}{2\,\pi k\,h}\ln\frac{\sigma/\pi}{r_w}$$

حيث ان :

* Ω مقاومة الارتشاح الخارجية وهي مقاومة الارتشاح في الطبقة المستطيلة في الجزء ذي الطول L من كونتور الطبقة وحتى صف الابار (القناة) ، اما سطح الارتشاح لكل بئر من الصف فيساوي حاصل جداء سماكة الطبقة h الطول σ٢ والذي يساوي المسافة بين الابار
* **ω** مقاومة الارتشاح الداخلية التي تاخذ بعين الاعتبار زيادة مقاومة تيار السائل الى البئر.

اذا حذف الجزء من مقام المعادلة (٣-٢) الموجود ضمن القوسين نحصل على معادلة تمثل انتاجية القناة ذات الطول 2σ وبالأحرى المسافة بين بئرين.

وعلى هذا الاساس فان الجزء من المعادلة (٣-٢) الموجود ضمن القوسين بمقام المعادلة سيحقق تقريبا التدفق الجزئي للسائل بين كونتور التغذية وخط توزع صف الابار في المكمن المستطيلي. ولكن في الواقع ان السائل لا يتدفق الى القناة فقط وانما الى البئر الذي نصف قطره r_w حيث ان هذا الجزء الاضافي لتدفق السائل من القناة الى البئر سيعطي مقاومة اضافية تعاكس التدفق مما يؤدي الى تخفيض الانتاجية.

لفهم الفكرة الهندسية للمقاومة الداخلية نفترض ان الجريان الدائري حول البئر داخل المنطقة القاعية الدائرية يمثل المحيط الذي يساوي طول القناة σ٢ عندئذ فنصف قطر هذا المجال سيكون مساويا :

$$r_k = \frac{2\sigma}{2\pi} = \frac{\sigma}{\pi}$$

لنرمز للضغط على هذا الكونتور غير المعروف بالرمز p عندئذ فيمكننا كتابة الانتاجية بالشكل

التالي:

$$q = \frac{2\,\pi\,k\,h\,(p - p_w)}{\mu.\ln\frac{\sigma}{\pi.r_w}} \qquad (3-3)$$

وبضرب البسط والمقام بالقيمة $\frac{\sigma}{\pi}$ نحصل على:

$$q = \frac{2\,\sigma\,k\,h\,(p - p_w)}{\mu\,\frac{\sigma}{\pi}.\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}} \qquad (3-4)$$

لتدفق السائل من الكونتور الاساسي والى صف الابار على الخط الذي ضغطه يساوي p

بإمكاننا كتابة العلاقة التالية:

$$q = \frac{2\,\sigma\,k\,h\,(p_k - p)}{\mu.\,l} \qquad (3-5)$$

وبما ان الانتاجية في جميع مقاطع انابيب التدفق عند نظام دفع الماء القاسي متساوية لذا من الممكن مساواة الاطراف اليمينية للمعادلتين (٣-٤) و (٣-٥) ومنه نحصل على:

$$\frac{p_k - p}{p - p_w} = \frac{l}{\frac{\sigma}{\pi}.\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}} \qquad (3-6)$$

بإضافة (١) الى طرفي المعادلة نحصل على:

$$\frac{p_k - p}{p - p_w} + 1 = 1 + \frac{l}{\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}} \Rightarrow \frac{p_k - p + p - p_w}{p - p_w} = \frac{l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}}{\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}} \Rightarrow$$

$$p - p_w = (p_k - p_w)\left(\frac{\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}}{l + \frac{\sigma}{\pi r_w}}\right)$$

بتعويض هذه العلاقة بالمعادلة (٣-٤) نحصل على:

$$q = \frac{2\sigma\, k\, h\, (p_k - p_w)}{\mu\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}\right)} \qquad (3-7)$$

مما سبق يتبين انه تم التوصل بهذه الطريقة السهلة الى نفس المعادلة (٣-٢) والتي توصلوا اليها بطرق صعبة جدا . وكذلك واعتمادا على قانون اوم وبمقارنته مع قانون دارسي يمكننا التوصل ايضا الى المعادلة السابقة وذلك على النحو التالي:

المقاومة الخارجية للجريان تساوي : $\frac{\mu\, l}{2\,\sigma\, k\, h}$

المقاومة الداخلية للجريان تساوي: $\frac{\mu}{2\sigma\, k\, h}\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}$

وبما ان هاتين المقاومتين موصولتان على التسلسل لذلك فالمقاومة الكلية تساوي مجموعهما:

$$\frac{\mu}{2\sigma k\, h}\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}\right)$$

وبالتالي فان انتاجية البئر لكل النظام ستكون مساوية:

$$q = \frac{p_k - p_w}{\frac{\mu}{2\sigma kh}\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}\right)} = \frac{2\sigma kh(p_k - p_w)}{\mu\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi p_w}\right)}$$

ان المعادلة هذه والتي تمثل انتاجية بئر واحد في مكمن مستطيلي لانهائي (غير محدود) تصلح حتى للمكمن المحدد ذي الطول s فيما اذا كان المكمن محددا من طرفيه بطبقة غير نفوذة عمودية على صف الابار ، وعندئذ فإنتاجية عدد n من الابار للصف المعين ستمثل:

$$Q = n.q = \frac{s}{2\sigma}\cdot\frac{2\sigma kh(p_k - p_w)}{\mu\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}\right)} = \frac{s\, k\, h(p_k - p_w)}{\mu\left(l + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}\right)} \qquad (3-8)$$

مما سبق نستنتج انه باستخدام المقارنة بين قانون دارسي وقانون اوم يمكن الحصول على نفس النتيجة السابقة للإنتاجية، لذا واعتمادا على هذه النتيجة يمكننا القول ان المقاومة الخارجية

للجريان(لصف الابار) في المكمن المستطيلي والذي عرضه يساوي s تساوي الى :

$$\Omega=\frac{\mu}{s\,k\,h}\,.\,l$$

المقاومة الداخلية للجريان لبئر واحد من صف الابار تساوي:

$$\omega=\frac{\mu}{2\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma}{\pi r_w}$$

وبما ان المقاومة الداخلية لآبار الصف الواحد متساوية وموصولة على التفرع فان المقاومة الكلية للصف تساوي مقاومة بئر واحد مقسومة على عدد الابار في الصف:

$$\omega=(\frac{\mu}{2\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w})\div\frac{s}{2\sigma}=\frac{\mu}{s\,k\,h}\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}$$

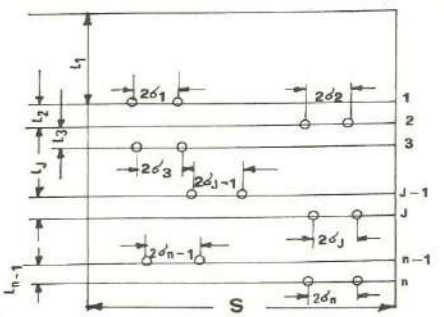
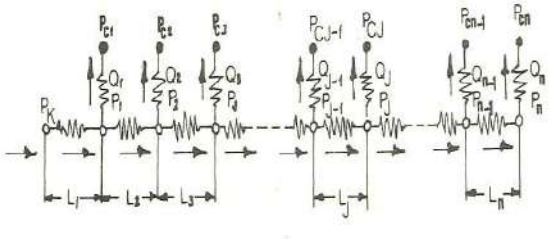
وبجمع المقاومة الداخلية والخارجية لكامل الصف نحصل على:

$$\Omega+\omega=\frac{\mu}{s\,k\,h}l+\frac{\mu}{s\,kh}\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}=\frac{\mu}{s\,k\,h}\left(l+\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)$$

وبالتالي فان انتاجية الصف تكتب بالعلاقة التالية:

$$Q=\frac{\Delta p}{\Omega+\omega}=\frac{skh(p_k-p_w)}{\mu\left(l+\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)}\qquad(3-9)$$

نطبق ما ذكرناه على n صف من الآبار في الحالة العامة عندما يكون ضغط القاع في الآبار متساو، والمسافة بين الابار في الصف الواحد متساوية، كما ان انصاف اقطار الآبار في كل صف متساوية، ولكن في صفوف أخرى ستكون مختلفة. انظر الشكل (٣-١).

	
الشكل (٣-١) توزع الابار في المكمن النفطي المستطيلي	الشكل (٣-٢) الرسم التخطيطي لجريان السائل في المكمن المستطيلي حسب نظرية التطابق الهيدروديناميكي الكهربائي

تمثل الاجزاء الافقية في الشكل (٣-٢) المقاومات الخارجية من كونتور التغذية ذي الضغط p_k والى الصف الاول ذي الضغط الوسطي P_1 ومن الصف الاول الى الصف الثاني ذي الضغط P_2 وهكذا. اما الاجزاء العمودية فتمثل المقاومات الداخلية لصفوف الابار(الشكل (٣-٢)).

اعتمادا على ماسبق وللجزء المختار بين الصفين (j)و$(1-j)$ يمكن كتابة المعادلة الاتية:

$$\sum_{i=j}^{i=n} Q_i = \frac{p_{i-1} - p_i}{\frac{\mu}{s\,k\,h}\,.\,l_i} \qquad (3-10)$$

يجب الاخذ بعين الاعتبار انه عند كونتور التغذية يكون :

$$p_k = p_w \quad \text{و} \quad \sigma = 0$$

٢-٣- المكمن الدائري (النظام وحيد الطور):

ان المعادلة التقريبية لتعيين الانتاجية او الضغط لصفوف ابار تستثمر سوية في مكمن دائري عند نظام دفع الماء القاسي للطبقة بإمكاننا استخراجها كما هو الحال عند المكمن المستطيلي.

بما ان **المقاومة الداخلية** لصف الابار لا تتعلق بأبعاد المجال الخارجي وبشكل توزع خط الابار وانما **تتعلق بالمسافة بين الابار في الصف وبنصف قطر البئر** ، لذا ففي المكمن الدائري يجب تغيير المعادلة التي تمثل المقاومة الخارجية فقط.

بدلا من جريان السائل الى القناة المستقيمة سيكون الجريان في مثل هذه الحالة من كونتور التغذية الدائري الى القناة الدائرية، لذا يمكننا كتابة المقاومة الخارجية بالشكل التالي:

$$\Omega=\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{R_k}{R}$$

حيث ان:

R_k نصف قطر كونتور التغذية.

R نصف قطر صف الابار.

انظر الشكل (٣-٣). اذا رتبنا المقاومات على التسلسل عندها تكون المقاومة الداخلية للصف مساوية لمقاومة البئر مقسومة على عدد الابار اي :

المقاومة الداخلية للبئر تساوي : $\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}$

عدد الابار في الصف يساوي : $n=\frac{2\,\pi\,R}{2\sigma}=\frac{\pi\,R}{\sigma}$

المقاومة الداخلية للصف تساوي : $\omega=\frac{\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}}{\frac{\pi\,R}{\sigma}}=\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h\,\pi\,R}\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}$

بجمع المقاومتين الداخلية والخارجية للصف الواحد نحصل على:

$$\Omega+\omega=\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{R_k}{R}+\frac{\mu}{2\,\pi\,kh}\frac{\sigma}{\pi\,R}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}=\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\left(\ln\frac{R_k}{R}+\frac{\sigma}{\pi\,R}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)$$

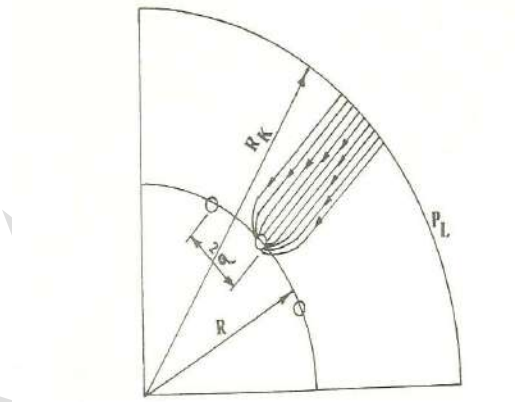
وبالتالي فان انتاجية الصف الواحد من الابار تساوي:

$$Q=\frac{\Delta p}{\Omega+\omega}=\frac{2\,\pi\,k\,h\,(p_R-p_w)}{\mu\left(\ln\frac{R_k}{R}+\frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)} \qquad (3-11)$$

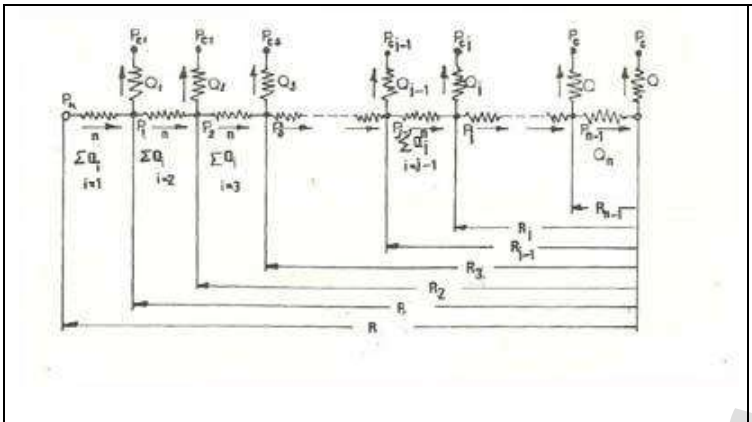
اما انتاجية البئر الواحدة فستكون مساوية :

$$q = \frac{Q}{n} = \frac{Q}{\frac{\pi R}{\sigma}} = \frac{2\,\sigma\,k\,h\,(p_R - p_w)}{\mu.R\left(\frac{R_k}{R} + \frac{\sigma}{\pi}\ln\frac{\sigma}{\pi\,r_w}\right)} \qquad (3-12)$$

الرسم التخطيطي لتدفق السائل لعدة صفوف من الابار والمرسوم اعتمادا على نظرية التطابق الهيدروديناميكي الكهربائي للمكمن المستطيلي يمكن تطبيقه ايضا للمكمن الدائري(الشكل٣-٤)



الشكل(٣-٣) الرسم التخطيطي للجريان الحقيقي الى صف الآبار الدائري



الشكل (٣-٤) الرسم التخطيطي لجريان السائل الى المكمن الدائري حسب نظرية التطابق الهيدروديناميكي الكهربائي

اعتمادا عما سبق فانه للجزء الاختياري بين $j-1$ و j يمكننا كتابة المعادلة التالية:

$$\sum_{i=j}^{i=n} Q_i = \frac{p_{j-1} - p_j}{\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{R_{j-1}}{R_j}} \qquad (3-13)$$

تعين انتاجية الصف الواحد بالشكل التالي:

$$Q_{J-1} = q_{j-1}.n_{j-1} = \frac{2\,\pi\,k\,h\left(p_{j-1} - p_{w_{j-1}}\right)}{\mu\,\ln\frac{\sigma_{j-1}}{\pi r_{w_{j-1}}}} \cdot \frac{2\pi p_{j-1}}{2\sigma_{j-1}}$$

وبنفس الطريقة نعين:

$$Q_j = \frac{2\,\pi\,k\,h\left(p_j - p_{w_j}\right)}{\mu\,\ln\frac{\sigma_j}{\pi\,r_{w_j}}}\frac{2\,\pi\,R_j}{2\,\sigma_j}$$

كما يمكن توحيد معادلتي المكمن المستطيلي والمكمن الدائري بالشكل التالي:

$$p_{w_{j-1}} - p_{w_j} = \Omega_j \sum_{i=j}^{i=n} Q_i + Q_j\omega_j - Q_{j-1}\omega_{j-1} \qquad (3-14)$$

حيث ان:

Ω_i هي المقاومة الخارجية بين الصف (j−1) والصف J

$\boldsymbol{\omega}_j$ هي المقاومة الداخلية للصف j

$\boldsymbol{\omega}_{j-1}$ هي المقاومة الداخلية للصف j−1

حيث انه للمكمن المستطيلي $\Omega_j = \frac{\mu}{s\,k\,h} l_j$

وللمكمن الدائري: $\Omega_{j-1} = \frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{R_{j-1}}{R_j}$

وللمكمن المستطيلي والدائري نكتب:

$$\omega_j = \frac{1}{n_j}\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma_j}{\pi r_{w_{j-1}}}$$

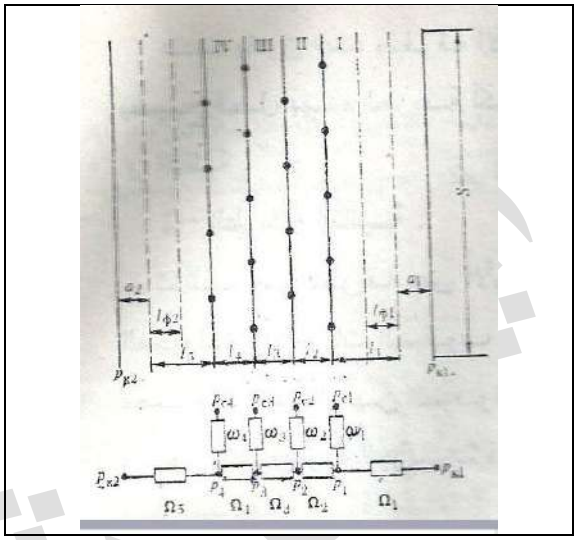
$$\omega_{j-1} = \frac{1}{n_{j-1}}\frac{\mu}{2\,\pi\,k\,h}\ln\frac{\sigma_{j-1}}{\pi r_{w_{j-1}}}$$

٣-٣- الدفع ثنائي الاتجاه:

يمكن ان تعمل صفوف الابار ايضا عند التغذية ثنائية الاتجاه ويحصل ذلك في المكمن الدائري عند **الحقن من مركز المكمن** وعندما تكون **المياه الجانبية فعالة** ، حيث يصبح دفع النفط الى

صفوف ابار الانتاج من اتجاهين ، اما للمكمن المستطيلي عند الدفع ثنائي الاتجاه يكون تأثير المياه الجانبية فعالا من اتجاهين. وعند الدفع ثنائي الاتجاه فان احد صفوف الابار وغالبا المركزي يتعرض للسائل من اتجاهين متعاكسين.

ان وضع المعادلات لهذه الحالة يمكن ان يتم بثلاث طرق ، ولتوضيح عملية صياغة هذه المعادلات نأخذ مكمنا مستطيلا يتكون من اربعة صفوف انتاجية وتغذية تتم من اتجاهين كما في الشكل (٣-٥).



الشكل (٣-٥) يمثل مكمنا يخضع لدفع ثنائي الاتجاه

وسنكتفي بطريقة واحدة وهي طريقة بايشيفوشفيدلر ففي هذه الطريقة تتشكل المعادلات بالاعتماد على قانون كيرشوف الاول حيث $\sum Q_i = 0$ أي ان قيم التيارات الداخلة الى عقدة ما تساوي قيم التيارات الخارجة منها ، من المخطط السابق الشكل (٤-٧) نجد ان لدينا اربع عقد :

$$\frac{p_{k1}-p_1}{\Omega_1}=\frac{p_1-p_{w1}}{\omega_1}+\frac{p_1-p_2}{\Omega_2} \quad ;; \quad \frac{p_1-p_2}{\Omega_2}=\frac{p_2-p_{w2}}{\omega_2}+\frac{p_2-p_3}{\Omega_3} \qquad (3-15)$$

$$\frac{p_2-p_3}{\Omega_3}=\frac{p_3-p_{w3}}{\omega_3}+\frac{p_3-p_4}{\Omega_4} \quad ;; \quad \frac{p_{k2}-p_4}{\Omega_4}=\frac{p_4-p_{w4}}{\omega_4}+\frac{p_4-p_5}{\Omega_5} \qquad (3-15)$$

يتم الحل باستبعاد المجاهيل بالتتابع ثم نقوم بتقسيم فرق الضغط بين خط الصف وقيعان الابار للصف المدروس على مقاومة الارتشاح الداخلية للصف فنحصل على انتاجية الصف ومن ثم إنتاجية كل بئر.

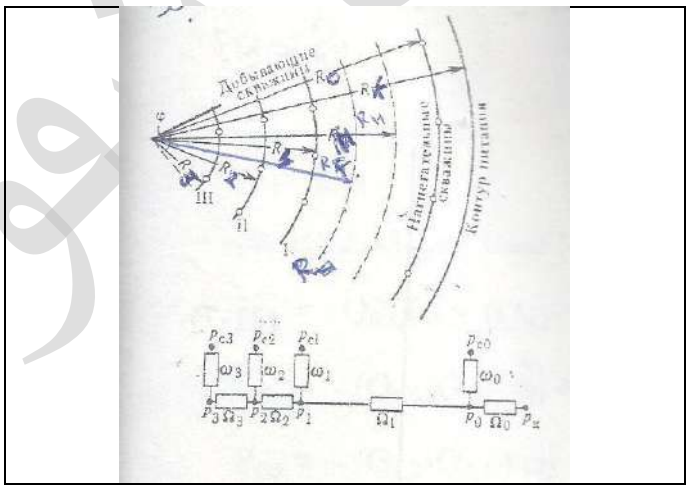
من مجموعة المعادلات (٣-١٥) يمكننا تحديد الضغوط الوسطية لصفوف الآبار أيضا

$$\dots\dots\dots\dots, p_4, p_3, p_2, p_1$$

اذا كان مخطط صفوف الابار متماثلا في الاتجاهين وعدد الصفوف زوجي فيمكن اجراء الحسابات لنصف هذه الصفوف ومن ثم تصميمها لكامل النظام ، اما اذا كان عدد الصفوف فرديا فيتم تقسيم الصف الأوسط إلى نصفين وإجراء الحسابات بعد مضاعفة مقاومة الارتشاح لهذا الصف .

اذا كانت الناقلية الهيدروديناميكية $\varepsilon = \frac{k\,h}{\mu}$ في الطبقة غير متساوية في جميع أجزائها فان مقاومة الارتشاح لهذه الأجزاء تساوي مجموع مقاومات هذه الأجزاء.

لندرس حالة طبقة متجانسة غير متغيرة النفوذية والسماكة ولكن لها ثلاث أشكال من التشبع بالسائل كما في الشكل (٣-٦) .



الشكل (٣-٦) مخطط المقاومات المكافئة في مكمن دائري

المنطقة النفطية عندما $R < R_f$

المنطقة المائية عندما $R > R_H$

المنطقة النفطية المائية عندما $R_f < R < R_H$

حيث ان :

R_f نصف قطر الوضع الحالي لجبهة التقاء النفط مع الماء.

R_H نصف قطر الكونتور الاولي لمنطقة التشبع بالنفط.

اذا كانت الناقلية الهيدروديناميكية للمنطقة النفطية ε فانها في المنطقة المائية $\varepsilon . \mu_{ow}$

اما في المنطقة النفطية المائية $\frac{\propto}{\varepsilon}$ حيث ان : $\mu_{ow} = \frac{\mu_o}{\mu_w}$

α عامل يأخذ بعين الاعتبار التغير الوسطي للناقلية الهيدروديناميكية في منطقة المزيج النفطي المائي. من المخطط يمكننا كتابة المعادلات التالية التي تستخدم في حساب انتاجية صفوف الابار وضغوط قيعانها.

$$\varphi.\varepsilon.\mu_{ow}(p_k - p_{wo}) = (Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_O)\ln\frac{R_k}{R_o} - Q_o\frac{1}{n_o}\ln\frac{R_o}{n_o r_{wo}} \qquad (3-16)$$

$$\varphi.\varepsilon.\mu_{ow}(p_{wo} - p_{w1}) = Q_o\frac{1}{n_o}\ln\frac{R_o}{n_o r_{wo}} + (Q_1 + Q_2 + Q_3)\left[\ln\frac{R_o}{R_H} + \mu.\alpha\ln\frac{R_H}{R_f} + \mu_{wo}\ln\frac{R_f}{R_1}\right] + Q_1\mu_{OW}\frac{1}{n_1}\ln\frac{R_1}{n_1 r_{w1}}$$

$$\varphi.\varepsilon(p_{w1} - p_{w2}) = -Q_1\frac{1}{n_1}\ln\frac{R_1}{n_1 r_{w1}} + (Q_2 + Q_3)\ln\frac{R_1}{R_2} + Q_2\frac{1}{n_2}\ln\frac{R_3}{n_2 r_{w2}} \qquad (3-16)$$

$$\varphi.\varepsilon(p_{w2} - p_{w3}) = -Q_2\frac{1}{n_2}\ln\frac{R_2}{n_2 r_{w2}} + Q_3\ln\frac{R_2}{R_3} + Q_3\frac{1}{n_3}\ln\frac{R_3}{n_3 r_{w3}} \qquad (3-16)$$

ان قيمة α تتحدد بالصيغة التالية:

$$\alpha = \frac{1.7 + 8z_f + 25z_f^2}{\mu_{ow}} \qquad (3-17)$$

z_f هي درجة التشبع بالنفط على خط الازاحة ويمكن تحيدها بالعلاقة التالية:

$$z_f = 0.1\sqrt{\frac{\mu_o}{1.5(1 - S_{HO} - S_{CB}) - z_f}} \qquad (3-18)$$

حيث ان:

S_{HO} درجة التشبع بالنفط التبقي.

S_{CB} درجة التشبع بالمياه المترابطة.

φ زاوية القطاع المدروس بالراديان.

اذا كانت قيم الانتاجيات معطاة، وباستبدالها بالمعادلات (٣-١٦) يمكن تحديد ضغوط القاع لآبار كل صف. اما اذا كان لدينا قيم ضغوط القاع فاننا نحصل على مجموعة من المعادلات من الدرجة الاولى عددها يساوي عدد المجاهيل وبالتالي يمكن تحديد الانتاجيات.

٤-٣- الانتاجية من الماء والنفط وعامل المردود النفطي قبل وبعد عبور الماء الى صفوف الابار مع الاخذ بعين الاعتبار اختلاف لزوجة النفط والماء والازاحة غير مكبسية:

لقد بحثنا الطريقة التقريبية لتعيين الانتاجية من النفط والماء في المكمن المستطيلي والدائري النفطي عند الشروط المثالية للارتشاح في الطبقة المتجانسة مع عدم الاخذ بعين الاعتبار تغير النفوذية النسبية في المنطقة الانتقالية مابين النفط والماء .وفي مثل هذه الحالة فان صفوف الابار توقف عن الانتاج عند لحظة ظهور الماء فيها.

اما الطريقة الاكثر صعوبة فهي تعيين الانتاجية من الماء والنفط قبل وبعد عبور الماء الى صفوف الابار عندما يكون ضغط القاع في الابار الانتاجية معروفا.

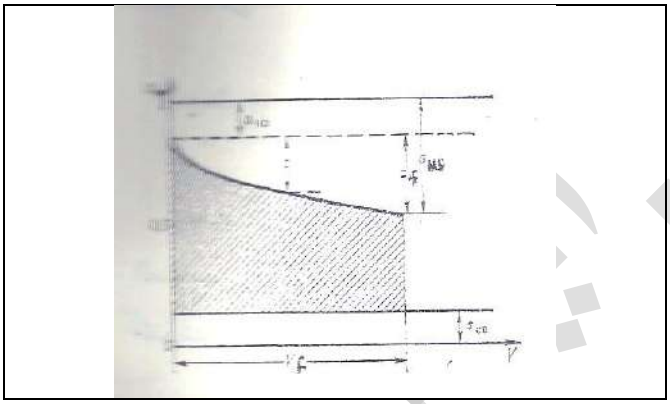
في ظروف ازاحة النفط بالماء وعند الحسابات الهيدروديناميكية غالبا ما يتم افتراض ان تشبع مسامات صخر المكمن بالنفط والماء في اية نقطة عند عبور خط التقاء النفط مع الماء منها ، يتغير بشكل لحظي من درجة تشبع اولية الى درجة تشبع نهائية لهذا المكمن.

عند ذلك يتم اعتبار ان نفوذية الطبقة للماء (حيث كان النفط اولا) تنخفض بمقدار ٤٠% . ان هذا المقدار قريب جدا من الحقيقة وفقا للأبحاث التجريبية والنظرية ، ولكن فقط عند ازاحة النفوط قليلة اللزوجة التي لزوجتها اكبر بقليل من لزوجة الماء، اما عند ازاحة النفوط اللزجة فانه سيتشكل مزيجا من النفط والماء يشكل منطقة متحركة خلف خط الازاحة قريبة من الوضع الاولي للكونتور النفطي . في هذه المنطقة تكون النفوذية الفعالة للنفط والماء اقل بكثير من نفوذية اي طور بمفرده.

بهذا الشكل تختلف مقاومات الارتشاح العامة الحقيقية بشكل كبير عن المقاومات الرتشاحية المحددة بمخطط الازاحة المكبسية وهذا يمكن ان يؤدي الى اخطاء كبيرة عند حساب الانتاجيات والضغوط.

اظهرت الابحاث التجريبية والنظرية ان محتوى اي مقطع من الطبقة من النفط والماء يمكن تحديده بمساعدة المنحني البياني بالعلاقة التالية: $S_w = \frac{V.m}{Qt)}$

كما هو موضح بالشكل (٣-٧).



الشكل (٣-٧) منحني تغير درجة التشبع عند الازاحة الخطية بالماء

حيث ان :

V حجم الطبقة.

m المسامية.

Q(t) الكمية الكلية للماء الداخل الى الطبقة.

$$Q(t) = \int_0^t q(t).d(t) \qquad (3-19)$$

ان تحليل المعادلات الاساسية لارتشاح المزيج النفطي المائي تظهر ان :

$$\frac{V_L.m}{Q(t)} = \frac{\partial K(S)}{dS} \;;; K(S) = \frac{K_{rO}(S)}{K_{rO}(S) + \mu_{OW}.K_{rW}(S)} \qquad (3-20)$$

حيث ان :

K_{ro} وK_{rw} هي النفوذيات النسبية للنفط والماء على التوالي.

μ_{OW} هي نسبة لزوجة النفط الى لزوجة الماء.

وبتحليل العلاقة $\left(\frac{\partial K(S)}{\partial (S)}\right)$لنسب مختلفة من (μ_{OW})التي تم الحصول عليها على اساس المعطيات التجريبية عن النفوذيات الطورية .

من السهولة القول انه عندما تكون نسبة اللزوجة $1 \leq \mu_{OW} \leq 10$ في حدود التواجد الحقيقي لمنطقة المزيج النفطي المائي عند ازاحة النفط بالماء يمكن استخدام العلاقة التالية :

$$K(S) = \frac{50}{\mu_{OW}} Z^3 \qquad (3-21)$$

حيث ان:

Z هي تشبع الصخر بالنفط المتحرك في منطقة المزيج النفطي المائي.

وبما ان قيمة Z تختلف من حقل لآخر اي لا يمكن استخدام المنحني السابق فانه وبعد عدة اصلاحات بسيطة يمكن الحصول على المعادلة التالية:

$$Z = \sqrt{\frac{m \cdot \mu_{OW} \cdot V_L}{150\ Q(t)}} \qquad (3-22)$$

حيث تعطي المعادلة (٣-٢٢) امكانية تحديد التشبع بالنفط في اية نقطة من المنحني السابق بالعلاقة مع مكان توضعها الذي يوصف بالمقدار $\frac{V_L}{Q(t)}$ وكذلك بالبارامترات التالية:

$$.m\ ,\ \mu_{ow}$$

الفصل الرابع

المخاريط المائية والغازية

٤-١- تشكل المخاريط:

المخروط : هو مصطلح يستخدم لوصف الالية الموجودة عند حركة المياه تصاعديا او حركة الغاز تنازليا (نحو الاسفل) ضمن المكمن.

يمكن ان يؤثر المخروط بشكل كبير على الانتاجية ودرجة الكفاءة العالية للمكامن النفطية وعلى زمن نضوب المكمن وفيما يلي مشاكل تشكل المخاريط المائية والغازية:

١- تحتاج عملية معالجة النفط من الغاز والماء الى كلفة عالية.

٢- تقلل من انتاج الغاز من القبعة الغازية الاولية والثانوية عند انخفاض الضغط والتي تؤدي الى عدم حدوث عمليات الازاحة المرتبطة بدفع الغاز.

٣- انخفاض كفاءة الية نضوب المكمن وغالبا ما تسبب المياه عمليات التاكل حيث ان التخلص منها مكلفا مما قد يؤدي الى هجر البئر المتضرر كليا.

٤- انخفاض حاد للمردود النفطي الكلي للحقل وقد نصل الى عدم انتاج النفط وفقط يتم انتاج الماء او الغاز.

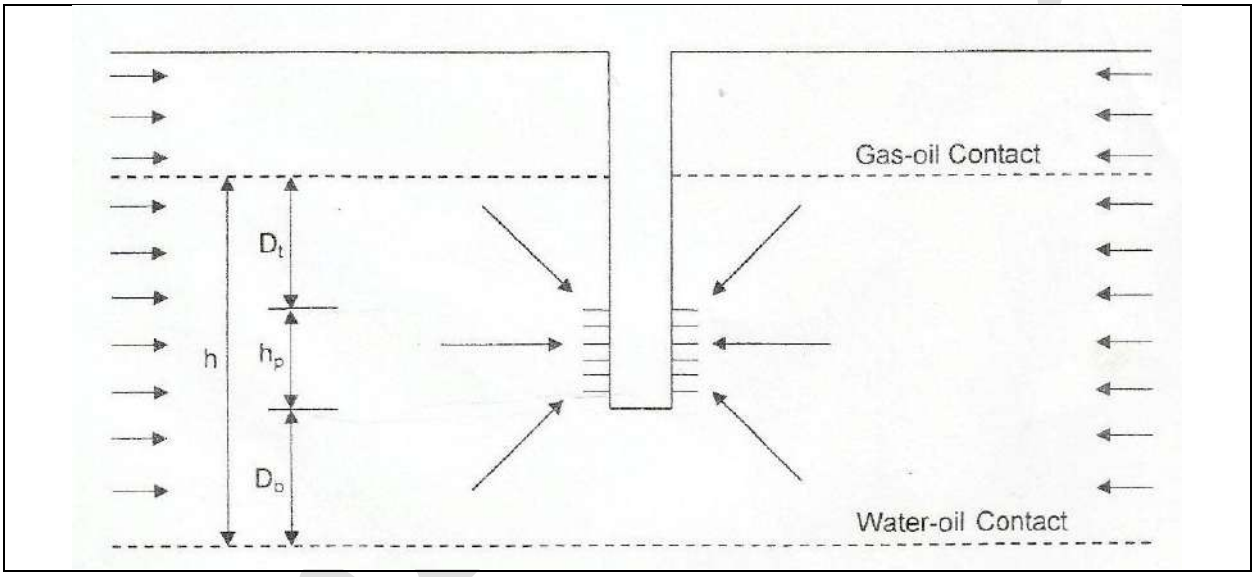
٥- تأخر عملية الازاحة بواسطة دفع المياه (الاجتياح المائي) ودفع الغاز ، حيث ان هذه العوامل هي التي تتحكم بمردود النفط من الحقل ، نظرا لان المخروط يمكن ان يؤثر بشكل كبير على عمليات الازاحة والمردود واقتصادية العملية.

لهذا ان الهدف من التحليل النظري للمخاريط المائية والغازية وتحديد الخطوط العريضة للكثير منها **هو** حساب وتحديد سلوك هذه المخاريط.

يتشكل المخروط بشكل رئيسي من حركة موائع المكمن بالاتجاه الاقل مقاومة و توازنا من خلال ميل الموائع للحفاظ على التوازن بفعل الجاذبية.

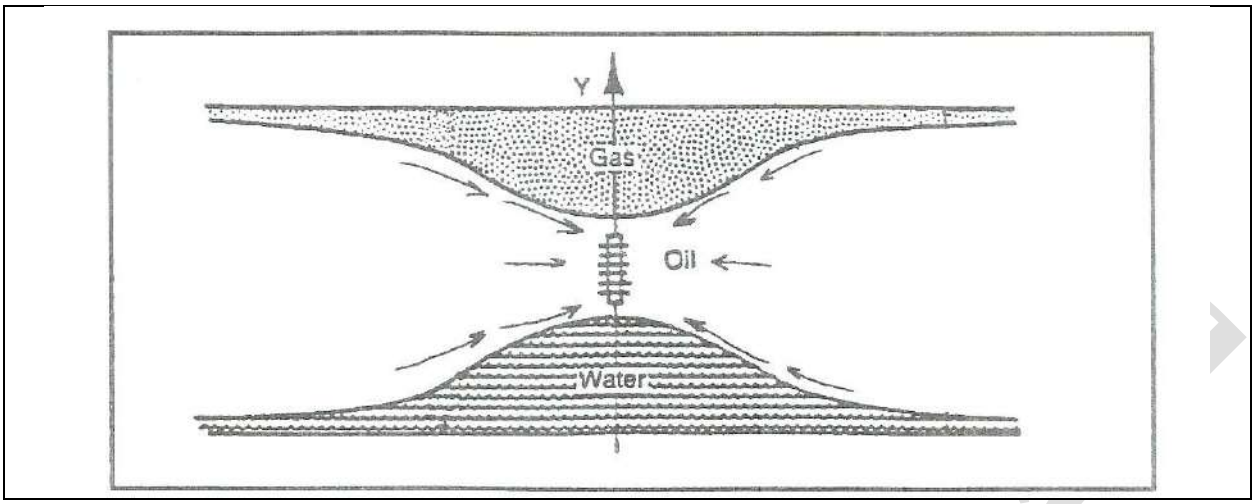
يمكن اجراء تحليل لكل من سلوك الماء والغاز في المكمن ، لنعتبر الشروط الاولية لموائع المكمن كما هو مبين في الشكل رقم (٤-١) ، حيث يتوضع الماء تحت النفط والغاز فوقه ويتدفق النفط بينهما .

بهدف المناقشة لنفترض ان البئر يخترق التشكيل (كما هو موضح بالشكل السابق) وان المجال المثقب هو بين خطي التماس ماء-نفط ، غاز-نفط ، فان انتاج النفط من البئر سيخلق تدرج في الضغط يعمل على انخفاض خط التقاء الغاز مع النفط وارتقاء خط التقاء الماء مع النفط في الوسط المسامي للمنطقة المجاورة لهذه البئر.



الشكل (٤-١) مكمن في الشروط الستاتيكية الاولية

يبقى الغاز فوق النفط والماء تحت النفط بسبب اختلاف الكثافات وتميل قوى الموازنة هذه الى تشويه خطوط التماس ماء-نفط و غاز-نفط والتي يكون تشوهها على شكل جرس كما هو مبين في الشكل (٤-٢) .



الشكل (٤-٢) مخاريط ماء وغاز

هناك ثلاثة قوى اساسية تؤثر على تدفق الموائع حول جدران البئر هي:

١- القوى الشعرية : ان تأثيرها على المخاريط المائية والغازية وعلى البئر ضعيفة لذلك يمكن اهمالها.

٢- قوى الجاذبية : لها اتجاه عمودي (باتجاه محور العينات) وتحدث بفعل الاختلاف بكثافة الموائع في المكمن.

٣- قوى اللزوجة : تشير الى تدرج (انخفاض) الضغط بسبب تدفق المائع في المكمن كما هو معرف بقانون دارسي، لذا في اي زمن هناك توازن لقوى الجاذبية وقوى اللزوجة عند نقاط في جوار البئر او بعيدا عنه ، فعندما تتقدم القوى الديناميكية (قوى اللزوجة) على قوى الجاذبية عند مجال اكمال البئر فان المخروط سينتهي به الامر الى داخل البئر.

يمكن التوسع في التصور الاساسي عن المخاريط من خلال ادخال المفاهيم التالية:

١- المخاريط المستقرة.

٢- المخاريط غير المستقرة.

٣- معدل الانتاج الحرج.

* اذا كان البئر ينتج بمعدل ثابت وكان تدرج الضغط في منظومة التصريف ثابتا فهذا يعني تواجد شروط الحالة المستقرة ، وعند هذه الشروط اذا كانت القوى الديناميكية (اللزجة) عند قاع البئر اقل من قوى الجاذبية عندها سيتشكل مخروط الماء او الغاز ولكن لن يمتد (يتوسع) الى البئر كما انه لن يتراجع مبتعدا عن البئر وينشا عندها ما يعرف بالمخروط المستقر.

* عند نظام الحالة غير المستقرة سيتقدم المخروط باتجاه البئر حتى تتحقق شروط الحالة المستقرة ، فاذا كان تدرج الضغط (انخفاض الضغط) كاف لتجاوز قوى الجاذبية فان المخروط غير المستقر سينمو ويخرج في النهاية الى البئر.

* من المهم ان نلاحظ انه بالمعنى الواقعي بان نظام الحالة المستقرة هي شبه مستقرة بسبب نظام التصريف وتغيرات تدرج (انخفاض) الضغط بشكل عام.

على سبيل المثال: عند نضوب المكمن فان خط التقاء الماء مع النفط يتقدم نحو مجال اكمال البئر مما يزيد من فرص تغير شكل المخروط (تجعد المخروط) ، وفي حالة اخرى فان خفض الانتاج من البئر يحتاج الى زيادة مقابلة في انخفاض الضغط للمحافظة على معدل انتاج معين ثابت مما قد يؤدي الى تحرك مخروطا كان مستقرا باتجاه البئر.

***معدل الانتاج الحرج:** هو الحد الاقصى لمعدل انتاج النفط المسموح به دون ان يحصل تحرك للمخروط باتجاه البئر وعند هذا المعدل يكون المخروط مستقرا ولكنه في وضع اختراق اولي .

ولكن تجدر الاشارة هنا الى ان تحقيق ظروف الحد الاقصى لمعدل الانتاج من النفط دون حدوث تدفق للماء الحر او الغاز الحر مشكلة صعبة الحل.

*المواضيع المهمة التي يجب حلها هي:

١- **توقع الحد الاقصى لمعدل تدفق النفط** الى البئر دون انتاج مياه او غاز حر.

٢- **تحديد الطول المثالي للمجال المثقب وموقعه** في البئر من اجل الحصول على معدل الانتاجية الاقصى والذي عنده يحصل تدفق للمياه والغاز بشكل حر.

* كالهون (١٩٦٠) اشار الى ان الوصول لمعدل التدفق الذي يحقق التوازن في الصخر قد يكون بطيئا جدا بسبب النفوذية الضعيفة او بسبب الخصائص الشعرية مما قد يؤدي الى تغلب تدرج الميل (الانحدار) عليها مما سيؤدي الى تحرك المياه للأعلى والغاز للأسفل وتشكل المخاريط انظر الشكل رقم (٤-٢).

تتناسب سرعة المائع عكسا مع لزوجته وبما ان الغاز لزوجته اقل من الماء فانه سيتقدم مع النفط بشكل اسرع من الماء وبالتالي ستكون كميته في النفط اعلى من كمية المياه وبالتالي نجد ان سرعة تقدم المخروط تعتمد على نوع الموائع التي يتم انتاجها من البئر.

* كما يعتمد تشكل المخاريط على النفوذية العمودية للمكمن مقارنة مع النفوذية الافقية وعلى بعد المسافة التي يتم منها سحب النفط او الماء من البئر.

* يمكن التخلص من المخاريط المائية من خلال عدم اختراق الطبقة النفطية بالكامل عند وجود طبقة مائية او من خلال نفوذية افقية جيدة ، رغم عدم امكانية تقليل النفوذية العمودية فانه يمكن زيادة نسبة التدفق الافقي الى التدفق العمودي عن طريق استخدام تقنيات مثل التحميض او زيادة ضغط الطبقة النفطية لمنع التدفق العمودي.

* يجب التحكم بتطبيق هذه التقنيات بحيث يحدث التأثير فوق المنطقة المائية او اسفل المنطقة الغازية ، فأيها كانت الحالة المرغوب بها فهذا يسمح بارتفاع اكثر تناسبا لمنسوب المياه الباطنية بمجرد حدوث مخروط على اطراف خطوط التماس بإعادة الاستقرار، اذا لم يكن هناك ظروف تحقق التوازن السريع للجاذبية فان اعادة الاستقرار لن تكون مرضية.

* يصعب تجنب مخروط الغاز لأنه يصعب التخلص من التشبع بالغاز بمجرد تكوينه.

*هناك ثلاث فئات اساسية من العلاقات تستخدم لحل مشكلة المخاريط هي:

١- علاقات حساب المعدل الحرج.

٢- علاقات التنبؤ بزمن اختراق المخاريط للبئر.

٣- علاقات حساب ادائية البئر بعد اختراق المخروط له.

ان فئات الحسابات المذكورة اعلاه قابلة للتطبيق في الابار العمودية والافقية وذلك بهدف حل مشاكل المخاريط.

٤-٢- المخاريط في الابار العمودية:

١-٢-٤- علاقات المعدل الحرج للآبار العمودية:

بالتعريف المعدل الحرج (Q_{oc}) هو الحد الاقصى المسموح به لمعدل تدفق النفط الذي يمكن تطبيقه على البئر لتجنب اختراق (تقدم) المخاريط المائية والغازية ، حيث يؤدي هذا المعدل الى استقرار المخروط اسفل الجزء السفلي من المجال المثقب في البئر في منظومة ماء – نفط او اعلى الجزء المثقب في منظومة غاز – نفط .

يوجد العديد من العلاقات التجريبية المستخدمة لتحديد المعدل الحرج للنفط ومنها:

١- علاقة ماير- كاردر

٢- علاقة بيرسون.

٣- علاقة تشاني واخرون.

٤- علاقة تشيرسيوكويسي.

٥- طريقة هويلاند وبباتزاكوس وجافيلاند.

٦- طريقة تشابرسون

٧- طريقة سكولز.

٨- طريقة سوبوسنسكي وكورنيليوس.

٩- طريقة بورنازيل و جينسون.

ان التطبيقات العملية لهذه العلاقات في تحديد معدل تدفق النفط الحرج هي الاتي ذكرها:

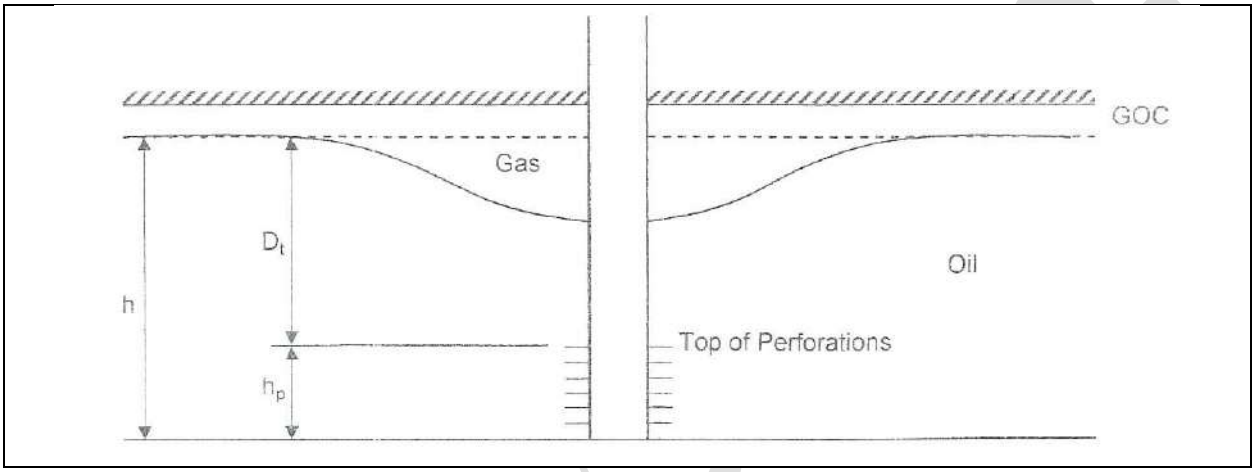
٤-٢-١- علاقة ماير-كاردر:

اقترحوا ان نمو المخروط ناتج عن التدفق الشعاعي للنفط والضغط المرتبط به والمسؤول عن امتلاء البئر بالسائل وافترضوا وجود درجة معينة من عدم تجانس المنظومة اي عدم وجود

نفوذية واحدة في المكمن بمعنى ان النفوذية العمودية لا تساوي النفوذية الافقية في المكمن.
يجب الاشارة الى ان نسبة النفوذية الافقية الى النفوذية العمودية هي الاكثر اهمية في حل مشكلة المخاريط . لقد وضعوا علاقات مختلفة لتحديد معدل التدفق الحرج للنفط عند حالات ثلاث هي:

١- مخروط الغاز -٢- مخروط الماء -٣- مخروط ماء - غاز

١- **مخروط الغاز** : يمثل الشكل (٤-٣) الرسم التخطيطي لمخروط الغاز.



الشكل (٤-٣) يمثل مخروط غازي

ربط ماير و كاردر بين معدل التدفق الحرج للنفط المطلوب للحصول على مخروط غاز مستقر مع مدى اختراق البئر للطبقة المنتجة للنفط ومؤشرات المائع وهي:

١- الاختلاف بين كثافة النفط والغاز.

٢- سماكة الطبقة النفطية.

- المسافة (D_t) بين خط التقاء الغاز مع النفط وبين اعلى المجال المثقب من البئر.

ان المجال المثقب من البئر في منظومة غاز - نفط يعرف كما يلي:

$$h_p = h - D_t$$

وضع ماير و كاردر المعادلة التالية لتحديد معدل التدفق الحرج للنفط :

$$Q_{OC} = 0.246 \times 10^{-4} \left[\frac{\rho_o - \rho_g}{\ln \frac{r_e}{r_w}}\right] \left[\frac{k_o}{\mu_o B_o}\right] [h^2 - (h - D_t)^2] \qquad (4-1)$$

حيث ان:

Q_{oc} هي معدل التدفق الحرج للنفط STB/day

ρ_o, ρ_g هي كثافة الغاز والنفط على التوالي Lb/ft3

K_o هي النفوذية الفعالة للنفط md

r_w, r_e هي نصف قطر منطقة التصريف والبئر على التوالي Ft

D_t هي المسافة بين خطا التقاء الغاز مع الماء وبين اعلى المجال المثقب من البئر Ft

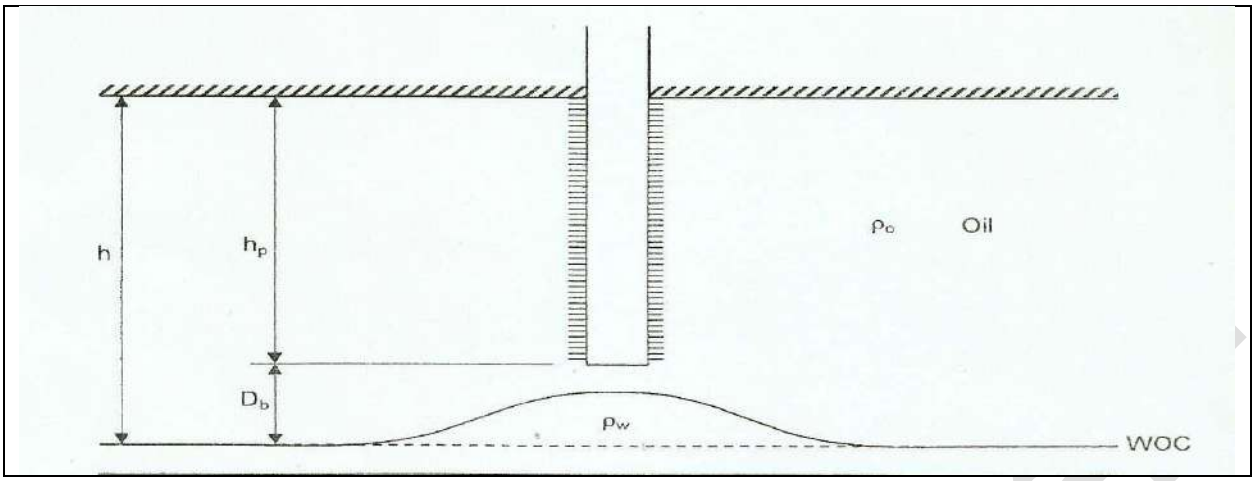
٢- مخروط الماء: يبين الشكل (٤-٤) الرسم التخطيطي لمخروط الماء

وضع ماير و كاردر المعادلة التالية لتحديد معدل التدفق الحرج للنفط في منظومة ماء – نفط

$$Q_{OC} = 0.246 \times 10^{-4} \left[\frac{\rho_w - \rho_o}{\ln \frac{r_e}{r_w}}\right] \left[\frac{k_o}{\mu_o B_o}\right] [h^2 - h_p^2] \qquad (4-2)$$

حيث ان : ρ_w هي كثافة الماء Lb/ft^3

h_p هي طول المجال المثقب من البئر Ft

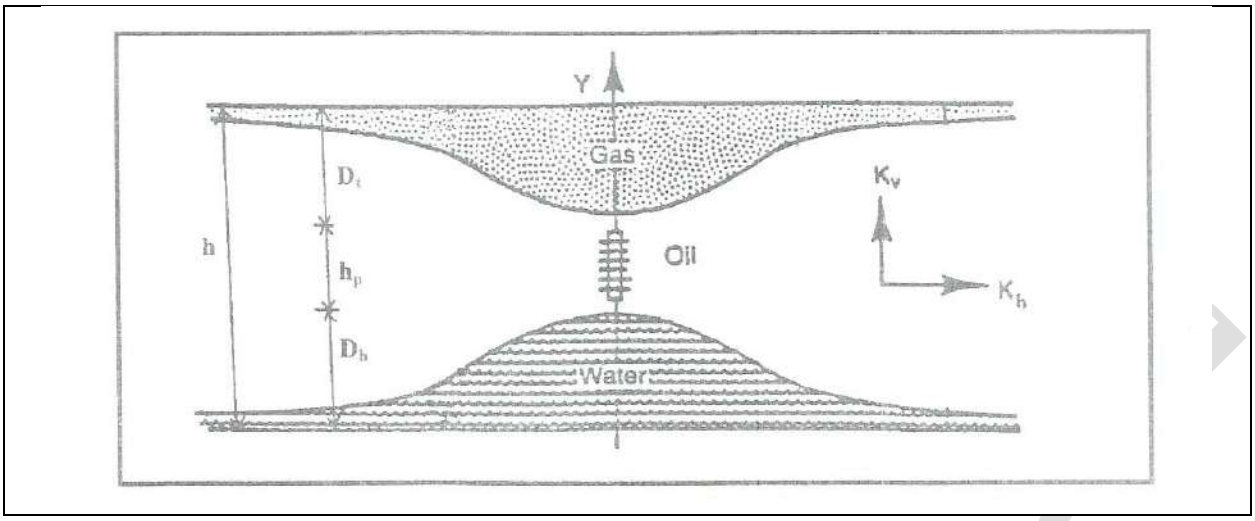


الشكل(٤-٤) مخروط مائي

٣- مخروط الغاز والماء معا:

اذا كان لدينا طبقة نفطية تقع بين قبعة غازية ومنطقة مائية (انظر الشكل (٤-٥)) فان المجال المثقب يجب ان يسمح بإعطاء اقصى معدل لا نتاج النفط دون انتاج غاز من خلال المخروط المتواجد اعلى المجال المثقب أو ماء من مخروط الماء المتواجد اسفل المجال المثقب هذه الحالة ذات اهمية خاصة عند الانتاج من طبقة رقيقة (ذات سماكة قليلة) تحتها ماء وفوقها غاز. قدم ماير و كاردر معادلة لحساب اقصى معدل لإنتاج النفط عند تواجد مخروط مائي ومخروط غازي معا وهي:

$$Q_{OC} = 0.246 \times 10^{-4} \left[\frac{k_o}{\mu_o B_o}\right] \left[\frac{h^2 - h_p^2}{\ln \frac{r_e}{r_w}}\right] \left\{(\rho_w - \rho_o)\left(\frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_w - \rho_g}\right)^2 + (\rho_o - \rho_g)\left[1 - \frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_w - \rho_g}\right]^2\right\} \quad (4-3)$$



الشكل (٤-٥) مخروط ماء وغاز

٤-٢-٢- بيرسون (١٩٧٧): قدم علاقة لتحديد الموقع المثالي للمجال المثقب المرغوب فيه عند الاكمال في المنطقة النفطية من حيث البعد عن القبعة الغازية من الاعلى والمنطقة المائية من الاسفل حيث اقترح ان المسافة المثالية بين خط التقاء الغاز مع النفط وبين اعلى المجال المثقب يمكن تحديدها بالعلاقة التالية:

$$D_t = (h - h_p)\left[1 - \frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_w - \rho_g}\right] \qquad (4-4)$$

حيث ان D_t مقدرة بالقدم.

قدم سليدر (١٩٧٦) نظرة عامة ممتازة لمشكلة المخروط وقدم عبارات تنبؤية لاتعتمد على المعادلات السابقة وانما تعتمد على افتراض واقعي يخص النفوذية كما يلي:

ان الافتراض بان النفوذية هي نفسها بكل الاتجاهات نادرا ما يحدث الا اذا كانت التوضعات الرسوبية اثناء عملية الترسيب رقيقة وافقية ، ولكن من الطبيعي ان تختلف نفوذية التشكيل من مكان الى اخر عموديا، لهذا هناك فرق كبير بين النفوذية المقاسة بالاتجاه العمودي والنفوذية المقاسة بالاتجاه الافقي علاوة على ذلك فان قيمة النفوذية المقاسة بالاتجاه الافقي اكبر بكثير منها في الاتجاه العمودي ويبرر هذا بانه يتم ترسيب صفائح رقيقة وحتى مجهرية من مادة غير

نفوذة بشكل دوري والتي لها تأثير كبير على التدفق العمودي وتأثيرها ضئيل جدا على التدفق الافقي والذي سيكون موازيا لمستوي الصفائح.

٤-٢-٣- علاقة تشيرسي و كويسي (١٩٦٤):

قاما بعملية تقريب حيث استخدما موديلا لقياس الجهد للتنبؤ بسلوك المخاريط في ابار النفط العمودية ، وكانت خلاصة عملهما بان قدما مخططات لا بعدية والتي تأخذ بعين الاعتبار النفوذيتين العمودية والافقية وهذه المخططات يمكن استخدامها لحل النوعين التاليين من المشاكل:

١- بالنظر الى خصائص المكمن والمائع والبئر بالإضافة الى موقع وطول المجال المثقب من البئر فقد حددا معدل الانتاج الاعظمي من النفط لتجنب مشكلة مخروط الماء والغاز.

٢- بالنظر الى خصائص المكمن والمائع فقط فقد حددا الموقع المثالي للمجال المثقب، قدم الباحثان اربعة مؤشرات لابعدية والتي تم تحيدها من العلاقة التخطيطية الموضوعة .

لتحديد معدلات التدفق الحرجة والبارامترات اللابعدية الاربعة يتم تحديدها من الشكل رقم (٤-٦) وتحدد كما يلي:

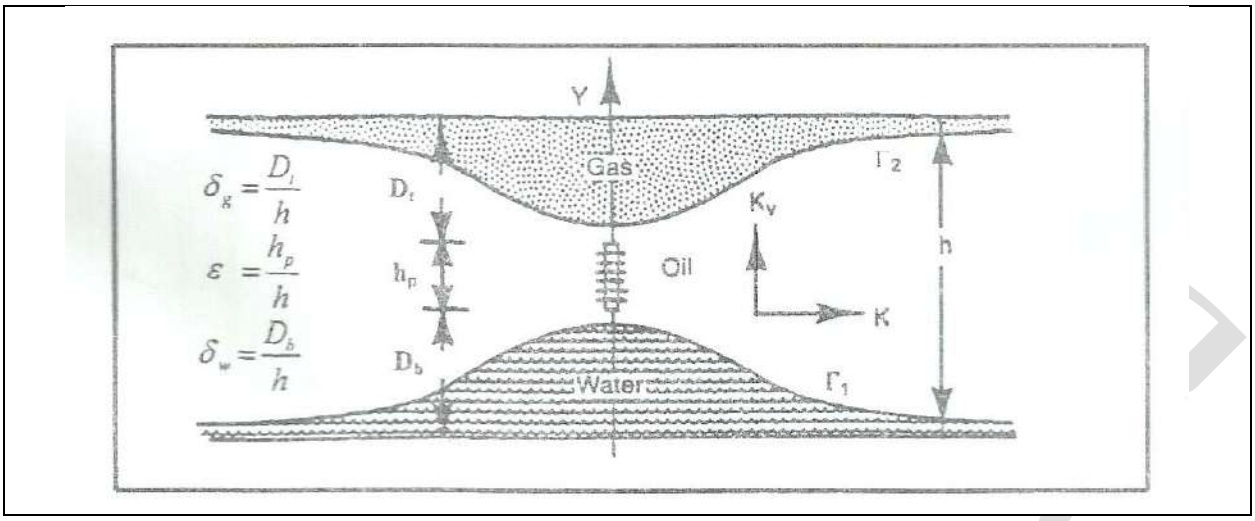
١"-المؤشر اللابعدي الاول الذي استخدمه الباحثان لربط النتيجة مع موديل مقياس الجهد **نصف القطر اللابعدي الفعال (r_{De})** ويعرف كما يلي:

$$r_{D_e} = \frac{r_e}{h} = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad ; \quad 5" r_{D_e} \ "80 \qquad (4-5)$$

حيث ان : h سماكة الطبقة النفطية.

r_e هي نصف قطر منطقة التصريف.

k_h, k_v هي النفوذية العمودية والنفوذية الافقية على التوالي.



الشكل (٤-٦) مخروط ماء وغاز في تشكيلة غير متجانسة

٢"- طول المجال المثقب اللابعدي (ε): وهو المؤشر اللابعدي الثاني الذي استخدمه الباحثان ويعطى بالعلاقة :

$$\varepsilon = \frac{h_p}{h}; \qquad o \quad "\varepsilon" \quad 0.75 \qquad (4-6)$$

٣"- نسبة المخروط الغازي اللابعدي (δ_g) ويعطى بالعلاقة:

$$\delta_g = \frac{D_t}{h}\ ; \qquad 0.07" \ \delta_g \ "0.9 \qquad (4-7)$$

٤"- نسبة المخروط المائي اللابعدي (δ_w) ويعطىبالعلاقة :

$$\delta_w = \frac{D_b}{h}\ ; \quad 0.07" \ \delta_g \ " \ 0.9 \qquad (4-8)$$

حيث ان: D_b هو المسافة بين خط التقاء الماء مع النفط واسفل المجال المثقب، بالقدم.

اعتبر تشيرسي والباحثون المشاركون ان خطوط التماس ماء- نفط و غاز – نفط تكون مستقرة فقط اذا كان معدل انتاج البئر من النفط اقل من المعدلات المبينة بالمعادلات التالية:

$$Q_{ow} = 0.492 \times 10^{-4} \frac{h^2(\rho_w - \rho_o)}{B_o \times \mu_o} (k_{ro} \times k_h) \psi_w(r_{De}, \delta, \delta_w) \qquad (4-9)$$

$$\mathrm{Q_{ow}} = 0.492 \times 10^{-4} \frac{h^2(\rho_o - \rho_g)}{B_{o\times}\mu_o}(k_{ro} \times k_h)\psi_g(r_{De}, \delta, \delta_g) \qquad (4-10)$$

حيث ان :

Q_{ow} = معدل التدفق الحرج للنفط في منظومة نفط – ماء.

Q_{og} = معدل التدفق الحرج للنفط في منظومة نفط– غاز.

ρ_o, ρ_w, ρ_g= كثافة الغاز والماء والنفط على التوالي.

ψ_w = التابع اللابعدي للماء.

ψ_g = التابع اللابعدي للغاز.

k_h = النفوذية الافقية.

قدم الباحثون مجموعة من المخططات البيانية لتحديد التوابع اللابعدية ψ باستخدام المؤشرات اللابعدية $(r_{D_e}, \varepsilon, \delta)$ هذه المنحنيات مبينة في الاشكال (٤-٧) وحتى (٤-١٣) والتي تطبق فقط على التشكيلات المتجانسة ، يجب ملاحظة انه اذا كانت القبعة الغازية والطبقة المائية موجودتان معا فانه يجب تحقيق الشروط التالية على الترتيب لتجنب انتاج الماء والغاز الحر(تحقيق المعدلات الحرجة) : $Q_O = Q_{OW}\,; Q_O = Q_{og}$

اقترح تشيريسي و كويسي (١٩٦٤) طريقة لتحديد مجال الاكمال المثالي لمشكلة المخاريط والتي تعتمد بشكل اساسي على مبدا التجربة والخطأ وذلك من اجل نصف القطر اللابعدي (r_{D_e}) ومعرفة موقع (WOC, GOC) وكثافة الموائع وتتلخص الخطوات المقترحة كما يلي:

الخطوة الاولى: افترض ان طول المجال المثقب (h_p):

الخطوة الثانية : احسب طول المجال المثقب اللابعدي : $\varepsilon = \frac{h_p}{h}$

الخطوة الثالثة : اختر المنحني المناسب الذي يوافق (r_{D_e}) وادخل على المنحني قيمة (ε) على محور السينات ثم انتقل عموديا لتحديد $(\Delta\rho_{og}/\Delta\rho_{ow})$ ثم حدد قيم $(\psi، \delta)$ المقابلة ثم اعتبر ان هذين المؤشرين اللابعديين النسبة المثلى لمخروط الغاز $\delta_{g\,opt}$ والتابع المثالي

اللابعدي لمعدل الانتاج (Q_{OPT}).

الخطوة ٤:احسب المسافة بين (GOC) واعلى المجال المثقب.

$$D_t = h \,.\, s_{g_{OPT}}$$

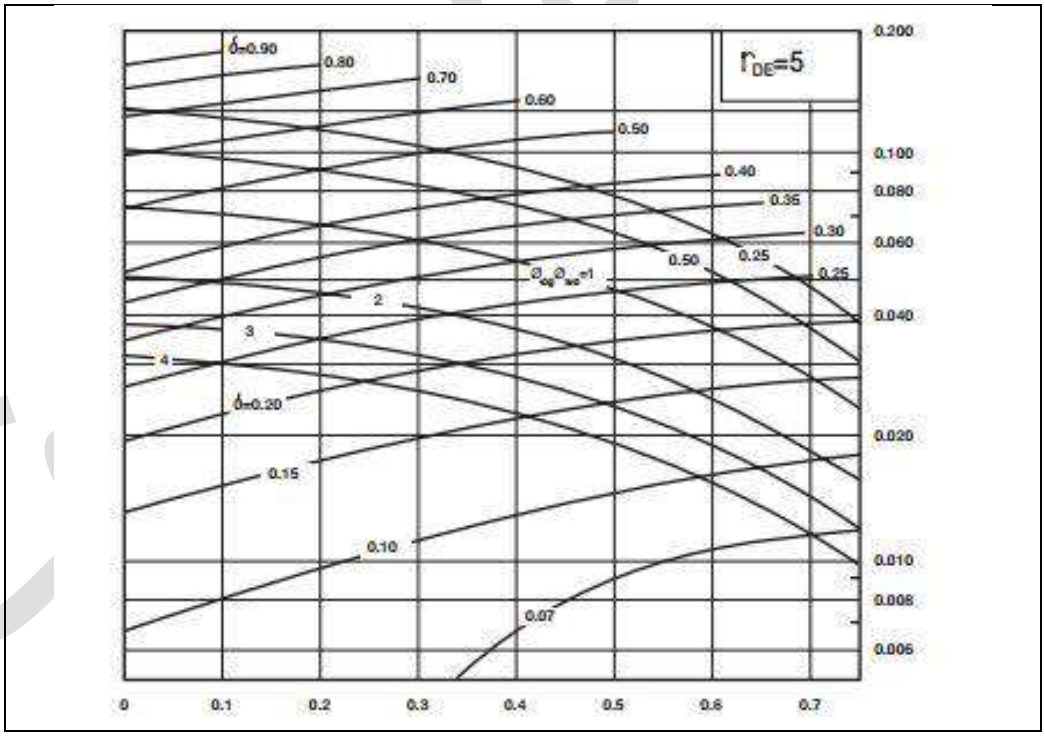
الخطوة ٥ :احسب المسافة بين (WOC) واسفل المجال المثقب:

$$D_b = h - D_t - h_p$$

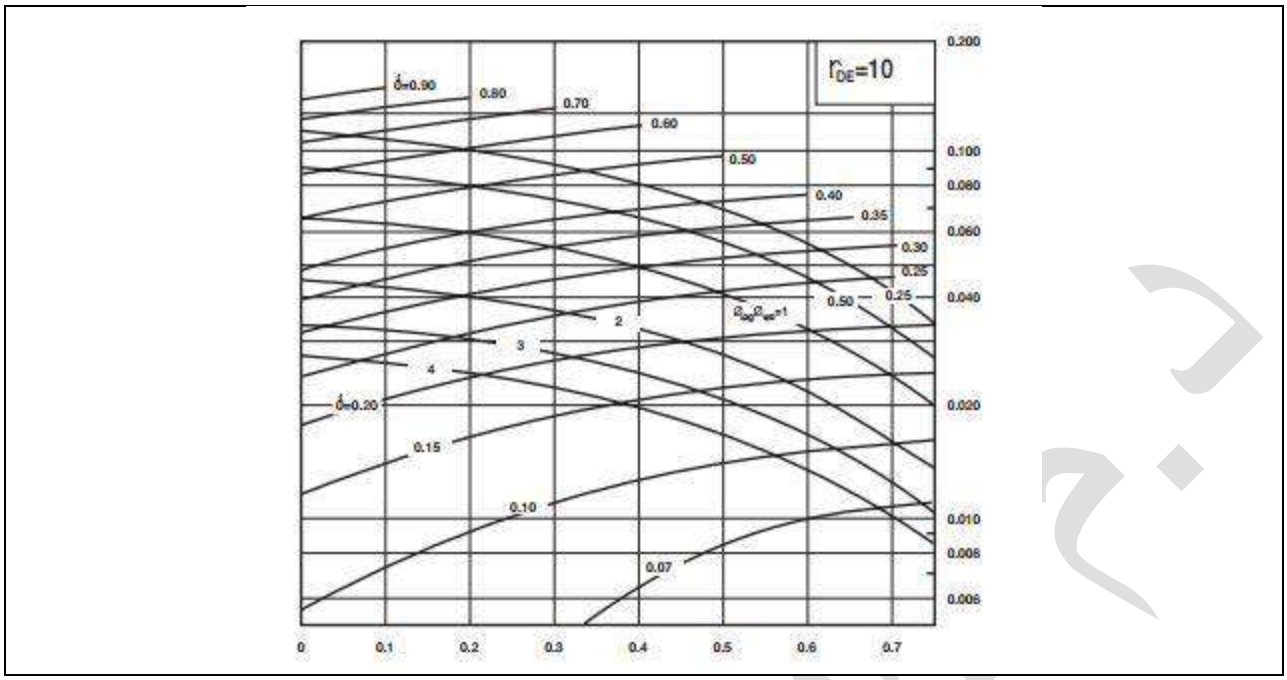
الخطوة ٦ :احسب الحد الاقصى المسموح به لتدفق النفط (Q_{OW}) وذلك باستخدام التابع الامثل اللابعدي (ψ_{OPT})من المعادلة رقم (9-4).

الخطوة ٧ : كرر الخطوات من ١ الى ٦ عند مجالات تثقيب مختلفة.

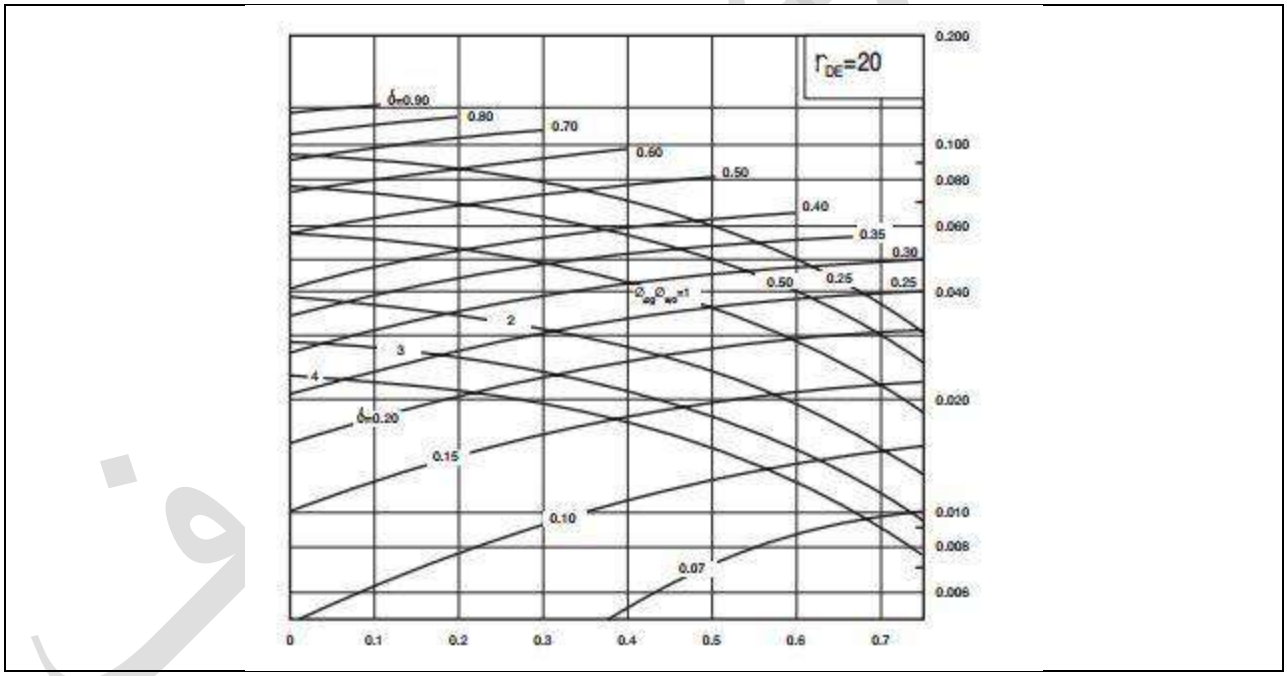
الخطوة ٨ : قارن القيم (Q_{OW}) مع تلك المحسوبة من معدلات حساب معدل التدفق المحسوبة، على سبيل المثال معادلة دارسي باستخدام الانخفاض الاقصى للضغط



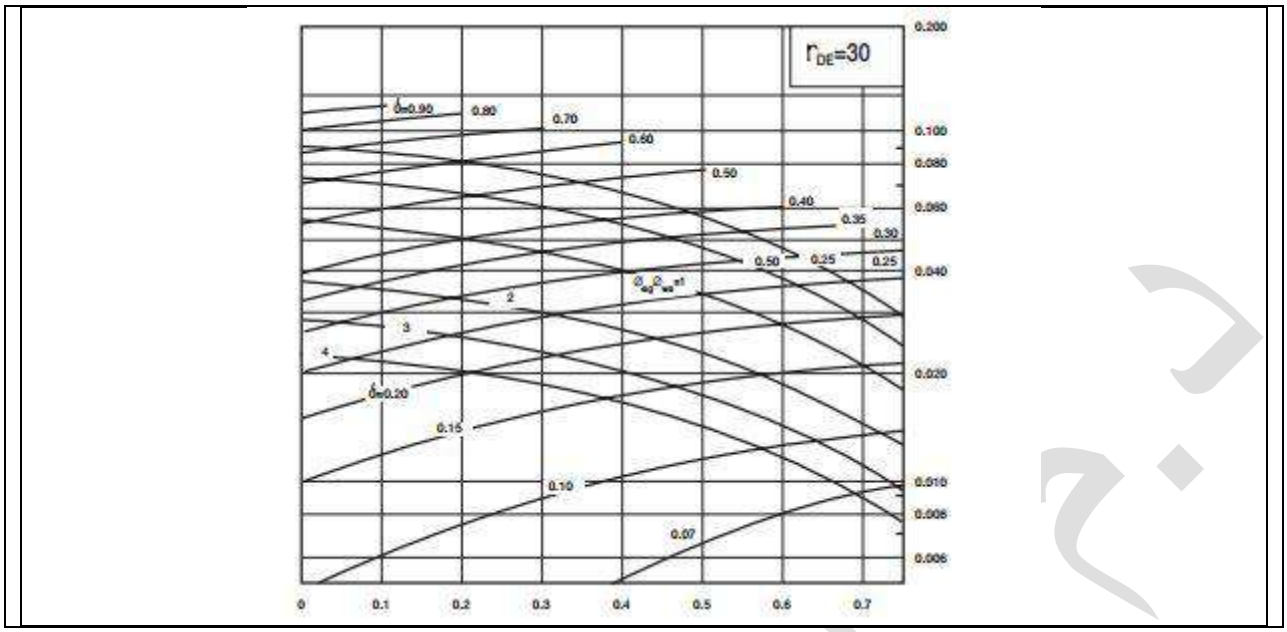
الشكل (٤-٧) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 5$)



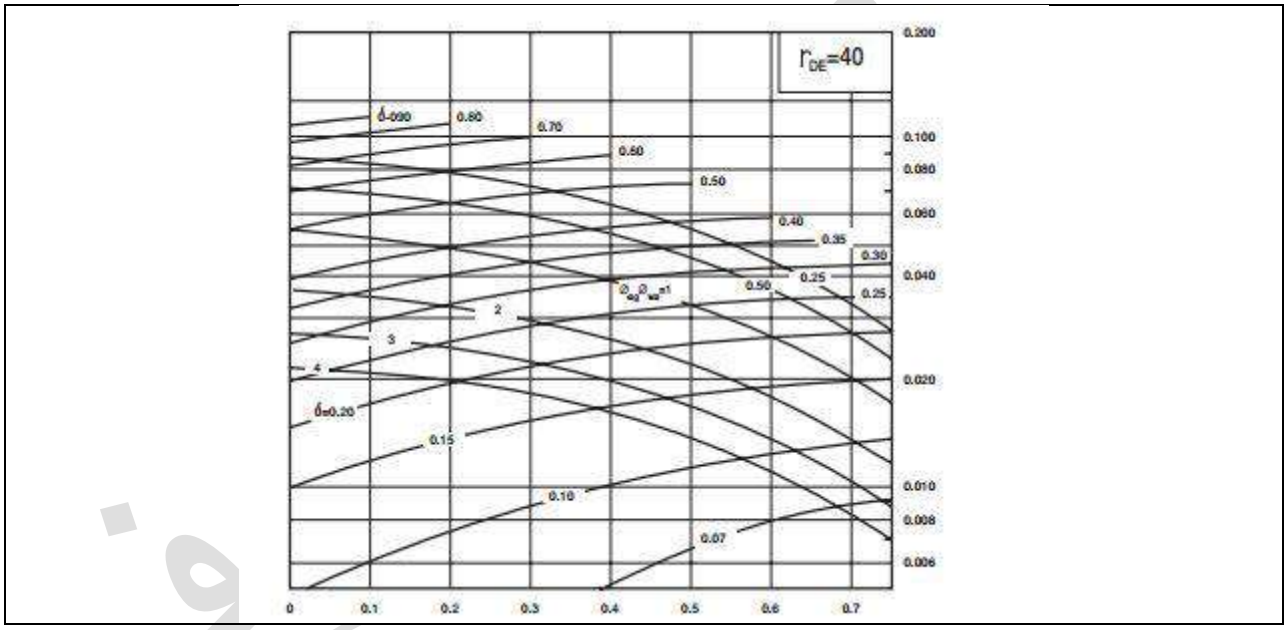
الشكل (٤-٨) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 10$)



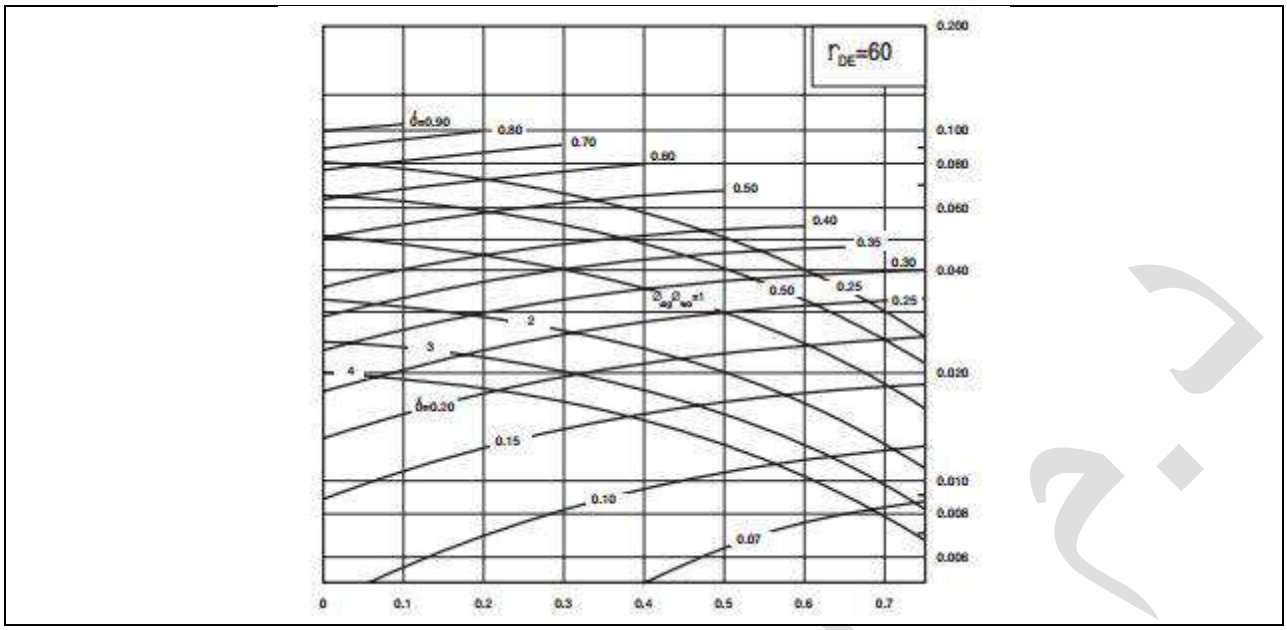
الشكل (٤-٩) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 20$)



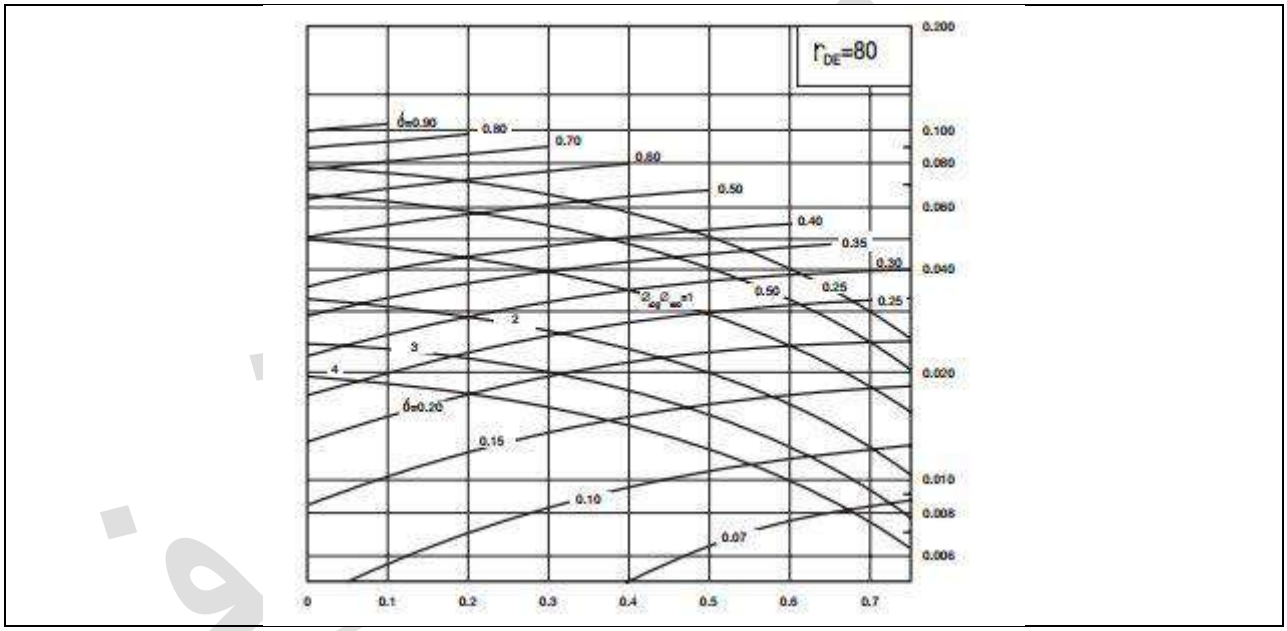
الشكل (٤-١٠) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 30$)



الشكل (٤-١١) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 40$)



الشكل (٤−١٢) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 60$)



الشكل (٤−١٣) التابع اللابعدي من اجل($r_{De} = 80$)

٤−٢−٤− طريقةهويلاند و بباتزاكوس و جافيلاند:

قدموا طريقتين للتنبؤ بالمعدل الحرج للنفط من اجل مخروط ماء قاعدي متباين الخواص في

تشكيلة متجانسة في بئر تم اكماله بشكل جيد ، الطريقة الاولى هي حل تحليلي والطريقة الثانية هي حل عددي لمشاكل المخروط وفيما يلي عرض الطرق وتطبيقاتها:

٤-٤-٢-١- طريقة الحل التحليلية: تعتمد هذه الطريقة على نظرية موسكاتوياكوف (١٩٥٣) في شروط حالة الجريان المستقر والتي تتخذ شكلا بسيطا عندما يتم دمجها مع طريقة التصور لإعطاء الشروط النهائية للتنبؤ بمعدل التدفق الحرج، كما في الشكل (٤-١٤).

$$Q_{oc} = 0.246 \times 10^{-4} \left[\frac{h^2(\rho_w - \rho_o)k_h}{\mu_o B_o}\right] q_{cD} \qquad (4-11)$$

حيث ان:

$Q_{oc,\ STB/day}$ = معدل التدفق الحرج.

$\rho_w, \rho_o, lb/ft^3$= كثافة النفط والماء على التوالي.

h, ft = السماكة الكلية للمنطقة النفطية.

k_h, md = النفوذية الافقية.

q_{cD}= معدل التدفق الحرج اللابعدي.

ربط الباحثون بين معدل التدفق الحرج اللابعدي ونصف القطر اللابعدي وطول المجال المثقب اللابعدي من البئر انظر الشكل (٤-١٥) حيث ان:

$$r_D = \frac{r_e}{h}\sqrt{\frac{k_v}{k_h}} \qquad (4-12)$$

$r_{e\ ,ft}$ = نصف قطر منطقة التصريف

$k_h, k_{v\ ,md}$ = النفوذية العمودية والنفوذية الافقية على التوالي.

٤-٤-٢-٢- طريقة الحل العددية: تعتمد على عدد كبير من عمليات المحاكات مع اكثر من خمسين قيمة للمعدل الحرج واستخدموا عملية تحليل الميل لوضع العلاقة التالية:

$$Q_{oc} = 0.924 \times 10^{-4} \frac{k_o(\rho_w - \rho_o)}{\mu_o B_O} \left[1 - \frac{h_p}{h}\right]^2 h^{2.238} [\ln r_e]^{-1.99} \qquad (4-13)$$

من اجل مكمن متباين الخواص فقد ربط الباحثون بين معدلات التدفق الحرجة اللابعدية وبين انصاف الاقطار اللابعدية لخمسة مقاطع مختلفة من الابار المخترقة واوضحوا منهج عملهم في الشكل التخطيطي كم هو مبين بالشكل (٤-١٦) واوضحوا طريقتهم في المثال التالي:

٤-٢-٥- مخططات المعدل الحرج المقدمة من قبل تشاني واخرون(١٩٥٦):

وضعوا مجموعة من المنحنيات العملية لتحديد معدل التدفق الحرج للنفط والتي تم انشاؤها باستخدام دراسة تحليل الجهد وتطبيق النظرية الرياضية لمخروط الماء والمنحنيات مبينة في الاشكال من (٤-١٨) وحتى (٤-٢٢) والتي تستخدم بشكل عام خصائص المائع والصخر التالية:

$r_w = 3"$	$r_e = 1000\ ft$	h= 12.5-25-50-75-100	$\rho_o - \rho_g = 37.44\ l/ft^3$
$\mu_o = 1\ cp$	K=1000 md	$\rho_w - \rho_o = 18.72\ l/ft^3$	

صممت المنحنيات لتحديد معدل التدفق الحرج في منظومة ماء- نفط وغاز نفط وغاز- ماء

يتم تحديد المعدلات الافتراضية من المنحنيات المذكورة اعلاه اي تعيين(Q_{curve}) ونحصل على معدلات التدفق المصححة من اجل الخصائص الفعلية (الحقيقية) لصخر ومائع المكمن بتطبيق العلاقات التالية:

١- في منظومة نفط – ماء :

$$Q_{oc} = 0.5288 \times 10^{-4} \left[\frac{k_o(\rho_w - \rho_o)}{\mu_o B_o}\right] Q_{curve} \qquad (4-14)$$

حيث ان:

$\rho_w, \rho_{o(lb/ft^3)}$ = هي كثافة النفط وكثافة الماء على التوالي .

$k_{o(md)}$ = هي النفوذية الفعالة للنفط.

$Q_{oc(SBT/day)}$ = معدل التدفق الحرج للنفط.

٢- في منظومة غاز – ماء :

$$Q_{oc} = 0.5288 \times 10^{-4} \left[\frac{k_g(\rho_w - \rho_g)}{\mu_g B_g}\right] Q_{curve} \qquad (4-15)$$

حيث ان :

$\rho_w, \rho_{g(lb/ft^3)}$ = هي كثافة الغاز وكثافة الماء على التوالي .

$k_{o(md)}$ = هي النفوذية الفعالة للغاز.

$Q_{oc(SBT/day)}$= معدل التدفق الحرج للغاز.

$B_{g(bbl/Mscf)}$= عامل حجم الغاز.

٣- في منظومة غاز – نفط:

$$Q_{oc} = 0.2676 \times 10^{-4} \left[\frac{k_o(\rho_o - \rho_g)}{\mu_o B_o}\right] Q_{curve} \qquad (4-16)$$

٤-٢-٦- **طريقة تشابرسون:** اقترح طريقة بسيطة لتحديد معدل التدفق الحرج للبئر العمودي لتشكيل يكون فيه $(k_v = k_h)$ والتي لها الشكل التالي:

$$Q_{oc} = 0.0783 \times 10^{-4} \left[\frac{k_h(h - h_p)^2}{\mu_o B_o}\right] (\Delta\rho) q_c^* \qquad (4-17)$$

حيث ان :

$Q_{oc(STB/day)}$ = معدل التدفق الحرج للنفط.

$k_{h(md)}$ = النفوذية الافقية للتشكيل.

$\Delta\rho = \rho_w - \rho_{o(lb/ft^3)}$ = فرق الكثافة بين الماء والنفط.

$h, h_{p(ft)}$ = طول المجال المثقب وسماكة المنطقة النفطية على التوالي.

ربط الباحث جوسي (١٩٩١) بين المعامل (q_c^*) والمؤشر $(\alpha")$ كما يلي:

$$q_c^* = 0.7311 + \left(\frac{1.943}{\alpha"}\right) \qquad (4-18)$$

$$\alpha" = \left(\frac{r_e}{h}\right)\sqrt{\frac{h_v}{k_h}} \qquad (4-19)$$

٤-٢-٧- طريقة سكولز(١٩٧٢) : وضع علاقة لتحديد المعدل الحرج للنفط تعتمد على النتائج المحصول عليها من النمذجة العددية والتجارب المخبرية وهي:

$$Q_{oc} = 0.0783 \times 10^{-4}\left[\frac{k_o(\rho_w - \rho_o)(h^2 - h_p^2)}{\mu_o B_O}\right] \times \left[0.432 + \frac{3.142}{ln\frac{r_e}{r_w}}\right] \times \left(\frac{h}{r_e}\right)^{0.14} \qquad (4-20)$$

حيث ان :

$k_{o(md)}$ = النفوذية الفعالة للنفط.

$\rho_w, \rho_{o(lb/ft^3)}$ = هي كثافة النفط وكثافة الماء على التوالي .

$r_w, h_{p(ft)}$ = طول المجال المثقب ونصف قطر البئر غلى التوالي.

٤-٢-٨- طريقة سوبوسنسكي و كورنيليوس:

في كثير من الاحيان تكون المعدلات المطلوب انتاجها اعلى من قيم معدلات التدفق الحرجة مما يؤدي الى اختراق المخروط للبئر بعد فترة زمنية معينة والذي يدعى زمن الاختراق.

لقد وضع سوبوسنسكي وكورنيليوس (١٩٦٥) علاقة لتحديد زمن الاختراق (t_{BT}) بالاعتماد على المعطيات المخبرية والنمذجة ،حيث ربطوا بين زمن الاختراق ومؤشرين لابعديين هما :

ارتفاع المخروط اللابعدي(Z)- وزمن الاختراق اللابعدي ($t_{D_{(BT)}}$) واللذان يتم تحديدهما

بالمعادلات التالية:

$$z = 0.0492 \times 10^{-4} \frac{(\rho_w - \rho_o)k_h \times h(h - h_p)}{\mu_o B_o Q_o} \qquad (4-21)$$

$$t_{D_{BT}} = \frac{4Z + 1.75Z^2 - 0.75Z^3}{7 - 2Z} \qquad (4-22)$$

وبعدها يحسب زمن الاختراق من العلاقة التالية:

$$t_{BT} = \frac{20325\mu_o . h. \emptyset t_{D_{BT}}}{(\rho_w - \rho_o)k_v(1 + M^{\alpha})} \qquad (4-23)$$

$$M = \left[\frac{[k_{rw}]_{sor}}{(k_{ro})_{swc}}\right]\left(\frac{\mu_o}{\mu_w}\right) \qquad (4-24)$$

حيث ان :

$\rho_w, \rho_{o(lb/ft^3)} =$ هي كثافة النفط وكثافة الماء على التوالي .

$h, h_{p(ft)} =$ طول المجال المثقب وسماكة الطبة المنتجة على التوالي.

$k_v, k_{h(md)} =$ النفوذية الافقية والنفوذية العمودية للتشكيل على التوالي.

$Q_{oc(STB/day)} =$ معدل انتاج النفط.

M = نسبة قابلية الحركة وتساوي نسبة قابلية الحركة للماء الى نسبة قابلية الحركة للنفط

$$M = \frac{M_W}{M_O} \; ; M_i = \frac{K_i}{\mu_i}$$

$(k_{ro})_{swc}$ = النفوذية النسبية للنفط عند درجة التشبع بالمياه المترابطة.

$(k_{rw})_{sor}$= النفوذية النسبية للماء عند درجة التشبع بالنفط المتبقي.

$$\alpha = 0.5 \; FOR \; M = 1; \; \alpha = 0.6 \; FOR \; 1 < M < 10$$

اختبر جوشي المعادلة (٤-٢٢) واستنتج انه اذا $(Z \geq 3.5)$ فلن يعتمد الاختراق في هذه كانت الحالة على المعادلة (٤-٢١) ولهذا اوجد معادلة لحساب معدل التدفق الحرج للنفط كما يلي:

$$Q_{oc} = 0.141 \times 10^{-4} \left[\frac{k_h(\rho_w - \rho_o)(h - h_p)}{\mu_o B_o}\right] \qquad (4-25)$$

٤-٢-٩- طريقة بورنازيل و جينسون:

بالاعتماد على المعطيات التجريبية قدموا منهجية حسابية تعتمد على المجموعة اللابعدية ذاتها المقترحة من قبل سوبوسنسكي و كورنيليوس حيث يتم حساب زمن الاختراق كما يلي:

خطوة (١) يتم حساب ارتفاع المخروط اللابعدي من المعادلة (٤-٢١).

خطوة (٢) يتم حساب زمن الاختراق اللابعدي من المعادلة التالية:

$$t_{D\,BT} = \frac{Z}{3 - 0.7\,Z} \qquad (4-26)$$

خطوة (٣) يتم حساب زمن الاختراق من المعادلة (٤-٢٣).

بين جوشي(١٩٩١) انه لا يحدث الاختراق اذا كانت ($Z \geq 4.286$) (لأنها تجعل المقام يساوي صفر او يصبح الكسر اصغر من الواحد) كما يظهر من المعادلة(٤-٢٦) ولهذا اوجد معادلة لحساب معدل التدفق الحرج للنفط كما يلي

$$Q_{oc} = 0.1148 \times 10^{-4} \left[\frac{k_h(\rho_w - \rho_o)(h - h_p)}{\mu_o B_o}\right] \qquad (4-27)$$

٤-٣- الادائية بعد اختراق المخروط المائي للبئر:

بمجرد حدوث اختراق المياه للبئر فانه من الهام التنبؤ بإنتاجيه المياه كتابع للزمن وبشكل طبيعي يتم استخدام النماذج الشعاعية العددية لحل مثل هذه المشكلة، حاليا لا يوجد حل تحليلي بسيط للتنبؤ بأدائية البئر العمودي بعد الاختراق.

طبق كو و ديسبريساج (١٩٩٣) معادلة توازن المادة للتنبؤ بمقدار ارتفاع خط التقاء النفط مع الماء في المكمن غير المتجانس وللحصول على نتائج استخدموا البارامترات اللابعدية التالية:

تدفق الماء اللابعدي (f_{w_D})

زمن الاختراق اللابعدي $(t_{D_{BT}})$

كمية تدفق المياه اللابعدية $(w_c)_{limit}$

وخطوات الحساب هي كما يلي:

خطوة (١) يتم حساب زمن الاختراق باستخدام احدى الطرق السابقة الذكر.

خطوة (٢) افتراض أي زمن (t) بعد حدوث الاختراق.

خطوة (٣) احسب زمن الاختراق اللابعدي من العلاقة التالية:

$$t_{D_{BT}} = \frac{t}{t_{BT}} \qquad (4-28)$$

خطوة (٤) احسب تدفق الماء اللابعدي من العلاقة التالية:

$$(w_c)_{limit} = \frac{M}{M + (h/h_w)} \qquad (4-29)$$

M تحسب من المعادلة (٤-٢٤)

$$h = H_o(1-R) \qquad (4-30)$$

$$h_w = H_w(H_O \times R) \qquad (4-31)$$

$$R = \frac{N_P}{N}\left[\frac{1-S_{WC}}{1-S_{or}-S_{wc}}\right] \qquad (4-32)$$

حيث ان :

$(WC)_{limit}$ القيمة الحالية لكمية تدفق المياه اللابعدية.

$(\mu_w, \mu_{o(md)})$ لزوجة النفط ولزوجة الماء على التوالي.

$(h, H_{o(ft)})$ السماكة الاولية للطبقة النفطية والسمكة الحالية للمنطقة النفطية على التوالي.

$(\mathrm{h}_w, H_{w(ft)})$السماكة الاولية للطبقة المائية والسمكة الحالية للمنطقة المائية على التوالي.

$(N, N_{P(STB)})$ الانتاجية التراكمية من النفط والاحتياطي الجيولوجي على التوالي.

خطوة (٥) حساب تدفق الماء اللابعدي(f_{w_D}) بالاعتماد على نسبة زمن الاختراق اللابعدي

$$f_{w_D} = 0 \;;\; FOR\; t_{D_{BT}} < 0.5 \qquad (4-33)$$

$$f_{w_D} = 0.29 + 0.94\log\left(t_{D_{BT}}\right) \;;\; FOR \quad 0.5 \le t_{D_{BT}} \le 0.57 \qquad (4-34)$$

$$f_{w_D} = 1 \;;\; FOR\; t_{D_{BT}} > 0.57 \qquad (4-35)$$

خطوة (٦) احسب الكمية الحقيقية للمياه المتدفقة من المعادلة:

$$f_w = (f_{wD})(w_c)_{limit} \quad (4-36)$$

خطوة (٧) احسب معدل انتاج النفط والماء من العلاقات التالية:

$$Q_w = f_w \times Q_T \quad (4-37)$$

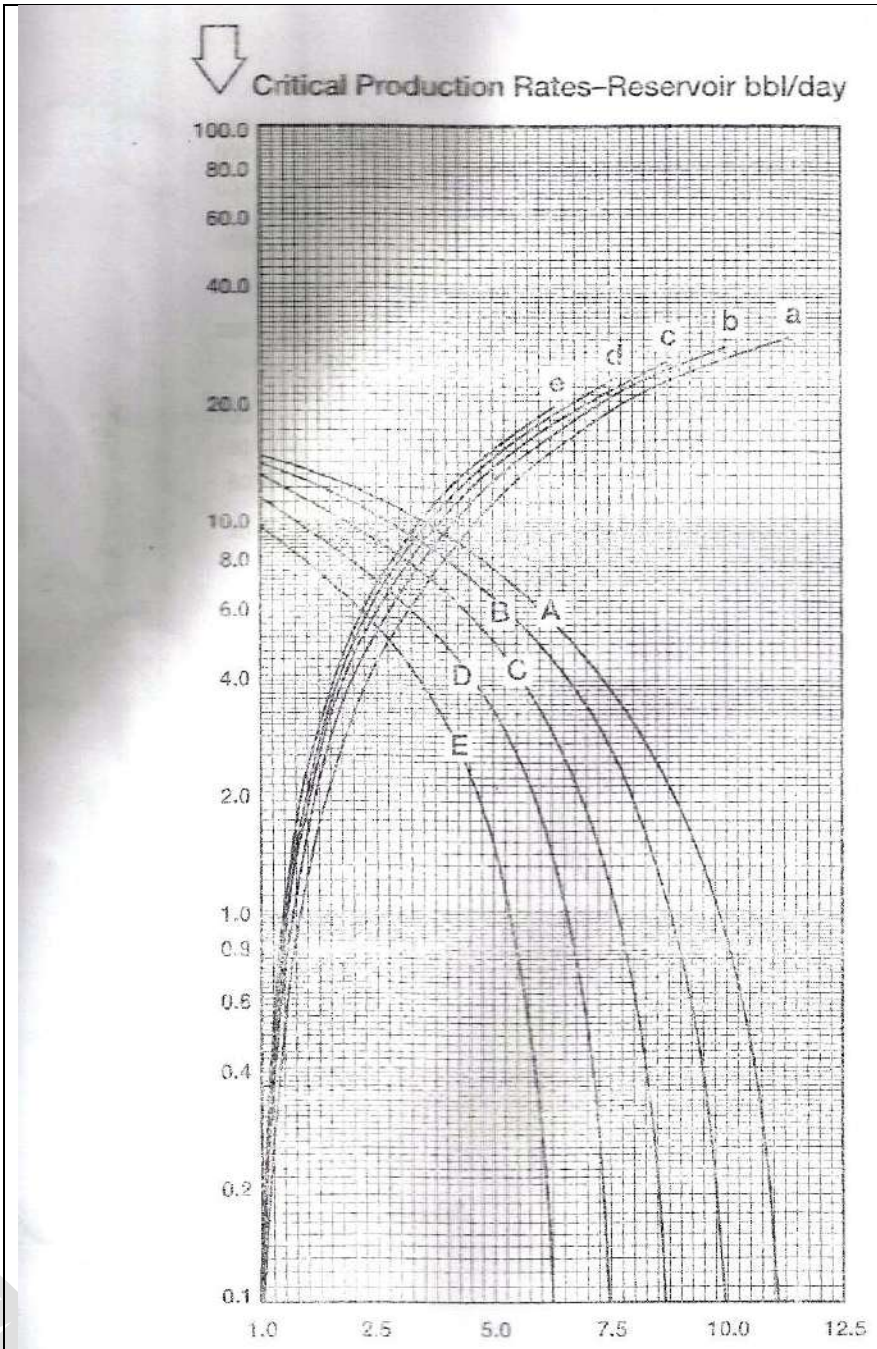
$$Q_O = Q_T - Q_W \quad (4-38)$$

حيث ان :

Q_T, Q_W, Q_O هي معدلات تدفق النفط والماء ومعدل التدفق الكلي التوالي.

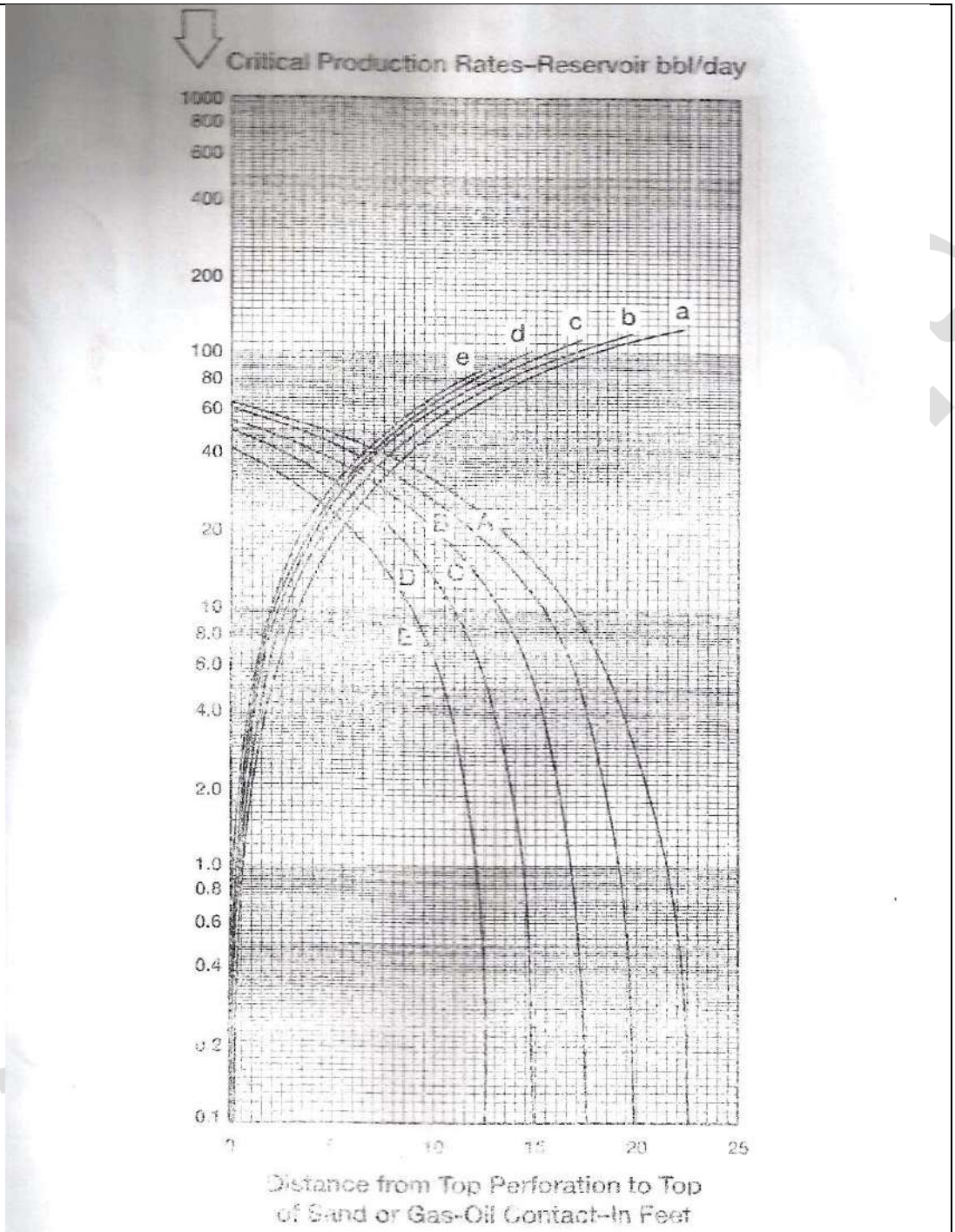
وتجدر الاشارة الى انه مع ازدياد انتاج النفط سيرتفع خط التقاء النفط مع الماء وستزداد كمية المياه المنتجة وسوف تقل قيمة$(W_{C_{limit}})$ عند الحسابات المستقبلية.

د. ايمن شقوف



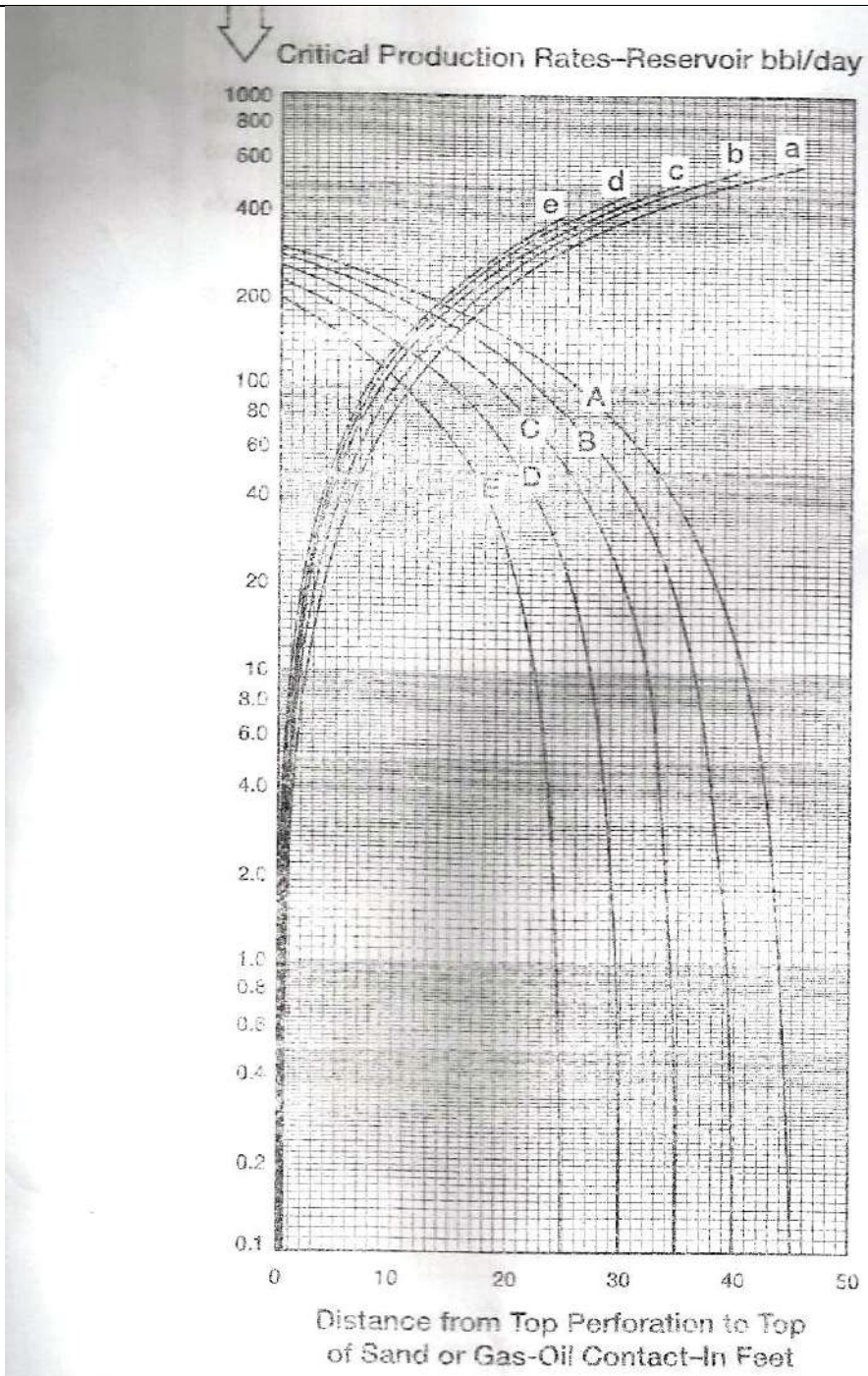
Critical-production-rate curves for sand thickness of 12.5 ft., well radius of 3 in., and drainage radius of 1,000 ft. Water coning curves: A, 1.25 ft. perforated interval; B, 2.5 ft.; C, 3.75 ft.; D, 5.00 ft.; and E, 6.25 ft. Gas coning curves: a, 1.25 ft. perforated interval; b, 2.5 ft.; c, 3.75 ft.; d, 5.00 ft., and e, 6.25 ft.

الشكل (٤-١٤) منحنيات معدلات الانتاج الحرجة



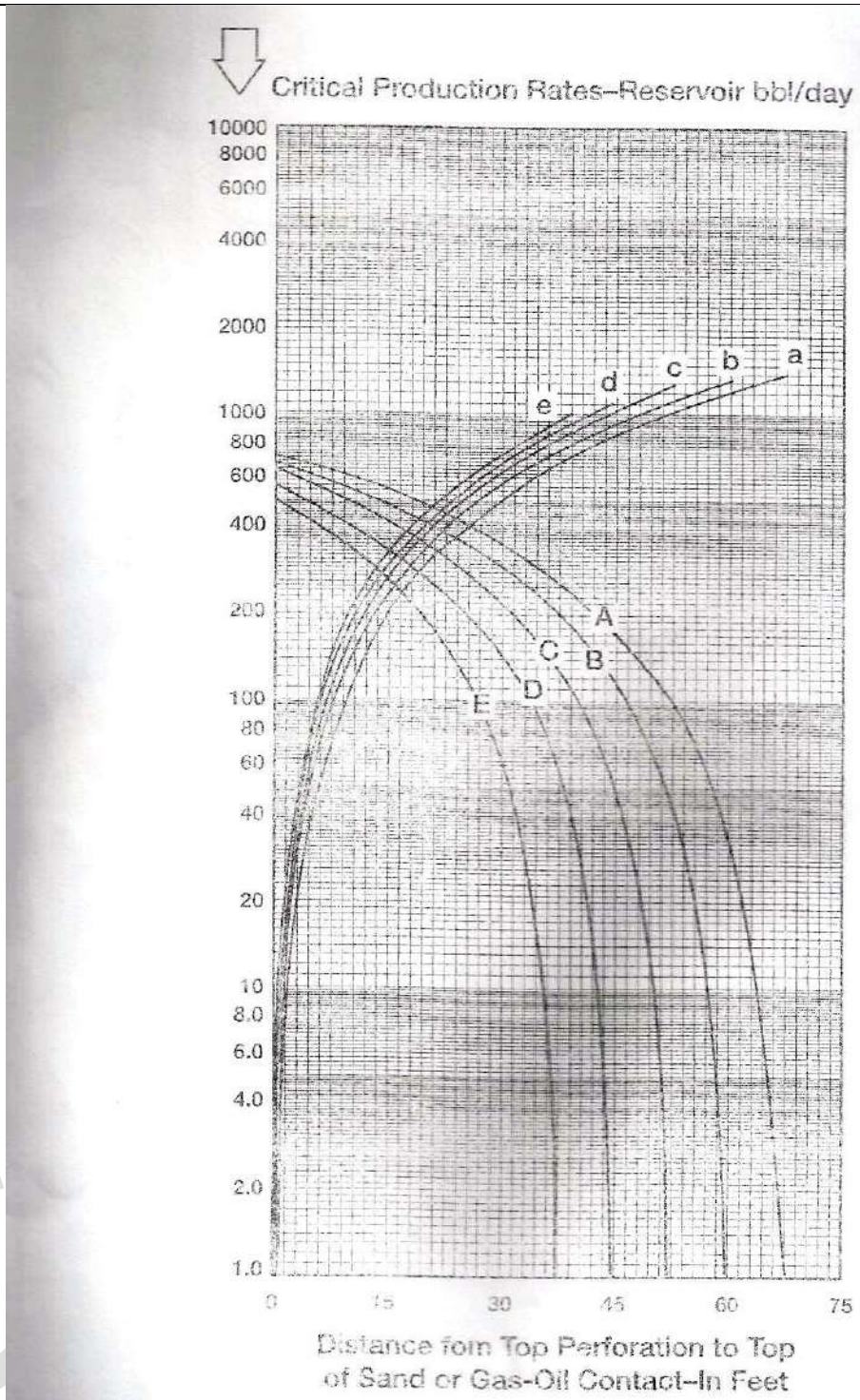
Critical-production-rate curves for sand thickness of 25 ft., well radius of 3 in., and drainage radius of 1,000 ft. Water coning curves: A, 2.5 ft. perforated interval; B, 5 ft.; C, 7.5 ft.; D, 10 ft.; and E, 12.5 ft. Gas coning curves: a, 2.5 ft. perforated interval; b, 5 ft.; c, 7.5 ft.; d, 10 ft., and e, 12.5 ft.

الشكل (٤–١٥) منحنيات معدلات الانتاج الحرجة



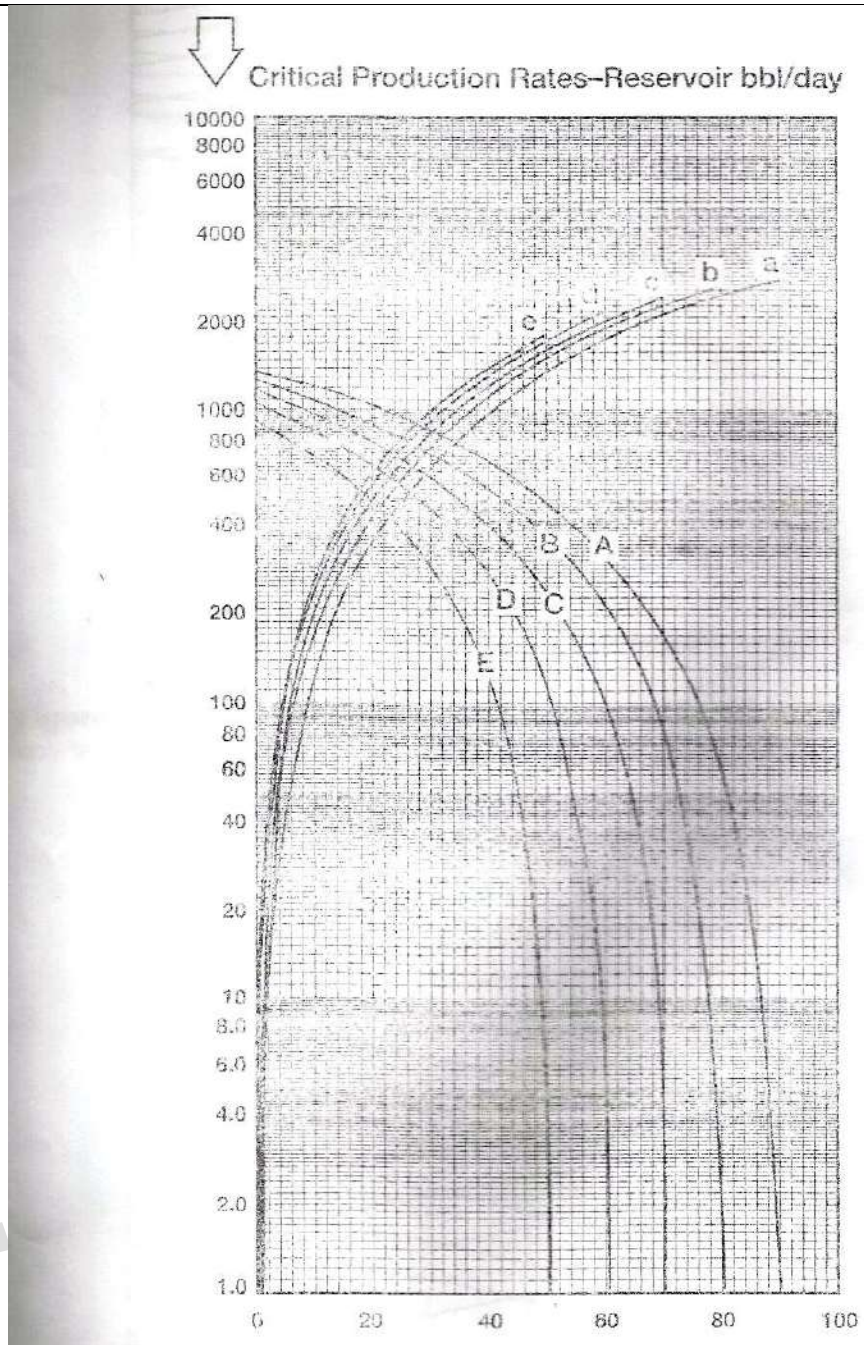
Critical-production-rate curves for sand thickness of 50 ft., well radius of 3 in., and drainage radius of 1,000 ft. Water coning curves: A, 5 ft. perforated interval; B, 10 ft.; C, 15 ft.; D, 20 ft.; and E, 25 ft. Gas coning curves: a, 5 ft. perforated interval; b, 10 ft.; c, 15 ft.; d, 20 ft.; and e, 25 ft.

الشكل (٤-١٦) منحنيات معدلات الانتاج الحرجة



Critical-production-rate curves for sand thickness of 75 ft., well radius of 3 in., and drainage radius of 1,000 ft. Water coning curves: A, 7.5 ft. perforated interval; B, 15 ft.; C, 22.5 ft.; D, 30 ft.; and E, 37.5 ft. Gas coning curves: a, 7.5 ft. perforated interval; b, 15 ft.; c, 22.5 ft.; d, 30 ft., and e, 37.5 ft.

الشكل (٤–١٧) منحنيات معدلات الانتاج الحرجة



Critical-production-rate curves for sand thickness of 100 ft., well radius of 3 in., and drainage radius of 1,000 ft. Water coning curves: A, 10 ft. perforated interval; B, 20 ft.; C, 30 ft.; D, 40 ft.; and E, 50 ft. Gas coning curves: a, 10 ft. perforated interval; b, 20 ft.; c, 30 ft.; d, 40 ft.; and e, 50 ft.

الشكل (٤–١٨) منحنيات معدلات الانتاج الحرجة

Time days	Oil Rate STB/day	Water Rate STB/day	Water Cut Fraction	Cum. Oil MSTB	Oil Rec. %
120.	406.5	93.5	0.187	59.999	1.38
135.	379.9	120.1	0.240	65.897	1.52
150.	355.8	144.2	0.288	71.415	1.64
165.	333.8	166.2	0.332	76.587	1.76
180.	313.5	186.5	0.373	81.442	1.87
195.	294.5	205.5	0.411	86.002	1.98
210.	276.9	223.1	0.446	90.287	2.08
765.	239.3	260.7	0.521	177.329	4.08
1020.	226.4	273.6	0.547	236.676	5.45
1035.	225.6	274.4	0.549	240.066	5.53
1575.	202.4	297.6	0.595	355.425	8.18
2145.	182.4	317.6	0.635	464.927	10.70
2415.	174.2	325.8	0.652	513.062	11.81
2430.	173.8	326.2	0.652	515.672	11.87
2445.	173.4	326.6	0.653	518.276	11.93
3300.	151.5	348.5	0.697	656.768	15.12
3615.	144.6	355.4	0.711	703.397	16.19
3630.	144.3	355.7	0.711	705.564	16.24
3645.	144.0	356.0	0.712	707.727	16.29

الجدول (٤-١) نتائج الحسابات

Time days	Oil Rate STB/day	Water Rate STB/day	Water Cut Fraction	Cum. Oil MSTB	Oil Rec. %
80.	674.7	325.3	0.325	64.14	1.48
95.	594.2	405.8	0.406	73.66	1.70
110.	524.8	475.2	0.475	82.05	1.89
125.	463.2	536.8	0.537	89.46	2.06
140.	407.8	592.2	0.592	95.99	2.21
335.	494.8	505.2	0.505	145.68	3.35
905.	390.8	609.2	0.609	395.80	9.11
1115.	362.4	637.6	0.638	474.81	10.93
1130.	360.5	639.5	0.639	480.23	11.05
1475.	321.8	678.2	0.678	597.70	13.76
1835.	288.8	711.2	0.711	707.42	16.28
1850.	287.5	712.5	0.712	711.74	16.38
1865.	286.3	713.7	0.714	716.04	16.48
1880.	285.1	714.9	0.715	720.33	16.58
1895.	283.8	716.2	0.716	724.59	16.68
2615.	234.4	765.6	0.766	910.20	20.95
2630.	233.5	766.5	0.766	913.71	21.03
3065.	210.4	789.6	0.790	1010.11	23.25
3080.	209.6	790.4	0.790	1013.26	23.32
3620.	185.8	814.2	0.814	1119.83	25.78
3635.	185.2	814.8	0.815	1122.61	25.84
3650.	184.6	815.4	0.815	1125.39	25.90

الجدول (٤-٢) نتائج الحسابات

Time days	Oil Rate STB/day	Water Rate STB/day	Water Cut Fraction	Cum. Oil MSTB	Oil Rec. %
80.	742.1	[illegible]	0.305	67.98	1.56
260.	734.6	765.4	0.510	160.34	3.69
275.	727.1	772.9	0.515	171.31	3.94
290.	719.6	780.4	0.520	182.16	4.19
770.	541.8	958.2	0.639	481.00	11.07
785.	537.6	962.4	0.642	489.10	11.26
800.	533.5	966.5	0.644	497.13	11.44
1295.	423.5	1076.5	0.718	732.08	16.85
1310.	420.8	1079.2	0.719	738.42	17.00
1325.	418.1	1081.9	0.721	744.71	17.14
2060.	315.7	1184.3	0.790	1011.42	23.28
2075.	314.0	1186.0	0.791	1016.14	23.39
2090.	312.4	1187.6	0.792	1020.84	23.50
2105.	310.8	1189.2	0.793	1025.51	23.60
2120.	309.2	1190.8	0.794	1030.16	23.71
2135.	307.6	1192.4	0.795	1034.79	23.82
2705.	255.5	1244.5	0.830	1194.54	27.50
3545.	206.1	1293.9	0.867	1384.48	31.87
3650.	194.4	1305.6	0.870	1405.19	32.34

الجدول (٤-٣) نتائج الحسابات

الفصل الخامس

مفهوم الازاحة

الازاحة : تعني إزاحة النفط من الطبقة المنتجة (المكمن) إلى قاع البئر بواسطة الماء أو الغاز.

ويوجد نوعين من الازاحة هما:

- الازاحة الامتزاجية. (miscible displacement)
- الازاحة اللاامتزاجية. (immiscible displacement)

٥- ١- الازاحة اللامتزاجية:

وهي عملية إزاحة النفط من الطبقة المنتجة الى البئر بواسطة الماء (طورين غير قابلين للامتزاج مع بعضهما البعض)، عند إزاحة النفط بالماء تتشكل جبهة إزاحة بين النفط والماء انظر الشكل (1-5).

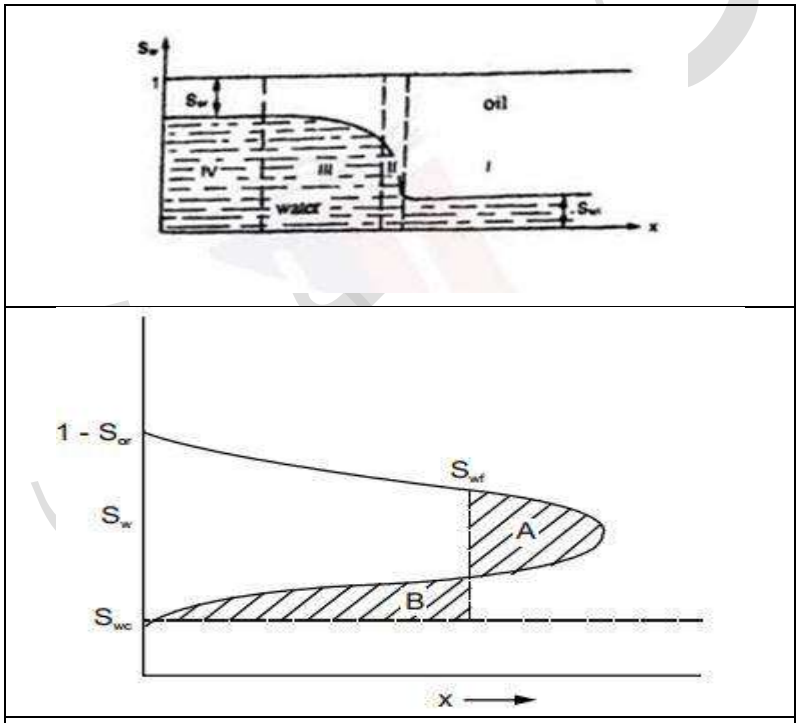
نميز على الشكل المناطق التالية:

I- تحتوي على نفط متحرك دون وصول الازاحة بالماء اليه.

II- منطقة ارتفعت فيها نسبة التشبع بالماء.

III – منطقة تغيرت فيها نسبة التشبع بالماء بشكل تدريجي

IV - منطقة فيها نسبة المياه ثابتة تقريبا واعظمية



الشكل(1-5) توزع التشبع بالماء على طول مسار الازاحة

٥-٢- الازاحة الامتزاجية:

يقصد بالإزاحة الامتزاجية : هي الازاحة التي يصبح خلالها المائع المزيح والمائع المزاح ممتزجين في كل النسب وعلى الأقل على نطاق موضعي ومن هنا فان طبيعة المائع المزيح ذات أهمية كبيرة في الحصول على عامل مردود أعلى للنفط .

تهدف الإزاحة الامتزاجية إلى إزاحة اكبر كمية ممكنة من النفط ، مما يجعل درجة التشبع بالنفط المتبقي بأقل قيمة ممكنة.

تصبح إزاحة النفط بالغاز فعالة جدا عندما تتماثل كلا من خصائص الغاز المزيح والنفط المزاح ويحقق الطوران – في هذه الحالة – امتزاجية كاملة بحيث يختفي الحد الفاصل بين السائل والغاز ويشكلان طورا واحدا متجانسا.

يتم التحكم بالامتزاجية بواسطة الضغط ودرجة الحرارة و تركيب النفط والمائع المزيح .

يكون الغاز المحقون بشكل أولي في توازن مع نفط المكمن حيث يؤدي التماس بين الأطوار إلى تحول الكتلة وبالتالي تغير خصائص الطورين.

٥-٢-١- العوامل التي تؤثر على سلوك الازاحة الامتزاجية:

١- نسبة قابلية الحركة .

٢- تشتت المائع.

٣- نظام التدفق.

٤- التصبع اللزج.

٥- كفاءة الازاحة والكسح.

٥-٢-١-١- نسبة قابلية الحركة: تعرف قابلية الحركة لمائع ما(M_i) بأنها نسبة النفودية (K_i) إلى اللزوجة (μ_i) أي:

$$M_i = \frac{K_i}{\mu_i} \qquad (5\text{-}1)$$

في حسابات عملية الازاحة فان المفهوم المستخدم هو نسبة قابلية الحركة (M) وهي نسبة قابلية الحركة للمائع المحقون (المُزيح) M_{inj} إلى قابلية الحركة للمائع المزاح M_{des} :

$$M = \frac{M_{inj}}{M_{des}} \qquad (5\text{-}2)$$

حيث ان (M) هي كمية لابعدية ومؤشر هام جدا في أية عملية إزاحة والتي تؤثر على كلا من الكسح المساحي والعمودي، فبازدياد قيمة (M) تنخفض الازاحة عند حجم معين معطى للمائع المحقون وابعد من ذلك فهي تؤثر على استقرار عمليات الازاحة.

يصبح التدفق غير مستقر (جبهة إزاحة غير منتظمة) عندما تكون (M>1) ويدعى هذا التدفق غير المستقر بالتصبع اللزج، وبالنتيجة فان القيمة (M>1) غير مرغوب فيها ويجب ان تكون (M<1).

عند الغمر المائي وبافتراض ان الإزاحة مكبسية ومع تدفق الماء فقط في مؤخرة جبهة الإزاحة والنفط يتدفق في مقدمة جبهة الإزاحة يمكن ان نكتب:

$$M = \left(\frac{K_{rw}}{\mu_w}\right)_{S_{or}} \left(\frac{\mu_o}{K_{ro}}\right)_{S_{iw}} \qquad (5\text{-}3)$$

حيث ان :

K_{rw}, K_{ro} = النفوذية النسبية للنفط والماء على التوالي والمقاسة عند درجة التشبع بالنفط المتبقي.

μ_w, μ_o = لزوجة النفط والماء على التوالي.

S_{iw}, S_{or} = درجة التشبع بالنفط المتبقي والمياه الأولية على التوالي.

عموما عندما يتدفق طورين أو أكثر كلاهما في مقدمة أو مؤخرة جبهة الإزاحة عندها فان درجة التشبع بالطور يمكن أن تتغير مع تغير الموقع أو الزمن.

عرف Craig نسبة قابلية الحركة لغمر المياه (أو أية عملية إزاحة غير امتزاجية) كما يلي:

$$M_S = \frac{(M_{inj})_{\overline{S}_{inj}}}{(M_{des})_{\overline{S}_{des}}} = \left(\frac{K_{r\,inj}}{K_{rdes}}\right)_{\overline{Sinj}} \left(\frac{\mu_{des}}{\mu_{inj}}\right)_{\overline{Sdes}} \qquad (5\text{-}4)$$

حيث أن :

$(M_{inj})_{\overline{S}_{inj}}$ = قابلية الحركة للمائع المزيح المقاس عند متوسط درجة التشبع بالطور المزاح عند اختراق ذلك المائع.

$(M_{des})_{\bar{S}des}$ = قابلية الحركة للمائع المزاح المقاس عند متوسط درجة التشبع في مقدمة جبهة الإزاحة.

يوجد تعريف آخر لنسبة قابلية الحركة يعتمد على قابلية الحركة الكلية (M_t) لمقدمة أو مؤخرة جبهة الإزاحة كما يلي:

$$M_t = \frac{(M_{t\,inj})_{\bar{S}inj}}{(M_{t\,des})_{\bar{S}des}} \qquad (5\text{-}5)$$

حيث ان (M_t) هي نسبة قابلية الحركة التي تعتمد على قابليات الحركة الكلية والتي تعطى بالعلاقات التالية:

$$(M_{t\,inj})_{\bar{S}inj} = \sum_i \left(\frac{K_i}{\mu_i}\right)_{inj} \qquad (5\text{-}6)$$

$(M_{t\,inj})_{\bar{S}inj}$ = مجموع قابليات الحركة لجميع الأطوار المتدفقة في مؤخرة جبهة الإزاحة المقاسة عند متوسط درجة التشبع عند مؤخرة جبهة الإزاحة.

$$(M_{t\,des})_{\bar{S}des} = \sum_i \left(\frac{K_i}{\mu_i}\right)_{des} \qquad (5\text{-}7)$$

$(M_{t\,des})_{\bar{S}des}$ = مجموع قابليات الحركة لجميع الأطوار المتدفقة في مقدمة جبهة الإزاحة المقاسة عند متوسط درجة التشبع عند مقدمة جبهة الإزاحة.

٥-٢-١-٢- تشتت المائع:

في جميع عمليات الإزاحة القابلة للامتزاج يحدث الامتزاج بين الموائع المزيحة والمزاحة وتدعى ظاهرة المزج هذه بالتشتت والتي تؤثر على سلوك الأطوار وبالتالي فان أهمية ظاهرة التشتت تبرز عند وضع خطة لعمليات الإزاحة القابلة للامتزاج وهذا الامتزاج يؤثر على الإزاحة بطريقتين هما:

١- يمكن ان يؤدي إلى تخفيف المذيب حتى يصبح غير قابلا للامتزاج مع النفط.

٢- تغير كثافة ولزوجة الموائع ويعطي منطقة ذات كثافة ولزوجة تتراوح بين النفط والمذيب ويمكن ان يؤدي إلى تغيير سلوك الطور.

تؤثر ثلاثة عوامل في حدوث الامتزاج هما:

١- الانتشار الجزيئي: ينتج من الحركة العشوائية للجزيئات.

٢- التشتت الميكروسكوبي: ينتج من مسارات التدفق في الوسط المسامي والتي تكون صغيرة مقارنة مع ابعاد العينة الصخرية.

٣- التشتت الماكروسكوبي: ينتج من مسارات التدفق والتي تكون كبيرة مقارنة مع ابعاد العينة الصخرية.

قاس Penner et all معاملات الانتشار لـ CO_2 ومذيبات الغاز الغني وتوصلوا إلى معادلة لتحديد معامل الانتشار لـ CO_2 و CH_4 و C_2H_6 و C_3H_8 داخل الهيدروكربون السائل وهي التالية:

$$Dij = 10^{-9}\,\mu_j^{-0.4562} M_i^{-0.6989} V_i^{-1.706}\, P^{-1.831} T^{4.524} \qquad (5-8)$$

حيث ان : D_{ij} = معامل انتشار الغاز (i) داخل السائل (j) .

μ_j = لزوجة السائل.

M_i = الوزن الجزيئي للغاز المنتشر(i).

V_i = الحجم المولي للغاز المنتشر (i).

P = ضغط الاختبار ، Psi.

T = درجة حرارة الاختبار ،°F .

يحدث نوعين من التشتت أولهما التشتت الطولي وهو الذي يحدث في اتجاه التدفق وثانيهما التشتت العرضي وهو الذي يحدث بشكل عمودي على اتجاه التدفق، حيث يلعب التشتت العرضي دورا أهم بكثير من التشتت الطولي عند الإزاحة الامتزاجية غير المستقرة بفعل الجاذبية وذلك بسبب تأثير التصبع ،لأنه يحد من نمو لسان المذيب علما ان الأصابع الأكثر كبرا تتشكل على سطح التماس بين المذيب والنفط.

٥-٢-١-٣- نظام التدفق:

كما هو معروف ان الامتزاج بين المذيب والنفط يعتمد كثيرا على نظام التدفق الذي يحدث في المكمن ، يمثل الشكل (٥-٢) مصور توضيحي لمنظومات التدفق للإزاحة

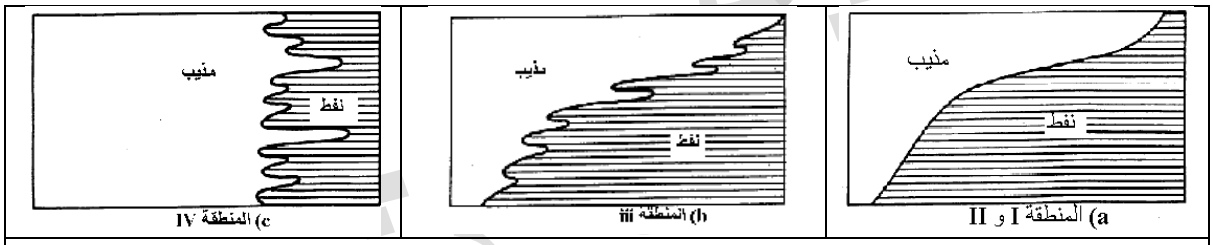
الامتزاجية، حيث تعتمد هندسة اللسان اللزج والكسح العمودي عند إزاحة النفط بمذيب على نسبة اللزوجة إلى الجاذبية ونميز المناطق التالية:

المنطقة I : نسبة قوة اللزوجة إلى الجاذبية منخفضة جدا ويوجد لسان وحيد للمذيب يتجاوز النفط.

المنطقة II : قيم عالية لنسبة اللزوجة إلى الجاذبية ولكن مازال يوجد لسان وحيد للمذيب داخل النفط، لكن الكسح لا يعتمد على نسبة اللزوجة إلى الجاذبية وذلك حتى الوصول إلى القيمة الحرجة لهذه النسبة.

المنطقة III : يتم تجاوز السرعة الحرجة في هذه المنطقة وتتشكل الأصابع الثانوية على طول السطح الفاصل بين المذيب والنفط

المنطقة IV : تسيطر الأصابع اللزجة على هذه المنطقة والكسح يتبع لنسبة اللزوجة إلى الجاذبية.



الشكل (2-5) يبين أنظمة التدفق للإزاحة الامتزاجية(مقطع عمودي)

صاغ Stalkup علاقة لحساب نسبة قوى اللزوجة إلى الجاذبية كما يلي :

$$R_{v/g} = \frac{v\,\mu_o L}{k\,g\,\Delta\rho\,h} \qquad (5-9)$$

حيث ان : v = سرعة تدفق المذيب (سرعة الحقن).

L = المسافة بين الآبار.

k = نفوذية النفط.

μ_o = لزوجة النفط.

g = تسارع الجاذبية.

$\Delta\rho$ = الفرق بالكثافة بين النفط والمذيب.

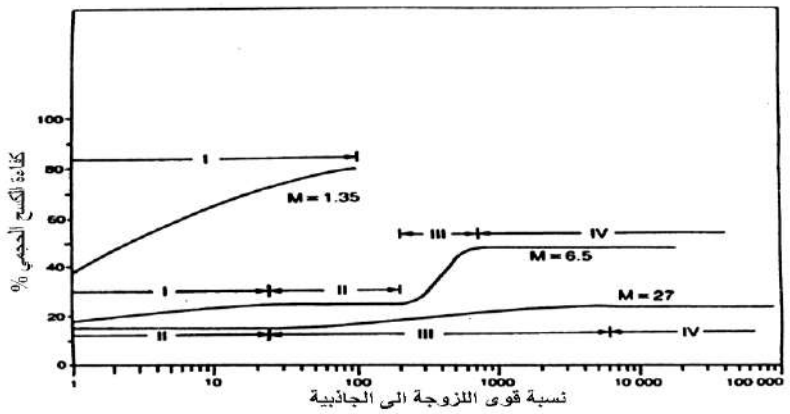
$R_{v/g}$ = نسبة اللزوجة إلى الجاذبية.

h = سماكة المكمن.

درس Stalkup كفاءة الكسح الحجمي كتابع لنسبة قوى اللزوجة إلى الجاذبية ومثل البيانات التي حصل عليها بالشكل (3-5) وذلك عند قيم مختلفة لنسبة قابلية الحركة واقترح العلاقة التالية:

$$R_{v/g} = \frac{2050\, v(bbl/day - ft^2)\mu_o(cp)L(ft)}{K(md)\Delta\rho(g/cm^3)h(ft)} \qquad (5-10)$$

وهذه العلاقة جيدة فقط عند عدم وجود تدفق ماء ، كما انه إذا كانت النفوذية العمودية لاتساوي النفوذية الأفقية ($K_V \neq K_H$) عندها يكون ($K = \sqrt{K_V \times K_H}$) ،من اجل الدفع الخطي تكون : ($v = 1.25\,\frac{i}{hL}$) ولغير الخطي تكون ($v = \frac{i}{hL}$) ،حيث ان (i) هي معدل الحقن ($bbl/day\ Per\ well$).



الشكل (3-5) يبين تأثير نسبة قوى اللزوجة إلى الجاذبية على كفاءة الكسح الحجمي

درس Craig et all كفاءة الكسح العمودي كتابع لنسبة قوى اللزوجة إلى الجاذبية تجريبيا في منظومة خطية ومثل البيانات التي حصل عليها بالشكل (4-5) وذلك عند قيم مختلفة لنسبة قابلية الحركة.

٥-٢-١-٤- التصبع اللزج:

بينا سابقا ان الأصابع اللزجة تتشكل إذا كانت نسبة اللزوجة إلى الجاذبية عالية بما فيه الكفاية.

وبين Collins انه بإهمال التشتت يحسب طول الإصبع اللزج كما يلي:

$$\in = e^{ct}$$

$$c = \frac{-k\,\Delta P\,(1-M)}{\phi\,\mu_s\left[M\,L+(1-M)x_f\right]^2} \quad ,M=\frac{\mu_o}{\mu_s} \qquad (5\text{-}11)$$

حيث ان : $\in$ = طول الإصبع اللزج .

ΔP = الانخفاض الكلي في الضغط عبر المنظومة.

L = المسافة بين الآبار.

x_f = المسافة التي قطعها المذيب.

μ_s , μ_o = لزوجة النفط والمذيب على التوالي.

ϕ = المسامية.

من المعادلة (5-11) نرى أن الأصابع الأولية تبدأ بالنمو تصاعديا مع الزمن (t) إذا كانت M>1 ويعيق التشتت الطولي والعرضي نمو الأصابع بسبب إحداث منطقة ذات لزوجة متدرجة وتغيير قيمة M .

ويُعتقد أن بدء تشكل الإصبع اللزج سببه عدم التجانس في النفوذية حيث تنمو الأصابع طولا وعرضا.

٥-٢-١-٥- كفاءة الإزاحة والكسح:

٤-٧-٥-١- كفاءة الإزاحة الماكروسكوبية: تعتمد كفاءة مردود النفط في أية عملية إزاحة على حجم المكمن الذي يكون على تماس مع المائع المحقون وتحدد كفاءة المردود(R)عند حقن الغاز بثلاثة عوامل هي: الكسح المساحي (E_A)- الكسح العمودي(E_h) – كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية (E_D).

تستعمل الإزاحة الحجمية أو كفاءة الكسح في اغلب الأحيان لتحديد مردود النفط باستخدام مفهوم التوازن المادي و تعتبر عملية الإزاحة هي التي تخفض درجة التشبع الأولية بالنفط إلى درجة التشبع بالنفط المتبقي في منطقة التماس مع المائع المحقون فإذا افترضنا أن العملية مكبسية فان النفط المزاح يعطى بالعلاقة التالية:

$$N_P = \left(\frac{S_{O1}}{B_{O1}} - \frac{S_{O2}}{B_{O2}} \right) V_P \, E_V \qquad (5-12)$$

حيث أن : N_P = النفط المزاح.

S_{O1} = درجة التشبع بالنفط عند بدء عملية الإزاحة.

S_{O2} = درجة التشبع بالنفط المتبقي عند نهاية العملية لحجم المكمن الذي على تماس مع مائع الإزاحة.

V_P = حجم الفراغات المسامية للمكمن.

B_{O2}, B_{O1} = عامل حجم النفط عند الشروط الأولية وشروط نهاية العملية على الترتيب.

وبتقسيم طرفي المعادلة (5-12) على النفط المتواجد في المكمن عند بداية العملية (N_1) فإننا نحصل على المردود الجزيئي كنتاج كفاءة الإزاحة الماكروسكوبية والميكروسكوبية ويمكن ان نكتب:

$$R = \frac{N_P}{N_1} = E_V \times E_D \qquad (5-13)$$

تعطى كفاءة الكسح (الإزاحة)الحجمي (E_V) بالعلاقة التالية:

$$E_V = E_A \times E_h \qquad (5-14)$$

حيث أن : E_A : كفاءة (الإزاحة)الكسح المساحي وهي تابع لنسبة قابلية الحركة وتساوي إلى المساحة مقسومة على المساحة الكلية للمكمن (كسر).

E_h : كفاءة(الإزاحة) الكسح العمودي وهي تابع لعدم التجانس العمودي للمكمن وتأثيرات الجاذبية وتساوي حجم الفراغ المسامي المجتاح بالمائع المحقون مقسوما على حجم الفراغ المسامي المحاصر (المطوق) في جميع الطبقات خلف جبهة الإزاحة (كسر) .

: كفاءة إزاحة الهيدروكربونات (الحجمية) الميكروسكوبية وتساوي بشكل عام إلى E_D
حجم الهيدروكربون المزاح مقسوما على حجم الهيدروكربون المتواجد في المكمن في بداية العملية المقاسة عند نفس الشروط من الضغط ودرجة الحرارة (كسر) ،وتحدد رياضيا بالعلاقة :

$$ED = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \qquad (5-15)$$

حيث أن : S_{oi}, S_{or} = درجة التشبع بالنفط الأولية والمتبقية على التوالي.

٥-٢-١-٥- كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية:

السمة الهامة لأية عملية EOR هي فعالية عملية إزالة النفط من الصخور المسامية بالمقياس الميكروسكوبي وتحدد كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية (E_D) نجاح أو فشل العملية، حيث تعكس (E_D) مقدار S_{or} (وهو درجة التشبع بالنفط المتبقي ضمن صخور المكمن عند نهاية العملية) في الأماكن التي على تماس مع موائع الإزاحة ويحددها العدد الشعري في منطقة الكسح.

يتأثر تحريك النفط المتبقي بعاملين رئيسيين هما العدد الشعري (N_C) ونسبة قابلية الحركة (M).

يتضمن العدد الشعري قوى اللزوجة والقوى الشعرية ،حيث تعكس قوى اللزوجة تدرج الضغط الذي يجبر المائع على التدفق أما القوى الشعرية فتتضمن التوتر السطحي وقابلية التبلل للصخر التي تشارك بمقاومة جريان المائع، ويعطى العدد الشعري بالعلاقة التالية:

$$N_C = \frac{v\mu}{\sigma} \qquad (5-16)$$

حيث أن : v= سرعة دارسي(m/s)
μ= لزوجة المائع المزيح (Pa.s)
σ= التوتر السطحي(N/m)

من هذه العلاقة يلاحظ أن العدد الشعري يزداد بزيادة تدفق المائع المزيح وبالتالي زيادة سرعته وبانخفاض التوتر السطحي بين المائع المزيح والمزاح، أيضا بزيادة العدد الشعري يزاح الطور المحجوز من المسامات الأصغر إلى المسامات الأكبر حيث يصبح جريانه أسهل كما

تنخفض درجة التشبع بالطور المبلل إلى حد ما ببطء حتى النقطة التي تكون فيها القوى الشعرية مسيطرة على قوى اللزوجة ويتوقف الجريان، وان الضغط الشعري الذي يجب التغلب عليه بقوى اللزوجة تابع لقوى هندسة المسام إضافة إلى خاصية التبلل والتوتر السطحي ، كما تعتبر خاصية التبلل مهمة جدا لتحريك النفط المحجوز.

إن الحل العملي الوحيد لزيادة كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية بشكل ملحوظ أكثر مما هي في الغمر المائي هو باستخدام موائع قابلة للامتزاج والتي تخفض التوتر السطحي بشكل كبير جدا (أو تزيله بالكامل) مع النفط ، هذا المائع يمكن عندئذ أن يحرك النفط المحجوز ويزيحه إلى آبار الإنتاج.

إن العدد الشعري في الإزاحة الامتزاجية يصبح غير محدود ($R_C = \infty$) وعند هذه الشروط فان درجة التشبع بالنفط المتبقي في المنطقة المكسوحة يمكن ان تنخفض إلى الصفر وكفاءة الإزاحة تقترب من الواحد إذا كانت نسبة قابلية الحركة مناسبة.

بحث العديد من الباحثين حجز وتجميع قطرات النفط في الفراغات المسامية وبينوا أن الحجز يحدث عند تساوي قوى اللزوجة مع القوى الشعرية أي تحقيق الثباتية الهيدروديناميكية.

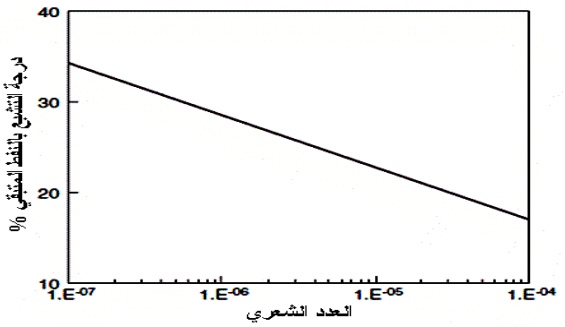
وعلاقة العدد الشعري للفراغات المسامية هي:

$$Nc = \frac{\Delta p \cdot X_C}{\sigma} \qquad (5-17)$$

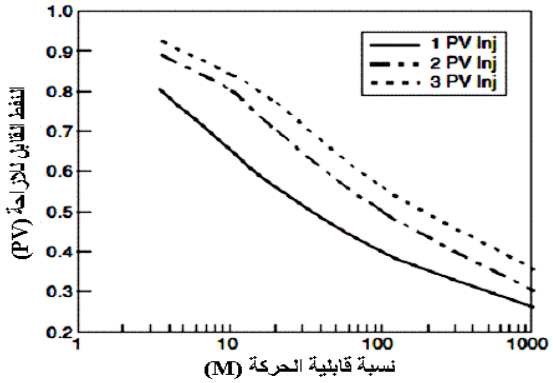
حيث ان: ΔP = هبوط الضغط عبر القنوات الشعرية.

X_C = عرض الاختناق الشعري.

الشكل (5-4) يبين تأثير العدد الشعري على درجة التشبع بالنفط المتبقي حيث يلاحظ انه عند قيمة العدد الشعري المساوية لـ (10^{-7}) كانت درجة التشبع بالنفط المتبقي (35%) وأصبحت (15%) عندما ازدادت قيمة العدد الشعري إلى القيمة (10^{-4})، والشكل (5-5) يبين تأثير نسبة قابلية الحركة على النفط القابل للإزاحة حيث يلاحظ ان كفاءة الإزاحة تزداد عندما (M=1) وتدل على نسبة قابلية الحركة المناسبة حيث تمثل المنحنيات الثلاثة كفاءة الإزاحة عند حقن مائع بنسب ١:١ و١:٢ و١:٣ من حجم الفراغات المسامية للعينة المدروسة.



الشكل (4-5) تأثير العدد الشعري على درجة التشبع بالنفط المتبقي



الشكل (5-5) تأثير نسبة قابلية الحركة على النفط القابل للإزاحة

٥-٣- دور الامتزاجية في مردود النفط:

يعتبر التوتر السطحي بين النفط والماء (IFT) بالاشتراك مع نسبة قابلية الحركة هما اللتان يمكن ان تحددان كمية النفط التي يمكن استخراجها وذلك بسبب ان قطرات النفط المتشكلة داخل المسامات المبللة بالماء تصبح محجوزة أو أن الماء يتدفق على شكل قناة ضمن المسامات المبللة بالنفط مؤديا إلى تشكل الأصابع اللزجة، وفي كل حالة يتم تجاوز النفط وتصبح نسبة الماء إلى النفط (WOR) عالية والتي تظهر عند الإنتاج من البئر بينما تبقى كمية كبيرة من النفط في المكمن.

يمكن التغلب على هذه المشاكل بغمر المكمن بمائع قابل للامتزاج مثل CO_2 والذي يمكن ان يخفض التوتر السطحي ويحرك الهيدروكربونات في شروط المكمن وبالتالي زيادة مردود النفط.

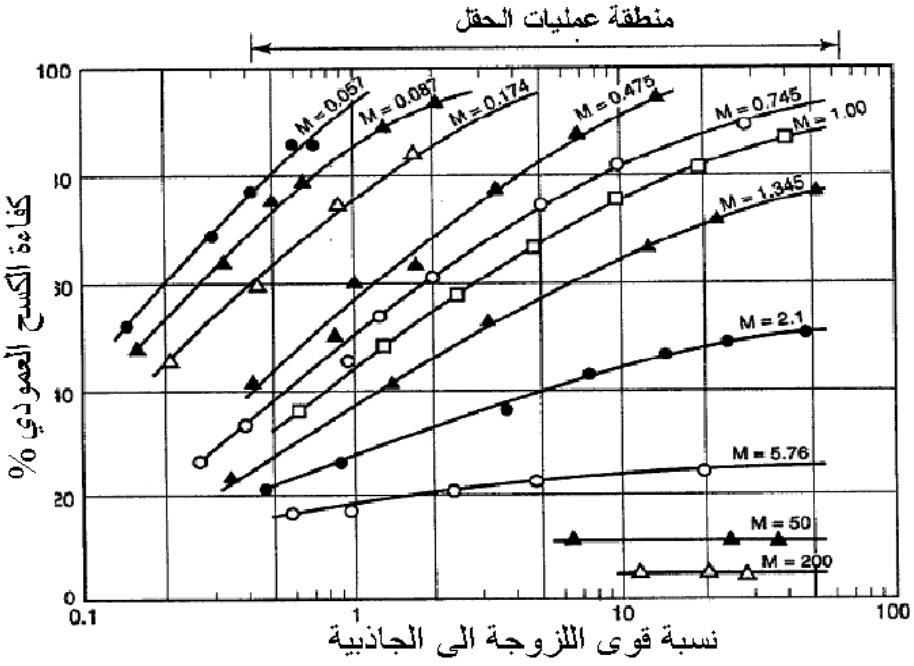
إن الآليات التي يتم فيها زيادة مردود النفط باستخدام غمر الغاز الطبيعي و CO_2 تم ذكرها سابقا في هذا البحث، حيث أن انعدام التوتر السطحي بين CO_2 والنفط الخام يؤدي إلى تحسين النفوذية النسبية لكل منهما، إن عملية الغمر المستمر باستخدام CO_2 تشابه الغمر باستخدام الماء ويفارق أن CO_2 يسبب تغيرا تدريجيا بدلا من التغير الفوري للإزاحة والأطوار المزاحة ولكن من المشاكل التي تواجه الغمر المستمر بـ CO_2 هي عدم تناسب قابلية الحركة بين CO2 والنفط الخام واستخدام كميات كبيرة من CO_2 والتي يمكن معالجتها باستخدام الحقن

المتناوب للماء مع الغاز (WAG) حيث يحقن CO_2 ويتبع بحقن الماء والتي تعتبر ذات كلفة اقتصادية مناسبة في العديد من الحالات بسبب الحجم الأقل المطلوب من CO_2 كما ان نسبة قابلية الحركة للماء – النفط مناسبة أكثر من نسبة قابلية الحركة لـ CO_2 – النفط والتي تقلل من تشكل التصبع اللزج والفصل الجاذبي مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الكسح الحجمي (الإزاحة الماكروسكوبية) ولكنها ذات إزاحة ميكروسكوبية اقل بسبب ان الماء سيمنع التماس بين النفط و CO_2كما يمكن أن تؤدي عمليات الـ (WAG) إلى تحسين ضعيف في المردود وعند احتمال حدوث مثل هذه المشاكل فان عملية الـ (WAG) لايتم اختيارها وعندها يتم اختيار العملية الثالثة وهي الحقن الدوري وذلك بإجراء حقن CO_2 وإغلاق البئر لفترة من الزمن وتسمى فترة التشرب (النقع) التي تؤدي إلى حصول انتفاخ خفيف للنفط على طول منطقة التماس مع CO_2 بشكل أفضل من مقدمة الجبهة وهذا يزيد في الجريان الجزئي للنفط حيث تكون لزوجة النفط أقل والتوتر السطحي أقل بين CO_2 والنفط الخام وهذا يسمح بهجرة كمية أكبر من النفط وبعدها يتم إنتاج النفط من نفس البئر،

تعتبر طريقة التشرب (النقع) بالتناوب مع الغاز(SAG) طريقة بديلة تنوب عن طريقة التحكم بنسبة قابلية الحركة وهي مناسبة بشكل ممتاز لشروط المكمن حيث يكون حقن الماء غير ممكن بسبب نفوذية ضعيفة أو مياه ملوثة أو اماهة عالية للآبار ، دورة حقن CO_2 في طريقة الانتفاخ تُجرى بتشتيت CO_2 في كافة أنحاء المكمن حيث يحدث بعدها انتقال الكتلة بين النفط و CO_2 خلال فترة النقع مما يسمح بإزاحة النفط بشكل فعال، هذا الأسلوب من التحسين المثالي في عملية حقن CO_2 باستخدام فترات نقع تتناوب مع الغاز لها مدة محددة من الزمن و يمكن ان تكون ناجحة ضمن مجال شروط الامتزاجية الضعيفة أو القريبة من الامتزاجية.

تتجلى كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية من خلال درجات التشبع في منطقة الكسح وبمعنى آخر وراء جبهة الغمر كما أن العلاقة بين النفوذية النسبية ودرجة التشبع تتضمن قوى اللزوجة والقوى الشعرية حيث تتجلى قوى اللزوجة بمقدار تدرج الضغط الذي يجبر الموائع على التدفق

بينما القوى الشعرية تحدد بالتوتر السطحي وقابلية تبلل الصخر التي تساهم في مقاومة جريان المائع .



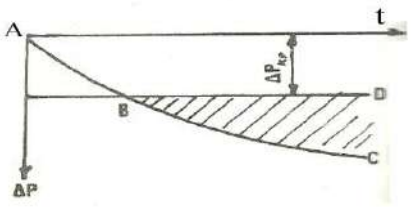
الشكل (6–5) يبين كفاءة الإزاحة العمودية كتابع لنسبة قوى اللزوجة إلى الجاذبية

الفصل السادس

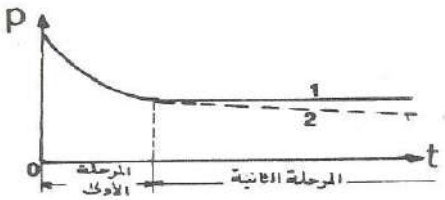
استثمار المكامن النفطية عند النظام المرن

٦-١- تأثير عامل مرونة الطبقة على الضغط الطبقي

لدى استثمار المكامن ذات الابعاد الكبيرة عند الضغوط الطبقية الاولية المرتفعة ستحدث عمليات مطولة لتوزع الضغط فيها نتيجة الصفات المرنة للطبقة والسائل، حيث ان انخفاض الضغط في منطقة الاستثمار يؤدي الى تمدد السائل وتقلص المسامات وبالتالي ازاحة السائل الى الابار. ان سرعة انخفاض الضغط لدى استخراج كمية من السائل ستكون غير متجانسة. في المرحلة الأولى للاستثمار سيحدث انخفاض سريع في الضغط وستخف حدته قليلا فيما بعد انظر الشكل (٦-١).



الشكل (٦-١) تغير الضغط الطبقي مع الزمن عند شروط النظام المرن



الشكل (٦-٢) منحني تغير الضغط مع الزمن عند شروط النظام المرن والذي يسمح بتعيين الزيادة الضرورية من الضغط أثناء الحقن

إذا كان لدينا كونتور تغذية طبيعي يستطيع تعويض كمية من السائل المستخرجة من الطبقة فانه في اللحظة التي يصبح فيها الضغط في المكمن مساويا الضغط على كونتور التغذية، فان الضغط في الطبقة سيثبت (المنحني (١) من الشكل (٦-١)) اما إذا كانت أبعاد المكمن محدودة أو ان كمية الطاقة المصروفة للاستثمار لاتعوضها الطاقة الطبقية فان انخفاض الضغط سيستمر (المنحني (٢) من الشكل (٦-١)) حتى يصل إلى قيمة اقل من ضغط الإشباع أو بالأحرى بدء نظام الغاز المنحل.

الشكل (٦-٢) يوضح أيضا تغير الضغط مع الزمن في الطبقة عند النظام المرن وفاقد الضغط الحرج والذي لا يفضل اعطاء قيما اكبر منه.

في الآبار يمكن اعطاء قيمة لفاقد الضغط مساوية للقيمة الحرجة لضغط التدفق الذاتي.

في الطبقة تعطى قيمة لفاقد الضغط مساوية لضغط الإشباع، حيث ان زيادة قيمة فاقد الضغط عن القيمة الحرجة قد تؤدي إلى توقف البئر الذاتي أو انتقال الطبقة إلى نظام الغاز المنحل.

يتم عدم السماح لانخفاض الضغط دون القيم الحرجة بطريقتين:

١- تخفيض سرعة استثمار السائل من الطبقة مما يؤدي إلى انخفاض سرعة تناقص الضغط ولكن ستزداد فترة استثمار المكمن.

٢- وضع خطة للمحافظة على الضغط الطبقي.

من هاتين الطريقتين يتبين انه من الافضل تطبيق طريقة المحافظة على الضغط الطبقي عند مستوى القيمة الحرجة لفاقد الضغط، عندئذ فالمنحني AB الموضح بالشكل (٦-٢) سيمثل انخفاض الضغط عند النظام المرن والمنحني BD سيمثل فاقد الضغط المستقر لدى استثمار الطبقة مع المحافظة على الضغط الطبقي والا لكان منحني منحني تناقص الضغط سيتخذ الشكل المبين بالمنحني BC فيما اذا لم تستخدم طريقة المحافظة على الضغط الطبقي.

باستخدام طريقة المحافظة على الضغط الطبقي فان الجزء المخطط ABC من الشكل (٦-٢) يعوض من انخفاض الضغط، حيث ان رسم المنحني النظري لتغير الضغط يسمح بتقييم التأثير الأولي الضروري لعملية الحقن (النقطة B) والزيادة الضرورية للضغط باستخدام الحقن لفترات زمنية مختلفة (الاحداثيات بين المستقيم BD والمنحني BC).

لرسم المنحني الموضح بالشكل (٦-٢) من الضروري حساب تغير الضغط مع الزمن في أي نقطة من الطبقة.

٦-٢- تعيين تغير (توزع) الضغط عند النظام المرن

عند إنتاجيه ثابتة للبئر ولدى تدفق سائل متجانس في طبقة متجانسة غير محدودة فان

المعادلة التي تعين تغيير تغير الضغط في نقطة M تبعد عن البئر مسافة r هي:

$$\Delta P(r,t) = P_i - P(r,t) = \frac{Q\mu}{4\pi kh}\int_{S=\frac{\emptyset\mu c r^2}{4kt}}^{\infty}\frac{e^{-S}}{s}ds = \frac{Q\mu}{4\pi kh}E_i\left(-\frac{r^2}{4א}\right) \qquad (6-1)$$

حيث ان:

$$s = \frac{r}{4אt}$$

ΔP(r,t) – هو تغير الضغط في الطبقة المرنة في النقطة M التي تبعد عن البئر بمسافة r عند الزمن t بعد اضطراب البئر.

Q – إنتاجية البئر في الشروط القياسية.

א – عامل انتشار الضغط ويساوي: $א = \frac{K}{\mu.\beta^*}$

$$\beta^* = m.\beta_l + \beta_\pi$$

$\beta_l, \beta_\pi, \beta^*$ = عامل الانضغاط الكلي وعامل انضغاط الصخر وعامل انضغاط السائل على الترتيب.

E_i – تابع تكاملي وتستخرج قيمته من جداول خاصة انظر الشكل رقم (٦- ٣) وعند قيم غير كبيرة للمؤشر S ($S \le 0.03$) فان قيمة هذا التابع يمكن تعيينها بالعلاقة التالية:

$$-E_i\left(-\frac{r^2}{4\,א\,t}\right) \approx \ln\frac{4\,א\,t}{r^2} - 0.677 = \ln\frac{2.25\,א\,t}{r^2} \qquad (6-2)$$

ومنه نجد :

$$\Delta P(r,t) = P_i - P(r,t) = \frac{Q\mu}{4\pi KH}\ln\frac{2.25\,א\,t}{r^2} \qquad (6-3)$$

وفي الشروط الطبقية نكتب:

$$\Delta P(r,t) = P_i - P(r,t) = \frac{Q\mu\,B_o}{4\pi KH}\ln\frac{2.25\,א\,t}{r^2} \qquad (6-4)$$

حيث ان :

B_o– عامل حجم النفط.

μ – لزوجة السائل.

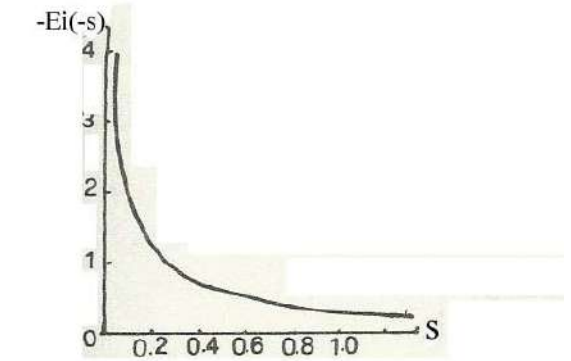
h – سماكة الطبقة.

t – الزمن المستغرق منذ بداية الاستثمار.

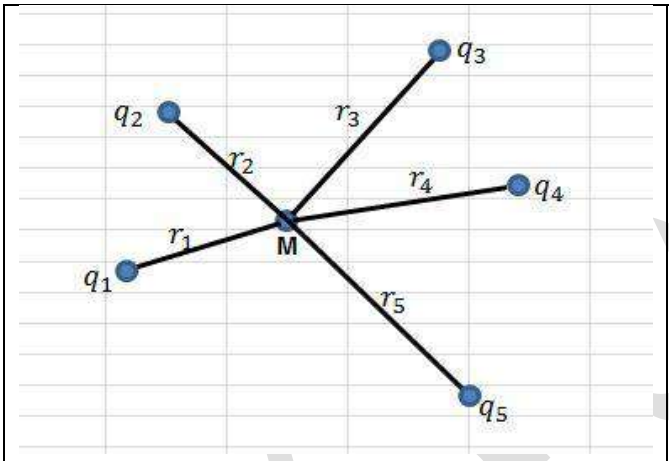
للطبقات ذات الابعاد المحدودة عند نظام دفع الماء المرن للمرحلة الأولى للنظام المرن (حيث لم يصل التحريض إلى حدود الطبقة بد) فان توزع الضغط من جديد سيحقق المعادلة (٦−١) تحقيقا تاما، حيث ان مدة (زمن) هذه المرحلة للطبقات المحدودة (عند R_K في المكمن الدائري و L_K في المكمن المستطيلي) تعين بالعلاقات التالية:

للمكمن الدائري: $$t_{kp} = \frac{R_K^2}{4\,א}$$

للمكمن المستطيلي: $$t_{nol} = \frac{L_K^2}{6\,א}$$



الشكل (٦−٣) التابع التكاملي بالعلاقة مع المؤشر S



الشكل (٦−٤) تعيين تغير الضغط في الطبقة عند النظام المرن في مجموعة من الابار

ان تغير الضغط في نقطة ما من الطبقة ولتكن M عند الزمن t الذي يحدث نتيجة لعمل مجموعة من الآبار انظر الشكل (٦− ٤) والتي ادخلت بالإنتاج بإنتاجيات ثابتة $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ بعد فترات زمنية مختلفة $(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$حيث تبتعد عن النقطة M بالمسافات $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5)$ **يعين اعتمادا على المعادلة** (٦−١) بالمعادلة التالية:

$$\Delta P_M(t) = -\frac{\mu}{4\pi kh}\left[q_1 E_i\left(-\frac{r_1^2}{4א(t-t_2)}\right) + q_2 E_i\left(-\frac{r_2^2}{4א(t-t_2)}\right) + q_3 E_i\left(-\frac{r_3^2}{4א(t-t_3)}\right) + q_4 E_i\left(-\frac{r_4^2}{4א(t-t_4)}\right) + q_5 E_i\left(-\frac{r_5^2}{4א(t-t_5)}\right)\right] \qquad (6-5)$$

حيث ان:

ΔP_M – فاقد الضغط في النقطة M عند الزمن(t)

إذا كانت النقطة M تمثل بئر عامل بإنتاجية (q_M) فانه في المعادلة (5−6) يجب اضافة عنصر اخر هو (ΔP_W) يمثل تغير الضغط الذي يسببه عمل البئر نفسه وستأخذ المعادلة لذا البئر الشكل التالي:

$$\Delta P_W = -\frac{\mu}{4\pi kh}\, q_M\; E_i\left(-\frac{r_w^2}{4\aleph(t-t_M)}\right) \qquad (6-6)$$

r_w – نصف قطر البئر.

لتعيين تأثير الإنتاجية مع الزمن يمكن تعميم المعادلة (٦−١) بالشكل التالي:

$$P_W(t) = -\frac{\mu}{4\pi kh}\sum_{i-1}^{n}\Delta Q_i\;.\;E_i\left(-\frac{r_w^2}{4\aleph(t-t_1)}\right) \qquad (6-7)$$

حيث ان :

$\Delta Q_i = Q_{i+1} - Q_{i-1}$ – قفزة الإنتاجية من درجة إلى أخرى.

t_1 – زمن تغير الإنتاجية (عند الانتقال من الدرجة السابقة إلى التالية)

$i = 1,2,3,\dots\dots,n$ – عدد درجات الإنتاجية عند اللحظة (t).

وبنفس الطريقة الحسابية لتغير الضغط على جدران البئر الموضحة بالمعادلة (٦−٧) فانه من الممكن استخدامها للمكمن حيث يتم استبدال نصف قطر البئر بنصف قطر المكمن (R_{yw})

$$R_{yw} = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \qquad (6-8)$$

في مثل هذه الحالة في المعادلة (٦−٧) نستبدل (r_w) بـ (R_{yw}).

الفصل السابع

استثمار المكامن النفطية عند نظام الغاز المنحل والنظام المختلط

٧-١ نظام الغاز المنحل

يظهر نظام الغاز المنحل في المكامن النفطية لدى توفر الشروط التالية:

١- عدم وجود محافظة على الضغط الطبقي.

٢- عدم وجود دفع مائي .

٣- عدم وجود قبعة غازية .

٤- الضغط الطبقي اقل من ضغط الإشباع.

في هذا النظام ينفصل الغاز عن النفط على شكل فقاعات منفصلة تتوزع بشكل متساو على مساحة الوسط المسامي المشبع بالنفط وهذه الفقاعات تزيح النفط من الطبقة إلى البئر عند تمددها. لنرى قوانين تغير الضغط الطبقي الوسطي في المكمن في ظروف هذا النظام.

لنأخذ الظروف التالية:

$P_K = P_S$ – الضغط الطبقي الوسطي البدائي يساوي ضغط الإشباع.

V_f – حجم النفط في الشروط الطبقية الذي يشكل الاحتياطي الجيولوجي من النفط.

V_g, V_{gsc} – حجم الغاز المنفصل بالشروط القياسية والطبقية على التوالي.

P_{mix}, P_{PV} – الحجم العام والحجم الجاري لمسامات الطبقة على التوالي.

V_{BC} – حجم المزيج الخارج من الحجم العام لمسامات الطبقة.

V_{OP} – حجم النفط المنتج.

T,P – الضغط الجاري ودرجة الحرارة الطبقية على التوالي.

T_{sc}, P_{sc} – الضغط ودرجة الحرارة القياسيين على التوالي.

Z – التعديل على عامل انضغاطية الغاز في الشروط الطبقية.

α – عامل انحلالية الغاز بالشروط القياسية.

إذا افترضنا انه يمكن تطبيق قانون هنري الخطي لانحلالية الغاز عند تغير الضغط من P_K إلى P عندها نستطيع تحديد حجم الغاز المنفصل بالشروط القياسية (V_{gsc}) من حجم النفط (V_f) أثناء انخفاض الضغط كما يلي:

$$V_{gsc} = \alpha(P_K - P).V_f \qquad (7-1)$$

وعند الانتقال بهذا الحجم إلى الضغط الطبقي الجاري P ودرجة الحرارة T سيكون لدينا:

$$V_g = \frac{V_{gsc}.P_{sc}.T.Z}{P.T_{sc}} = \frac{\alpha(P_K - P)V_f.P_{sc}.T.Z}{P.T_{sc}} \qquad (7-2)$$

الحجم العام الجاري للمزيج المتكون سيكون مساويا:

$$V_{mix} = V_f + V_g = V_f\left[1 + \frac{\alpha(P_K - P)P_{sc}.T.Z}{P.T_{sc}}\right] \qquad (7-3)$$

لنفترض انه في اللحظة الأولى تكون المسامات مملوءة بالنفط فقط أي $(V_{PV} = V_f)$ وبالتالي أثناء انخفاض الضغط فانه يجب ان يخرج من الحجم العام لمسامات الطبقة مزيج حجمه (V_{BC}) مساويا للفرق:

$$V_{BC} = V_{mix} - V_{PV} = V_f\left[1 + \frac{\alpha(P_K - P)P_{sc}.T.Z}{P.T_{sc}}\right] - V_f \qquad (7-4)$$

وبإصلاح المعادلة نجد ان حجم المزيج الذي يخرج إلى البئر يساوي حجم الغاز المنفصل. لنحدد **جزء النفط في المزيج (a)** بانه النسبة بين حجم النفط كله في الطبقة إلى حجم كل المزيج هذا يعني:

$$a = \frac{V_f}{V_{mix}} = \frac{V_f}{V_f\left[1 + \frac{\alpha(P_K - P)P_{sc}.T.Z}{P.T_{sc}}\right]} = \frac{P.T_{SC}}{P.T_{SC} + \alpha(P_K - P)P_{SC}.T.Z} \qquad (7-5)$$

ان المعادلة (5-7) تعبر عن متوسط المحتوى من النفط في المزيج.

كمية النفط المنتج يمكن تحديده كما يلي:

$$V_{DH} = \frac{\alpha(P_K - P)P_{SC}.T.Z.V_f}{[P.T_{SC} + \alpha(P_K - P)P_{SC}.T.Z].K} \qquad (7-6)$$

حيث ان: ($k = \frac{a}{a_1}$) و (a_1) هي كمية النفط في المزيج الخارج من المسامات.

كمية النفط المنتج (V_{DH}) يمكن التعبير من خلال الاحتياطي الجيولوجي (V_f) و عامل المردود (η) والوتيرة السنوية للانتاج (δ) وزمن الاستثمار بالأعوام (t) كما يلي:

$$V_{DH} = V_f.\delta.t.\eta \qquad (7-7)$$

ومعادلة حساب الضغط الجاري هي:

$$P = \frac{\alpha P_{SC}P_K.T.Z(1 - K.\eta.\delta.t)}{T_{SC}.K.\eta.\delta.t + \alpha P_{SC}.T.Z(1 - K.\eta.\delta.t)} \qquad (7-8)$$

اما انخفاض الضغط الوسطي فيحسب بالعلاقة التالية:

$$\bar{P} = \frac{P}{P_K} = \frac{\alpha P_{SC}.T.Z(1 - K.\eta.\delta.t)}{T_{SC}.K.\eta.\delta.t + \alpha P_{SC}.T.Z(1 - K.\eta.\delta.t)} \qquad (7-9)$$

تزداد وتيرة انخفاض الضغط في هذا النظام بازدياد قيمة () أي كلما قلت نسبة النفط في المزيج النفطي الغازي. من المعادلة (7-9) نجد انه عند قيم كبيرة لزمن الاستثمار (t) فان قيمة ما داخل الاقواس يمكن ان تصبح سالبة وذلك عندما ($\bar{P}$)، هذا يعني ان ($K.\eta.\delta.t > 1$) يصبح سالبا وهذا غير ممكن فيزيائيا ولهذا فان النضوب الكامل لطاقة المكامن يحصل عند ($K.\eta.\delta.t = 1$).

مواصفات نظام الغاز المنحل:

١- سرعة انخفاض الضغط بزيادة العامل الغازي.

٢- مردود منخفض جدا للطبقة.

٣- غير فعال بدون استخدام طرق الازاحة المختلفة على المكمن.

٤- تزداد النفوذية النسبية للغاز وتقل للنفط لزيادة درجة تشبع الوسط المسامي بالغاز.

٥- لزوجة الغاز اقل بكثير من لزوجة النفط ولهذا فان حركيته اعلى وبالتالي سيصل الغاز بشكل اسرع من النفط إلى البئر.

٦- تزداد لزوجة النفط بسبب انفصال الغاز عنه وبالتالي تقل لزوجته وتقل حركيته.

٧-٢- النظام المختلط

نتيجة الأبحاث والدراسات المخبرية تم التوصل إلى ان إزاحة النفط الملوث جزئيا بالغاز من الطبقة بواسطة الماء بالمقارنة مع إزاحة طور واحد (النفط) لها الميزات التالية:

١- يزداد عامل المردود النفطي تقريبا بقدر درجة تشبع الفراغات المسامية بالغاز الحر، عندما يكون الغاز بحالة ساكنة.

٢- تزداد الإنتاجية من النفط نتيجة لزيادة فاقد الضغط بين الضغط الطبقي وضغط القاع (لدى انخفاض صغير لمعامل الانتاجي).

إذا ابتدأت عمليات استثمار المكمن النفطي منذ اللحظة التي يكون فيها ($P_K=P_S$)، فانه في المرحلة التالية بعد انخفاض الضغط سيبدأ ظهور نظام الغاز المنحل، حيث وفيما بعد ستتثمر الآبار عند النظام الدفعي بالماء للنفط الملوث بالغاز (النظام المختلط).

ان وجه الاختلاف بين نظام دفع الماء والنظام المختلط (عندما يتواجد نظامين، نظام دفع الماء ونظام الغاز المنحل) هو ان توزع الضغط في المكمن لايمكن ان يستعيد نفس، كما هو الحال عند نظام دفع الماء القاسي وذلك نتيجة لمرونة الغاز فان الضغط لن ينخفض مباشرة.

تجرى الحسابات الهيدروديناميكية لإزاحة النفط الملوث بالغاز من الطبقة بواسطة الماء، وذلك بنفس طريقة الحساب عند نظام دفع الماء لطور واحد مع تبديل لزوجة النفط (μ_O) باللزوجة الوهمية (μ_F) والتي تحسب كما يلي:

$$F = \frac{\mu_O}{A} \qquad (7-10)$$

حيث ان:

$$A = 0.944 - 21.43\ \alpha \quad ,\alpha = \frac{\mu_g}{\mu_O} S_O\ ,\ \ S_O = \frac{S(P_S)}{P_S} \qquad (7-11)$$

كذلك يمكن تعيين الثابت (A) اعتمادا على نتائج بحث الآبار عند النظام المستقر وذلك بمقارنة معامل الإنتاجية المعين لنفس البئر قبل انخفاض ضغط قاع البئر عن ضغط الإشباع وبعد انخفاضه($P_W<P_S$). في مثل هذه الحالة فان الثابت (A) سيمثل عدد المرات التي يقل فيها معامل إنتاجية الآبار بعد انفصال الغاز عن النفط عند المنطقة القاعية.

كذلك يمكن للزوجة الوهمية من نتائج بحث الآبار عند النظام المستقر عندما يكون($P_K<P_S$) و($P_W<P_S$)، حيث واعتمادا على نظرية ارتشاح السائل عند نظام الغاز المنحل فانه يمكن تعيين اللزوجة الوهمية بالشكل التالي:

$$\mu_F = \frac{\Delta P}{\Delta H} \cdot \frac{1}{\mu_O(P_S)} \qquad (7-12)$$

حيث ان:

ΔP ، ΔH فاقد الضغط عند النظام المستقر لعمل الآبار من خلال الضغط المقاس ومن حساب تابع خريستيانوفيتش.

يتم حساب مؤشرات عمل صفوف الآبار عند هذا النظام بالمعادلات التي تعتمد على الرسم التخطيطي لمقاومات الارتشاح المكافئة.

الفصل الثامن

استثمار مكامن النفط الثقيل

لدى ارتشاح نفط عادي من خلال الفراغات المسامية يفترض انه سيحقق قانون الاحتكاك الخطي لنيوتن:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dn} \qquad (8-1)$$

حيث ان:

τ – اجهاد القص (التوتر الديناميكي للقص).

μ – لزوجة السائل.

u – سرعة حركة احدى طبقات السائل بالنسبة إلى طبقة أخرى.

n – البعد بين الطبقتين (الناظم).

ان النفط المذكور اعلاه يسمى بالسائل النيوتوني.

لدى استثمار الحقول النفطية يلاحظ في بعض الحالات ان هناك اخلال بقانون الاحتكاك الخطي لنيوتن وبالتالي فان العلاقة بين (τ) وتدرج السرعة يمكن ان تكتب بالشكل التالي:

$$\tau = -\mu' \frac{du}{dn} + \tau_o \qquad (8-2)$$

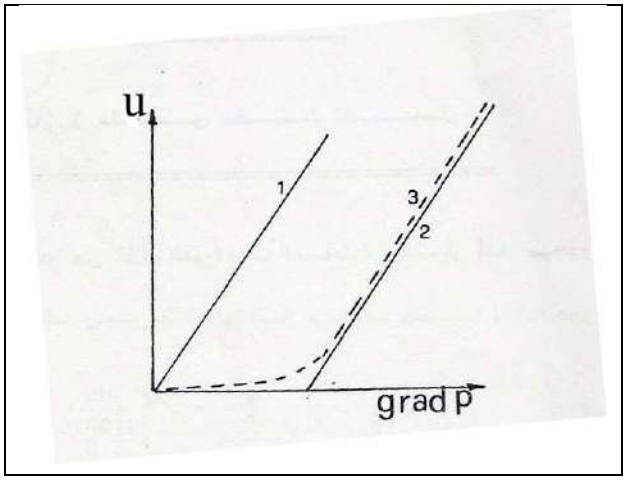
حيث ان:

μ' – اللزوجة اللدنة.

τ_o - التوتر السكوني للقص.

تحقق العلاقة (8–2) السوائل اللانيوتونية (كالنفط الثقيل مثلا).

عند الحساب بهذه العلاقة وبوجود سرعات غير كبيرة للارتشاح، فان العلاقة بين سرعة الارتشاح وتدرج الضغط سيكون لها شكل المنحني الذي يبدا من مبدا الاحداثيات وينحني باتجاه محور السرعة ، انظر الشكل رقم (1−8) المنحني رقم (3).



الشكل رقم (1−8) بين قوانين ارتشاح السائل العادي والثقيل

١− قانون الارتشاح الخطي للسائل العادي

٢− قانون ارتشاح السائل الثقيل

٣− قانون الارتشاح الوسطي

يعتبر تدرج الضغط البدائي (G) المؤشر الرئيسي لظهور مثل هذه الصفات اللدنة لدى ارتشاح النفط الثقيل في الفراغات المسامية، حيث يتمكن السائل من الحركة بعد التغلب عليه.

لارتشاح النفط الثقيل في الوسط المسامي فان القانون الخطي سيكون له الشكل التالي:

$$u = -\frac{k}{\mu'}\left(\frac{dP}{dr} + G\right) \qquad (8-3)$$

$\frac{dP}{dr}$ = تدرج الضغط.

من المعادلة (3−8) يتبين ان (u=o) عندما يكون ($\left|\frac{dP}{dr}\right| \leq G$) و (u>0) عندما يكون ($\left|\frac{dP}{dr}\right| > G$). يتعلق تدرج الضغط البدائي للسائل الكثيف بالتوتر السكوني للقص وبنفوذية الوسط المسامي بالعلاقة التالية:

$$G = \alpha_1 \frac{\tau_O}{\sqrt{K}} \qquad (8-4)$$

حيث ان:

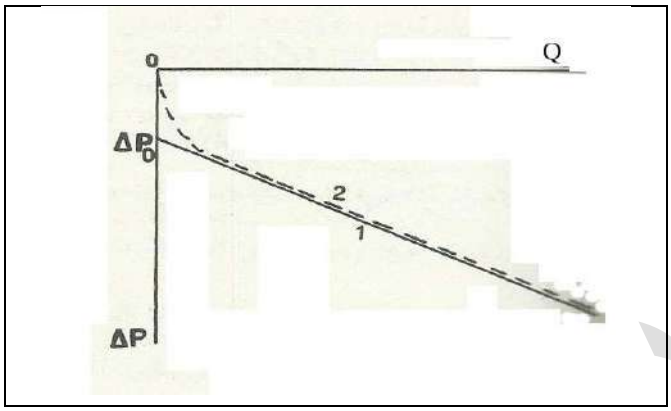
α_1 − عامل لابعدي يتعلق بتركيب المسامات (للصخور الرملية $\alpha_1 = 0.017$)

تظهر صفات النفط الثقل في الحالات التالية:

١- إذا احتوى النفط على كمية كبيرة من المواد الراتنجية.

٢- عند بدء تبلور البارافين في النفط (عندما تكون درجة حرارة الطبقة قريبة من درجة تبلور البارافين).

٣- عند التأثير الفيزيائي الكيميائي المتبادل بين السائل المرتشح والوسط المسامي (مثلا لدى اماهة الغضار).



الشكل (2-8) الدليل البياني للآبار التي تنتج نفطا ثقيلا

١- علاقة النفط الثقيل

٢- العلاقة الوسطية بين النفط الثقيل والعادي

ان حركة النفط في الطبقة حسب القانون (3-8) توضح لنا ان استثمار مثل هذه المكامن يجب ان يكون لها خاصية مختلفة عن استثمار المكامن الطبيعية.

ان قيمة $(G.r_w)$ هي صغير جدا بالمقارنة مع $(G.R_K)$ لذلك تهمل.

$$Q = \frac{2\pi kh(P_K - P_w) - G.R_K}{\mu' \ln \frac{R_K}{r_w}} \qquad (8-5)$$

انطلاقا من هذه المعادلة فان الدليل البياني سيتخذ الشكل رقم (3-8). ان وجه الاختلاف بين هذا الدليل البياني والدليل البياني للآبار التي تنتج نفطا عاديا هو ان الاول يبدا من (ΔP_O).

ان قيمة $((\Delta P_O = G.R_K)$ تساوي تدرج الضغط في الطبقة اللازم لازالة تدرج الضغط البدائي بين قاع الآبار وكونتور التغذية الدائري.

حل المسائل:

حل مسائل الفصل الاول

مسالة (1):

اخذت عينات اسطوانية من مكمن نفطي وتم إجراء القياسات المخبرية لها لتحديد المسامية والنفوذية المطلقة باستخدام الغاز والسائل والنتائج موضحة في الجدول التالي والمطلوب:

١- احسب المسامية الوسطية والمسامية الوسطية المثقلة بالنسبة للسماكة.

٢- احسب النفوذية المطلقة الوسطية باستخدام الغاز والنفوذية الوسطية المثقلة بالنسبة للسماكة.

٣- احسب النفوذية المطلقة الوسطية باستخدام السائل والنفوذية الوسطية المثقلة بالنسبة للسماكة.

رقم العينة	مجال اخذ العينة m	السماكة h , m	المسامية %	النفوذية الطلقة باستخدام الغاز	النفوذية الطلقة باستخدام السائل
1	1409-1409.8	0.8	22.84	15.97	8.95
2	1420-1421	1	13.09	11.46	7.99
3	1474-1474.6	0.6	22.41	15.67	8.54
4	1490-1493	3	19.02	12.8	11.01
5	1553-1554	1	21.21	14.83	10.12
6	1557-1558	1	22.46	13.22	9.91
7	1559-1560	1	20.05	13.84	7.51
8	1562-1563	1	21.39	15.3	9.88
9	1513-1517	4	22.41	15.5	7.12
10	1555-1557	2	18.72	11.88	9.46

١- تحسب المسامية الوسطية كما يلي:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n} = \frac{203.6}{10} = 20.36\ \%$$

اما المسامية الوسطية المثقلة بالنسبة للسماكة فتحسب من العلاقة:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i h_i}{\sum h_i} = \frac{314.058}{10} = 31.14$$

والنتائج موضحة في الجدول التالي.

٢- تحسب النفوذية المطلقة باستخدام الغاز الوسطية كما يلي:

$$\overline{k_g} = \frac{\sum k_{gi}}{n} = \frac{140.47}{10} = 14.05$$

اما النفوذية المطلقة باستخدام الغاز المثقلة بالنسبة للسماكة فتحسب من العلاقة:

$$\overline{k_g} = \frac{\sum k_{gi} h_i}{\sum h_i} = \frac{214.99}{10} = 21.5$$

والنتائج موضحة في الجدول التالي.

٣- تحسب النفوذية المطلقة باستخدام السائل الوسطية كما يلي:

$$\overline{k_l} = \frac{\sum k_{li}}{n} = \frac{90.49}{10} = 9.05$$

اما النفوذية المطلقة باستخدام السائل المثقلة بالنسبة للسماكة فتحسب من العلاقة:

$$\overline{k_l} = \frac{\sum k_{li} h_i}{\sum h_i} = \frac{138.12}{10} = 13.8$$

والنتائج موضحة في الجدول التالي.

رقم العينة	السماكة h,m	$h_i \times m_i$	$h_i \times k_{li}$	$h_i \times k_{gi}$
1	**0.8**	**18.272**	**7.16**	**12.78**
2	**1**	**13.09**	**7.99**	**11.46**
3	**0.6**	**13.446**	**5.12**	**9.40**
4	**3**	**57.06**	**33.03**	**38.40**
5	**1**	**21.21**	**10.12**	**14.83**
6	**1**	**22.46**	**9.91**	**13.22**
7	**1**	**20.05**	**7.51**	**13.84**
8	**1**	**21.39**	**9.88**	**15.30**
9	**4**	**89.64**	**28.48**	**62.00**
10	**2**	**37.44**	**18.92**	**23.76**
Σ	**15.4**	**314.058**	**138.12**	**214.99**

حل مسائل الفصل الثانـي

مسالة (٢): نموذج بوت

فيما يلي بيانات المكمن، اذا علمت ان زاوية الاجتياح المائي ١٢٠ درجة. احسب الحجم الاولي للمياه في الطبقة المائية الجوفية و كمية المياه التراكمية التي دخلت الى الطبقة النفطية عند الضغط ٣٧٥٠ رطل \ بوصة مربعة

Aquifer permeability, K_w	280 mD
Initial reservoir pressure, P_i	*4000 psi*
Current reservoir pressure, P	*3750 psi*
Reservoir thickness, h	*31 ft*
Aquifer radius, r_a	*12,000 ft*
Reservoir radius, r_e	*2800 ft*
Reservoir compressibility, C_f	*$3.4 * 10^{-6}\ psi^{-1}$*
Aquifer compressibility, C_w	*$4.8 * 10^{-6}\ psi^{-1}$*
Porosity, ∅	*16%*

الحل:

$$f = \frac{\theta}{360} = \frac{120}{360} = 0.3333$$

$$w_i = \frac{\pi(r_a^2 - r_e^2)h \times \emptyset}{5.615} = \frac{3.1416(12000^2 - 2800^2) \times 31 \times 0.16}{5.615}$$

$$= 377861241.3\ bbl$$

$$w_e = (c_w + c_f)f \times w_i(p_i - p) = (4.8 \times 10^{-6} + 3.4 \times 10^{-6}) \times 0.3333 \times 377861241.3(4000 - 3750) = 258179{:}36\ bbl$$

مسالة (٣) : نموذج سيلزيوس

مكمن نفطي ذو دفع مائي، ثابت تدفق المياه يقدر بـ (١٤٨) برميل / سنة / رطل لكل بوصة مربعة

يوضح الجدول التالي بيانات الضغط، احسب التدفق التراكمي للمياه بالحالة المستقرة في كل خطوة زمنية.

Time (years)	Pressure (psi)
0	5200
0.5	5120
1	5040
1.5	5005
2	4950
2.5	4910

الحل:

الخطوة الاولى: حساب انخفاض الضغط عند كل زمن:

$$\Delta P1 = 5200 - 5120 = 80 \text{ psi}$$

$$\Delta P2 = 5200 - 5040 = 160 \text{ psi}$$

$$\Delta P3 = 5200 - 5005 = 195 \text{ psi}$$

$$\Delta P4 = 5200 - 4950 = 250 \text{ psi}$$

$$\Delta P5 = 5200 - 4910 = 290 \text{ psi}$$

الخطوة الثانية: حساب تدفق المياه والتدفق التراكمي بالعلاقة مع الزمن:

في نهاية النصف عام (ستة اشهر)، كمية المياه التراكمية هي:

$$w_{e1} = c_s\left\{\frac{(\Delta p_1 + 0)}{2}(t_1 - 0)\right\} = 148 \times \left[\frac{80 + 0}{2}(0.5 - 0)\right] = 2960\ bbl$$

في نهاية العام الاول ، كمية المياه التراكمية هي:

$$w_e = w_{e1} + w_{e2} = c_s\left\{\frac{(\Delta p_1 + 0)}{2}(t_1 - 0) + \frac{(\Delta p_2 + \Delta p_1)}{2}(t_2 - t_1)\right\}$$

$$w_e = 2960 + 148 \times \left[\frac{(80 + 160)}{2}(1 - 0.5)\right] = 2960 + 8880 = 11840\ bbl$$

وبنفس الطريقة يتم حساب كمية المياه التراكمية عند نهاية العام ونصف والعامين والعامين ونصف وطريقة الحساب والنتائج مبينة في الجدول التالي:

Time (days)	Pressure (psi)	Pressure Drop (psi)	Water Influx (bbl)	Cumulative Water Influx (bbl)
0	5200	0	0	0
0.5	5120	80	2960	2960
1	5040	160	8880	11,840
1.5	5005	195	13,135	24,975
2	4950	250	16,465	41,440
2.5	4910	290	19,980	61,420

مسالة (٤): فان افريدينجن وهورست

منظومة مكمن – طبقة مائية جوفية زاويتها ١٤٠ درجة عند المركز ونصف قطرها يقدر بـ ١١٢٠٠٠ قدم، باستخدام ضغط المكمن وقيم مؤشرات الطبقة المائية المبينة في الجدول التالي. اوجد تدفق المياه عند كل مرحلة زمنية باستخدام نموذج فان افريدينجن وهورست وقارن النتائج مع نموذج فيتكوفيتش.

Aquifer permeability, K_w	*200 mD*
Water viscosity, μ_w	*0.55 cp*
Reservoir thickness, h	*100 ft*
Drainage radius, r_e	*14,000 ft*
Total compressibility, C_t	*$2.50 * 10^{-6}\ psi^{-1}$*
Dimensionless radius, r_{eD}	*8*
Porosity, ∅	*19%*

Time (yrs)	0	1	2	3	4	5
Pressure (psia)	4014	3941	3870	3800	3732	3664
$W_{D(tD)}$	0	6.8712	11.2763	14.8854	17.8373	20.2521

الحل:

$$f = \frac{\theta}{360} = \frac{140}{360} = 0.3889$$

$$c = 1.119.f\ .\emptyset\ .h\ .c_{tw}.r_e^2 = 1.119 \times 0.3889 \times 0.19 \times$$

$$\times 100 \times 2.5 \times 10^6 \times (14000)^2 = 4051.52\ bbl/psia$$

$$\Delta p_o = p_i - p_{av1} = p_i - \frac{(p_i + p_1)}{2} = \frac{p_i - p_1}{2} = \frac{4014 - 3941}{2} = 36.5$$

$$\Delta p_1 = p_{av1} - p_{av2} = \frac{(p_i + p_1)}{2} - \frac{(p_1 + p_2)}{2} = \frac{p_i - p_2}{2} = \frac{4014 - 3870}{2} = 72$$

$$\Delta p_2 = p_{av2} - p_{av3} = \frac{p_1 + p_2}{2} - \frac{p_2 + p_3}{2} = \frac{p_1 - p_3}{2} = \frac{3941 - 3800}{2} = 70.5$$

$$\Delta p_3 = p_{av3} - p_{av4} = \frac{p_2 + p_3}{2} - \frac{p_3 + p_4}{2} = \frac{p_2 - p_4}{2} = \frac{3870 - 3732}{2} = 69$$

$$\Delta p_4 = p_{av4} - p_{av5} = \frac{p_3 + p_4}{2} - \frac{p_4 + p_5}{2} = \frac{p_3 - p_5}{2} = \frac{3800 - 3664}{2} = 68$$

ليست هناك حاجة لحساب الزمن اللابعدي وتدفق المياه اللابعدي لأنها معطاة بالجدول اعلاه

يتم حساب تدفق المياه في كل عام على النحو التالي:

عند نهاية العام الاول (t=1)

$$w_e(t_1) = c.\Delta p_o we_D(t_D) = 4051.52 \times 36.5 \times 6.8712 = 1016116{:}35\ bbl$$

عند نهاية العام الثاني (t=2)

$$w_e(t_2) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1)$$

$$w_e(\Delta p_o) = c\ .\Delta p_o w_{e_D}@t_2 = 4051.52 \times 36.5 \times 11.2763 = 1667544.66\ bbl$$

$$w_e(\Delta p_1) = c\ .\Delta p_1@t_1 = 4051.52 \times 72 \times 6.8712 = 2004393.90\ bbl$$

$$w_e(t_2) = 1667544.66 + 2004393.90 = 3671938.56\ bbl$$

عند نهاية العام الثالث (t=3)

$$w_e(t_3) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2)$$

$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o + w_{eD}\ @t_3 = 4051.52 \times 36.5 \times 14.8854 = \ 2201260.097\ bbl$
$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_2 = 4051.52 \times 72 \times 11.2763 = \ 3289403.158\ bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2 w_{eD}.@t_1 \ = 4051.52 \times 70.5 \times 6.8712 = \ 1962635.698\ bbl$
$w_e(t_3) = 2201260.097 \ + \ 3289403.158 + \ 1962635.698 = \ 7453298.95\ bbl$

عند نهاية العام الرابع (t=4)

$$w_e(t_4) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2) + w_e(\Delta p_3)$$

$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o.w_{eD}@t_4 = 4051.52 \times 36.51 \times 17.8373 = \ 2638511.168\ bbl$
$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_3 \ = 4051.52 \times 72 \times 14.8854 = \ 4342211.698\ bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2.w_{eD}@t_2 = 4051.52 \times 70.5 \times 11.2763 = \ 3220873.926\ bbl$

$w_e(\Delta p_3) = c.\Delta p_3.w_{eD}@t_1 = 4051.52 \times 69 \times 6.8712 = \ 1920877.491\ bbl$

$w_e(t_4) = 2638511.168 + 4342211.698 + 3220873.926 + 1920877.491$

$w_e(t_4) = 12122474.28$ bbl

عند نهاية العام الخامس (t=5)

$$w_e(t_4) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2) + w_e(\Delta p_3) + w_e(\Delta p_4)$$

$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o.w_{eD}@t_5 = 4051.52 \times 36{:}5 \times 20.2521 = \ 2994890.269\ bbl$
$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_4 \ = 4051.52 \times 72 \times 17.8373 \ = \ 5203308.794\ bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2.w_{eD}@t_3 = 4051.52 \times 70{:}5 \times 14.8854 \ = \ 4251748.954\ bbl$

$w_e(\Delta p_3) = c.\Delta p_3.w_{eD}@t_2 = 4051.52 \times 69 \times 11.2763 \ = \ 3152344.693\ bbl$

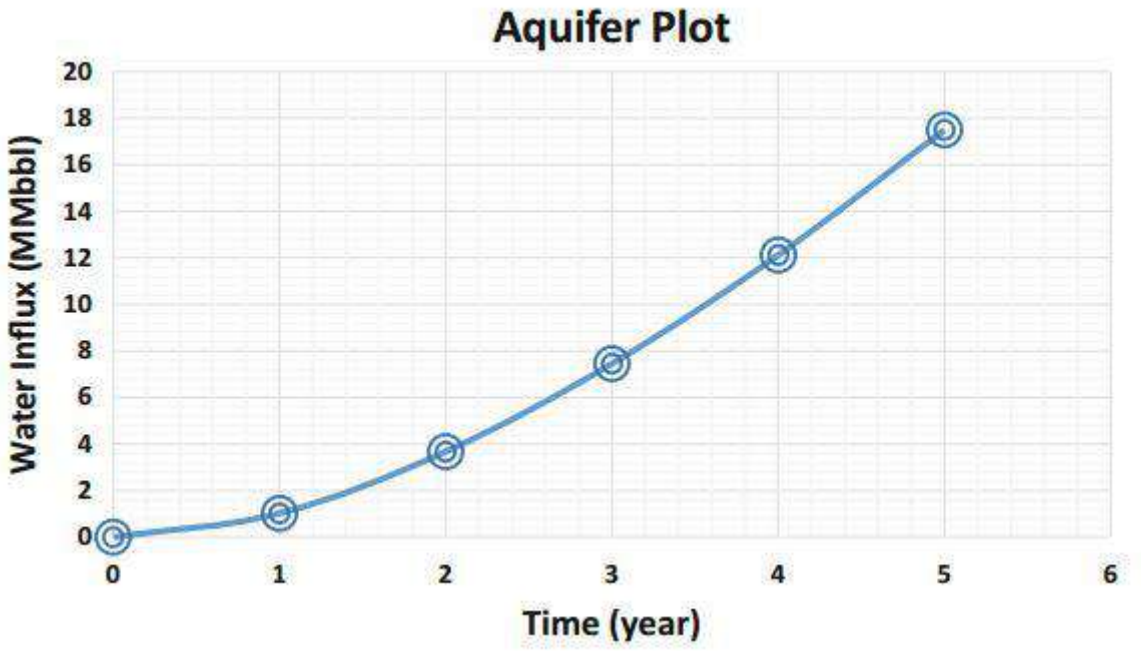
$w_e(\Delta p_4) = c.\Delta p_4.w_{eD}@t_1 = 4051.52 \times 68 \times 6.8712 \ = \ 1893038.687\ bbl$

$w_e(t_5) = 2994890.269 + 5203308.794 + 4251748.954 + 3152344.693$
$+ 1893038.687 = 17495331.4$ bbl

تم ترتيب النتائج في الجدول التالي:

Time (yrs)	Pressure (psia)	ΔP (psia)	W_{eD}	W_e (bbl)
0	4014		0	
1	3941	36.5	6.8712	1016116.35
2	3870	72	11.2763	3671938.56
3	3800	70.5	14.8854	7453298.95
4	3732	69	17.8373	12122474.28
5	3664	68	20.2521	17495331.4

التدفق التراكمي للمياه بالعلاقة مع الزمن مبينة في المنحني التالي:



مسالة (٥) :

مكمن ذو دفع مائي نشط يبلغ إنتاج المياه التراكمي المقدر بعد السنة الأولى من الانتاج (28640 bbl) ، بيانات الضغط وخصائص المكمن والطبقة المائية مبينة في الجدول التالي:

١- احسب سمك الطبقة المائية.

٢- احسب التدفق التراكمي للمياه للأربع سنوات القادمة.

Time (yrs)	0	1	2	3	4	5
Pressure (psia)	5027	5016	5414	4966	4818	4775
Aquifer permeability, K_w					*160 mD*	
Water viscosity, μ_w					*0.78 cp*	
Drainage radius, r_e					*9500 ft*	
Aquifer radius, r_a					*47,500 ft*	
Total compressibility, C_t					*$3.80 * 10^{-6}\ psi^{-1}$*	
Porosity, ∅					*22%*	
Aquifer angle					*120°*	

الحل:

$$f = \frac{\theta}{360} = \frac{120}{360} = 0.3333$$

$$c = 1.119.f\ .\emptyset\ .h\ .c_{tw}.r_e^2 = 1.119 \times 0.3333 \times 0.22 \times$$

$$\times h \times 3.8 \times 10^6 \times (9500)^2 = 28.1397 \times h\ \ bbl/psia$$

حساب انخفاض الضغط:

$$\Delta p_o = p_i - p_{av1} = p_i - \frac{(p_i + p_1)}{2} = \frac{p_i - p_1}{2} = \frac{5027 - 5016}{2} = 5.5$$

$$\Delta p_1 = p_{av1} - p_{av2} = \frac{(p_i + p_1)}{2} - \frac{(p_1 + p_2)}{2} = \frac{p_i - p_2}{2} = \frac{5027 - 5001}{2} = 13$$

$$\Delta p_2 = p_{av2} - p_{av3} = \frac{p_1 + p_2}{2} - \frac{p_2 + p_3}{2} = \frac{p_1 - p_3}{2} = \frac{5016 - 4966}{2} = 25$$

$$\Delta p_3 = p_{av3} - p_{av4} = \frac{p_2 + p_3}{2} - \frac{p_3 + p_4}{2} = \frac{p_2 - p_4}{2} = \frac{5001 - 4818}{2} = 91.5$$

$$\Delta p_4 = p_{av4} - p_{av5} = \frac{p_3 + p_4}{2} - \frac{p_4 + p_5}{2} = \frac{p_3 - p_5}{2} = \frac{4966 - 4775}{2} = 95.5$$

حساب الزمن اللابعدي:

$$t_D = \frac{2.309\ k\ .t}{\mu_w\ .\emptyset_w\ .c_{tw}\ .r_e^2}\ \ (t\ \ in\ year)$$

$$t_D = \frac{2.309 \times 160 \times t}{0.78 \times 0.22 \times 3.8 \times 10^{-6} \times 9500^2} = 6.2776 \times t$$

يتم حساب الازمنة اللابعدية كما يلي:

$$at(t = 1) \rightarrow t_D = 6.2776 \times 1 = 6.2776$$

$at(t=2) \rightarrow t_D = 6.2776 \times 2 = 12.5552$
$at(t=3) \rightarrow t_D = 6.2776 \times 3 = 18.8328$
$at(t=4) \rightarrow t_D = 6.2776 \times 4 = 251104$
$at(t=5) \rightarrow t_D = 6.2776 \times 5 = 31.388$

من الجدول (٢-٣) و(٢-٤) و(٢-٥) ، واعتمادا على قيم الازمنة اللابعدية يتم حساب القيم اللابعدية للطبقة المائية كما يلي:

tD	WeD
6	5.153
6.2776	**5.3168**
7	5.743

tD	WeD
12	8.457
12.5553	**8.7385**
13	8.964

tD	WeD
18	11.386
18.8329	**11.7766**
19	11.855

tD	WeD
25	14.573
25.1105	**14.6216**
26	15.013

tD	WeD
31	17.167
31.3882	**17.3312**
32	17.59

تدفق المياه عند كل زمن تحسب كما يلي:

عند نهاية العام الاول (t=1)

$w_e(t_1) = c.\Delta p_o we_D(t_D) = 28640\ bbl$

$28640 = 28.1397 \times h \times 5.5 \times 5.3168 \rightarrow h = \dfrac{28640}{28.1397 \times 5.5 \times 5.3168} =$

$h = 34.8049\ ft$

ومنها نحسب ثابت تدفق المياه:

$C = 28.1397 \times h\ = 28.1397 \times 34.8049 = 979.3994(\ bbl = psia)$

عند نهاية العام الثاني (t=2)

$$w_e(t_2) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1)$$

$w_e(\Delta p_o) = c\ .\Delta p_o w_{e_D}@t_2 = 979.3981 \times 5.5 \times 8.7385 =\ 47071.65\ bbl$

$w_e(\Delta p_1) = c\ .\Delta p_1@t_1 = 979.3981 \times 13 \times 5.3168 =\ 67694.52\ bbl$

$w_e(t_2) = 47071.65 +\ 67694.52 =\ 114766.17\ bbl$

عند نهاية العام الثالث (t=3)

$$w_e(t_3) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2)$$

$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o + w_{eD}\ @t_3 = 979.3981 \times 5.5 \times 11.7766 =\ 63436.8815\ bbl$
$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_2 = 979.3981 \times 13 \times 8.7385 =\ 111260.1139\ bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2 w_{eD}.@t_1 = 979.3981 \times 25 \times 5.3168 =\ 130181.5955\ bbl$
$w_e(t_3) = 63436.8815 +\ 111260.1139 +\ 130181.5955 =\ 304878.59\ bbl$

عند نهاية العام الرابع (t=4)

$$w_e(t_4) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2) + w_e(\Delta p_3)$$

$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o.w_{eD}@t_4 = 9793981 \times 5{:}5 \times 14.6216 =\ 78762.02\ bbl$
$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_3\ = 979.3981 \times 13 \times 11.7766\ =\ 149941.74\ bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2.w_{eD}@t_2 = 979.3981 \times 25 \times 8.7385 =\ 213961.76\ bbl$

$w_e(\Delta p_3) = c.\Delta p_3.w_{eD}@t_1 = 979.3981 \times 91.5 \times 5.3168 =\ 476464.64\ bbl$

$w_e(t_4) = 78762.02 + 149941.74 + 213961.76 + 476464.64$

$w_e(t_4) = 919130.152$ bbl

عند نهاية العام الخامس (t=5)

$w_e(t_4) = w_e(\Delta p_o) + w_e(\Delta p_1) + w_e(\Delta p_2) + w_e(\Delta p_3) + w_e(\Delta p_4)$
$w_e(\Delta p_o) = c.\Delta p_o.w_{eD}@t_5 = 979.3981 \times 5.5 \times 17.3312\ =\ 93357.794\ bbl$

$w_e(\Delta p_1) = c.\Delta p_1.w_{eD}@t_4 = 979.3981 \times 13 \times 14.6216 = 186164.77 bbl$
$w_e(\Delta p_2) = c.\Delta p_2.w_{eD}@t_3 = 979.3981 \times 25 \times 11.7766 = 288349.49\ bbll$

$w_e(\Delta p_3) = c.\Delta p_3.w_{eD}@t_2 = 979.3981 \times 91.5 \times 8.7385 = 783100.03\ bbll$

$w_e(\Delta p_4) = c.\Delta p_4.w_{eD}@t_1 = 979.3981 \times 95.5 \times 5.3168 = 497293.69\ bbl$

$w_e(t_5) = 93357.794 + 186164.77 + 288349.49 + 783100.03 + 497293.69$
$= 1848265{:}787$ bbl

نتائج الحساب موضحة بالجدول التالي:

Time (yrs)	Pressure (psia)	ΔP (psia)	t_D	W_{eD}	W_e (bbl)
0	5027				0
1	5016	5.5	6.2776	5.3168	28,640
2	5001	13	12.5553	8.7385	114766.016
3	4966	25	18.8329	11.7766	304878.575
4	4818	91.5	25.1105	14.6216	919130.152
5	4775	95.5	31.3882	17.3312	1848265.787

مسالة (٦) : نموذج كارتر وتريسي

باستخدام المعطيات في المسالة رقم (٤) وباستخدام نموذج الطبقة المائية الجوفية لكارتر و تريسي احسب التدفق التراكمي للمياه في كل خطوة زمنية.

الحل:

الخطوة الاولى : احسب إجمالي انخفاض الضغط في كل خطوة زمنية باستخدام العلاقة:

$$\Delta P(t_{Di+1}) = P_i - P_{i+1}$$

والنتائج مبينة بالجدول التالي:

Time (t_i) (yrs)	P_i (psia)	ΔP(t_i) (psia)
0	4014	0
1	3941	73
2	3870	144
3	3800	214
4	3732	282
5	3664	350

الخطوة الثانية : حساب الزمن اللابعدي عند كل خطوة زمنية من العلاقة التالية:

$$t_{Dj} = \frac{2.309\ k\ t(t\ in\ year)}{\mu_w.\emptyset_w.c_{tw}.r_e^2} = \frac{2.309 \times 200 \times t}{0.55 \times 0.19 \times 2.5 \times 10^{-6} \times 14000^2} = 9.0187 \times t_i$$

نتائج الحساب مبينة في الجدول التالي:

Time (t_i) (yrs)	P_i (psia)	$\Delta P(t_i)$ (psia)	t_D
0	4014	0	0
1	3941	73	9.0187
2	3870	144	18.0374
3	3800	214	27.0561
4	3732	282	36.0748
5	3664	350	45.0935

الخطوة الثالثة : حساب الضغط اللابعدي ومشتق الضغط في عند كل خطوة زمنية نظرا لان الزمن اللابعدي في الجدول اعلاه اكبر من(0.01) واصغر من (٥٠٠) لهذا تطبق المعادلات التالية لحساب الضغط اللابعدي ومشتق الضغط:

$$P_d(t_D) = \frac{370.529\sqrt{t_D} + 137.582t_D + 5.69549t_D^{1.5}}{328.834 + 265.488\sqrt{t_D} + 45.2157t_D + t_D^{1.5}}$$

$$P'_D(t_D) = \frac{716.441 + 46.7984\sqrt{t_D} + 270.038t_D + 71.0098t_D^{15}}{1269.86\sqrt{t_D} + 1204.73t_D + 618.618t_D^{1.5} + 538.072t_D^2 + 142.41t_D^{2.5}}$$

ونتائج الحساب مبينة في الجدول التالي:

Time (t_i) (yrs)	P_i (psia)	$\Delta P(t_i)$ (psia)	t_D	$P_D(t_D)$	$P_D'(t_D)$
0	4014	0	0	0	0
1	3941	73	9.0187	1.60654	0.04742
2	3870	144	18.0374	1.91249	0.02515
3	3800	214	27.0561	2.09875	0.01719
4	3732	282	36.0748	2.23343	0.01307
5	3664	350	45.0935	2.33910	0.01055

حساب تدفق المياه عند كل مرحلة زمنية باستخدام العلاقة التالية:

$$w_e(t_{Dj}) = w_e(t_{Dj-1}) + \left[\frac{c.\Delta p(t_{Dj}) - w_e(t_{Dj-1})p'_D(t_{Dj})}{p_D(t_{Dj}) - (t_{Dj-1})p'_D(t_{Dj})}\right](t_{D1} - t_{Dj-1})$$

بعد عام:

$$w_e(t_{D1}) = w_e(t_{D0}) + \left[\frac{c.\Delta p(t_{D1}) - w_e(t_{D0})p'_D(t_{D1})}{p_D(t_{D1}) - (t_{D0})p'_D(t_{D1})}\right](t_{D1} - t_{D0})$$

$$w_e(t_{D0}) = 0$$

$C = 1.119\times0.3889\times0.19\times100\times2.50\times10^{-6}\times 14000^{\,2} = 4051.52$ bbl/psia

$$w_e(t_{D1}) = 0 + \left[\frac{(4051.52 \times 73) - (0 \times 0.04742)}{1.60654 - (0 \times 0.4742)}\right] = 1660325.526\ bbl$$

بعد عامين:

$$w_e(t_{D2}) = w_e(t_{D1}) + \left[\frac{c.\Delta p(t_{D2}) - w_e(t_{D1})p'_D(t_{D2})}{p_D(t_{D2}) - (t_{D1})p'_D(t_{D2})}\right](t_{D2} - t_{D1})$$

$$w_e(t_{D1}) = 1660325.526\ bbl$$

$$W_e(t_{D2}) = 1660325.526 + \left[\frac{(4051.52*144) - (1660325.526*0.02515)}{1.91249 - (9.0187*0.02515)}\right](18.0374 - 9.0187)$$

$$= 4558333.626\ bbl$$

بعد ثلاثة اعوام:

$$W_e(t_{D3}) = W_e(t_{D2}) + \left[\frac{C\Delta P(t_{D3}) - W_e(t_{D2})P_D{}'(t_{D3})}{P_D(t_{D3}) - (t_{D2})P_D{}'(t_{D3})}\right](t_{D3} - t_{D2})$$

$$W_e(t_{D2}) = 4558333.626\ bbl$$

$$W_e(t_{D3}) = 4558333.626 + \left[\frac{(4051.52*214) - (4558333.626*0.01719)}{2.09875 - (18.0374*0.01719)}\right](27.0561 - 18.0374)$$

$$= 8534856.871\ bbl$$

بعد اربعة اعوام:

$$W_e(t_{D4}) = W_e(t_{D3}) + \left[\frac{C\Delta P(t_{D4}) - W_e(t_{D3})P_D'(t_{D4})}{P_D(t_{D4}) - (t_{D3})P_D'(t_{D4})}\right](t_{D4} - t_{D3})$$

$$W_e(t_{D3}) = 8534856.871\ bbl$$

$$W_e(t_{D4}) = 8534856.871 + \left[\frac{(4051.52*282) - (8534856.871*0.01307)}{2.23343 - (27.0561*0.01307)}\right](36.0748 - 27.0561)$$

$$= 13481153.46\ bbl$$

بعد خمسة اعوام:

$$W_e(t_{D5}) = W_e(t_{D4}) + \left[\frac{C\Delta P(t_{D5}) - W_e(t_{D4})P_D'(t_{D5})}{P_D(t_{D5}) - (t_{D4})P_D'(t_{D5})}\right](t_{D5} - t_{D4})$$

$$W_e(t_{D4}) = 13481153.46\ bbl$$

$$W_e(t_{D5}) = 13481153.46 + \left[\frac{(4051.52*350) - (13481153.46*0.01055)}{2.33910 - (36.0748*0.01055)}\right](45.0935 - 36.0748)$$

$$= 19356081.34\ bbl$$

نتائج الحسابات مبينة في الجدول التالي:

Time (t_i) (yrs)	P_i (psia)	$\Delta P(t_i)$ (psia)	t_D	$P_D(t_D)$	$P_D'(t_D)$	W_e
0	4014	0	0	0	0	0
1	3941	73	9.0187	1.60654	0.04742	1660325.526
2	3870	144	18.0374	1.91249	0.02515	4558333.626
3	3800	214	27.0561	2.09875	0.01719	8534856.871
4	3732	282	36.0748	2.23343	0.01307	13481153.46
5	3664	350	45.0935	2.33910	0.01055	19356081.34

مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من طريقة كارترو تريسي مع فان إيفردينجن مبينة في الجدول التالي:

Time (year)	Van Everdingen & Hurst Model (bbl)	Carter-Tracy's Model (bbl)
0	0	0
1	1016116.35	1660325.526
2	3671938.56	4558333.626
3	7453298.95	8534856.871
4	12122474.3	13481153.46
5	17495331.4	19356081.34

مسالة (٧): نموذج فيتكوفيتش

باستخدام المعطيات في المسالة رقم (٤) وباستخدام نموذج الطبقة المائية الجوفية لفيتكوفيتش احسب التدفق التراكمي للمياه في كل خطوة زمنية.

الحل:

$$f = \frac{\theta}{360} = \frac{140}{360} = 0.3889 \ ,$$

$$w_{ei} = c_t . w_i . p_i = c_t \times p_i \frac{\pi(r_a^2 - r_e^2)h.\emptyset}{5.615} =$$

$$= \frac{2.5 \times 10^{-6} \times 0.3889 \times 3.142(112000^2 - 14000^2)}{5.615} = 512344362.5 \ bbl$$

$$= 512.3444 \ MMbbl$$

$$j = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times f \times k \times h}{\mu_w \left[\ln\left(\frac{r_a}{r_e} - 0.75\right)\right]} = \frac{7.08 \times 10^{-3} \times 0.3889 \times 200 \times 100}{0.55 \left[\ln\left(\frac{112000}{14000}\right) - 0.75\right]}$$

$$= 75.3129 \frac{bbl}{d.psia}$$

حساب: $e^{\frac{-jp_i t}{w_{ei}}}$

نظرا لان الفترات الزمنية موحدة لهذا نكتب:

$$\Delta t_n = t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = 1 \ year = 365 \ days$$

$$1 - e^{-\frac{j.p_i.\Delta t_n}{w_{ei}}} = 1 - e^{\frac{75.3129 \times 4014 \times 365}{512344362.5}} = 0.1938$$

$$\Delta w_{e_n^k} = \frac{w_{ei}}{p_i}(\bar{p}_{n-1} - \bar{p}_n)\left(1 - e^{-\frac{j.p_i.\Delta t_n}{w_{ei}}}\right)$$

$$\Delta w_{en} = \frac{512344362.5}{4014}(\bar{p}_{n-1} - \bar{p}_n) \times 0.1938 = 24736.5066(\bar{p}_{n-1} - \bar{p}_n)$$

عند العام الاول يحسب تدفق المياه كما يلي:

$$W_{e0} = 0$$

$$\bar{P}_{a_{n-1}} = P_i\left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} W_{e_j}}{W_{ei}}\right)$$

$$\bar{P}_{a_1} = P_i\left(1 - \frac{W_{e0}}{W_{ei}}\right) = 4014 * \left(1 - \frac{0}{512344362.5}\right) = 4014\ psia$$

$$\bar{P}_{n1} = \frac{p_i + p_1}{2} = \frac{4014 + 3941}{2} = 3977.5\ psia$$

$$\bar{P}_{a_1} - \bar{P}_{n1} = 4014 - 3977.5 = 36.5\ psia$$

$$\therefore W_{e_1} = \Delta W_{e_1} = 24736.5066\left[\bar{P}_{a_1} - \bar{P}_{n1}\right] = 24736.5066 * 36.5 = 902882.49\ bbl$$

عند العام الثاني يحسب تدفق المياه كما يلي:

$$W_{e1} = 902882.49$$

$$\bar{P}_{a_2} = P_i\left(1 - \frac{W_{e1}}{W_{ei}}\right) = 4014 * \left(1 - \frac{902882.49}{512344362.5}\right) = 4006.926\ psia$$

$$\bar{P}_{n2} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{3941 + 3870}{2} = 3905.5\ psia$$

$$\bar{P}_{a_2} - \bar{P}_{n2} = 4006.926 - 3905.5 = 101.426\ psia$$

$$\Delta W_{e_2} = 24736.5066\left[\bar{P}_{a_2} - \bar{P}_{n3}\right] = 24736.5066 * 101.426 = 2508924.918\ bbl$$

$$\therefore W_{e2} = \Delta W_{e1} + \Delta W_{e2} = 2508924.918 + 902882.49 = 3411807.408\ bbl$$

عند العام الثالث يحسب تدفق المياه كما يلي:

$$W_{e2} = 3411807.408\ bbl$$

$$\bar{P}_{a_3} = P_i\left(1 - \frac{W_{e2}}{W_{ei}}\right) = 4014 * \left(1 - \frac{3411807.408}{512344362.5}\right) = 3987.2699\ psia$$

$$\bar{P}_{n3} = \frac{p_2 + p_3}{2} = \frac{3870 + 3800}{2} = 3835\ psia$$

$$\bar{P}_{a_3} - \bar{P}_{n3} = 3987.2699 - 3835 = 152.2699\ psia$$

$$\therefore \Delta W_{e_3} = 24736.5066\left[\bar{P}_{a_3} - \bar{P}_{n3}\right] = 24736.5066 * 152.2699 = 3766625.386\ bbl$$

$$\therefore W_{e3} = \Delta W_{e1} + \Delta W_{e2} + \Delta W_{e3} = 2508924.918 + 902882.49 + 3766625.386 = 7178432.794\ bbl$$

نتائج الحساب للأعوام الخمسة مبينة في الجدول التالي:

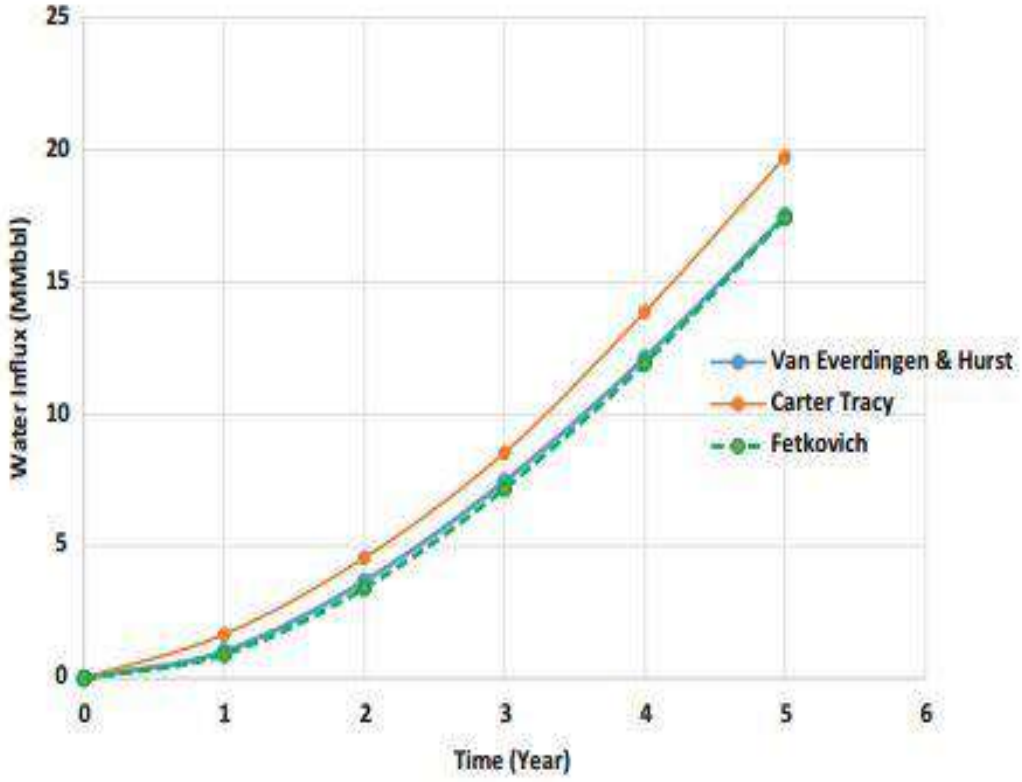
Time (yr)	P (psi)	$\bar{P}_n$ (psi)	$\bar{P}_{a_{n-1}}$ (psi)	$\bar{P}_{a_{n-1}} - \bar{P}_n$ (psi)	ΔW_e (bbl)	W_e (bbl)
0	4014	4014	4014	0	0	0
1	3941	3977.5	4014	36.5	902882.49	902882.4909
2	3870	3905.5	4006.93	101.4263	2508924.92	3411807.408
3	3800	3835	3987.27	152.2699	3766625.39	7178432.794
4	3732	3766	3957.76	191.76	4743472.00	11921904.79
5	3664	3698	3920.59	222.5969	5506269.58	17428174.37

مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من طريقة كارترو تريسي مع فان إيفردينجن وفيتكوفيتش مبينة في الجدول التالي:

Time (year)	Van Everdingen & Hurst Model (bbl)	Carter-Tracy's Model (bbl)	Fetkovich Model (bbl)
0	0	0	0
1	1016116.35	1660325.526	902882.4909
2	3671938.56	4558333.626	3411807.408
3	7453298.95	8534856.871	7178432.794
4	12122474.3	13481153.46	11921904.79
5	17495331.4	19356081.34	17428174.37

تم تمثيل النتائج على شكل منحنيات بيانية معروضة في الشكل أدناه. هذا يدل على أن هناك تقارب في القيمة بين نموذج فان افريدينجن وفيتكوفيتش مع القليل من الانحراف لنموذج كارتر

وتريسي ولكن هذا لا يعني أن نموذج كارتر و تريسي لا يقدير تدفق المياه بشكل جيد. في بعض المكامن يكون نموذج كارتر–تريسي هو الانسب لحسابات طبقة المياه الجوفية وبالتالي يتم تجريب النماذج على الطبقة المائية الجوفية لمعرفة أيهما يطابق الأداء الفعلي للطبقة المائية مع التسامح بالحد الأدنى من الخطأ.



مسائل الفصل الرابع

مسالة (٨): طريقة تشيرسي وكويسي

بئر عمودي محفور في مكمن نفطي يحوي قبعة غازية في الاعلى وطبقة مائية في الاسفل ، سماكة المكمن (٢٠٠ قدم) وخصائص الصخر والمائع هي كما يلي:

$D_t = 50\ ft$	$\rho_o = 46.24\ lb/ft^3$	$B_o = 1.25\ bbl/STB$	$k_v = 90\ md$
	$\rho_w = 68.14\ lb/ft^3$	$\mu_O = 1.11\ CP$	$k_h = 300\ md$
$r_e = 745\ ft$	$\rho_g = 6.12\ lb/ft^3$		$k_{ro} = 1$

المطلوب : حدد طول وموقع المجال المثقب.

الحل:

الخطوة الاولى: حساب نصف القطر اللابعدي وتحديد قيمة $\left[\Delta\rho_{og}/\Delta\rho_{wo}\right]$

$$r_{D_e} = \frac{r_e}{h}\sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \frac{745}{200}\sqrt{\frac{300}{90}} = 6.8$$

$$\Delta\rho_{og}/\Delta\rho_{wo} = \frac{\rho_O - \rho_G}{\rho_W - \rho_O} = \frac{46.24 - 6.12}{68.14 - 46.24} = 1.83$$

الخطوة ٢ : لنفترض ان طول المجال المثقب هو (٤٠ قدم) فيكون:

$$h_p = 40\ ft \Rightarrow\ \varepsilon = \frac{h_p}{h} = \frac{40}{200} = 0.2$$

الخطوة ٣ : يتم الحصول على قيم $(\delta_{g_{OPT}}, \psi_{OPT})$عند قيمة نصف القطر اللابعدي المحسوب بالخطوة الاولى والمساوي (٦.٨) من المنحنيات البيانية الاشكال (٤-٧) و(٤-٨) كما يلي: نضع قيمة($\delta = 0.2$)المحسوبة على محور السينات ثم نذهب عموديا الى المنحني الذي يمثل $\left(\frac{\Delta\rho_{og}}{\Delta\rho_{wo}} = 1.83\right)$ بعدها نذهب افقيا فنحصل على $(\psi = 0.043)$.

ونحصل على قيمة $\delta_{g_{OPT}} = 0.317$

الخطوة ٤ : احسب المسافة بين خط التقاء الغاز مع النفط وقمة المجال المثقب:

$$D_t = h\,.\,\delta_{g_{OPT}} = 200 \times 0.317 = 6.3\ ft$$

الخطوة ٥ : احسب المسافة بين خط التقاء الماء مع النفط واسفل المجال المثقب:

$$D_b = h - D_t - h_p = 200 - 63 - 40 = 97\ ft$$

الخطوة ٦ : احسب معدل التدفق المثالي للنفط من المعادلة (٤-١٠) كما يلي:

$$Q_{o_{OPT}} = 0.492 \times 10^{-4} \frac{200^2(40.12)}{1.25 \times 1.11}(1 \times 300)0.043 = 734\ STB/day$$

الخطوة ٧ : اعادة الخطوات من ٢ الى ٦ والنتائج موضحة بالجدول التالي:

h_p	20	40	60	80	100
ε	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
ψ_{OPT}	0.0455	0.043	0.0388	0.0366	0.030
$\delta_{g_{OPT}}$	0. 385	0. 317	0. 271	0. 23	0. 19
D_t	72	63	54	46	38
D_b	108	97	86	74	62
$Q_{o_{OPT}}$	786	734	699	600	516
Q_o المتوقعة	525	890	1320	1540	1850

الانتاج الاعظمي الذي يمكن الحصول عليه من هذا البئر الحاوي على مخاريط مختلطة هو (734 STB/day) هذا يشير الى ان المسافة المثالية من خط التقاء الغاز مع النفط الى قمة المجال المثقب هي (٦٣ قدم) والمسافة المثالية من خط التقاء الماء مع النفط الى اسفل المجال المثقب هي (٩٧ قدم) والطول المثالي للمجال المثقب هو:

h_p=200−63−97=40 ft

مسالة (٩) : طريقةهويلاند و بباتزاكوس و جافيلاند:

مثال: حساب معدل التدفق الحرج عند توفر المعطيات التالية:

$\rho_w - \rho_o = 17.4\ lb/ft^2$	$k_h = 1000\ md$	$h_p = 50\ ft$
$B_o = 1.376\ RB/STB$	$k_v = 640\ md$	$r_e = 500\ ft$
$\mu_o = 0.8257\ cb$	h=200 ft	

الحل:

خطوة ١- حساب نصف القطر اللابعدي :

$$r_D = \frac{r_e}{h}\left(\frac{k_v}{k_h}\right)^{0.5} = \frac{500}{200}\left(\frac{640}{1000}\right)^{0.5} = 2$$

خطوة ٢- تحديد معدل التدفق الحرج اللابعدي من الشكل (٤-١٧) عند قيمة $(r_D = 2)$

خطوة ٣ – رسم منحني يمثل معدل التدفق الحرج اللابعدي مقابل (كتابع) لإكمال البئر والمخطط مبين في المقطع (A) من الشكل(٤-١٧).

خطوة ٤- حساب طول المجال المثقب اللابعدي:

$$\varepsilon = \frac{h_p}{h} = \frac{50}{200} = 0.25$$

خطوة ٥- نقوم بإدخال القيم في المخطط (A) المبين في الشكل (٤-١٧) فنحصل على معدل التدفق الحرج اللابعدي وكان$(q_{Dc} = 0.375)$.

خطوة ٦- باستخدام المعادلة (٤-١١) نجد:

$$Q_{oc=}0.246 \times 10^{-4}\left[\frac{200^2 \times 17.4}{1.376 \times 0.8257}\right] \times (0.375) = 5.65\ STB/day$$

مسالة (١٠): طريقة بورنازيل و جينسون:

لدينا مكمن يحوي طبقة مائية (ذو دفع مائي) وخصائص المكمن والمائع الذي يحتويه هي كما يلي:

h= 80 ft	$\rho_o = 47\ lb/ft^3$	$B_o = 1.2\ bbl/STB$	$k_v = 6\ md$
$h_p = 20\ ft$	$\rho_w = 63\ lb/ft^3$	$\mu_O = 1.6\ CP$	$k_h = 60\ md$
$r_e = 1053\ ft$	$s_{wc} = 0.25$	A=80 acres	Φ=0.14
$r_w = 0.25\ ft$	$s_{or} = 0.35$	$\mu_w = 0.82\ CP$	M=3.1

ا حسب تدفق طور الماء في بئر عمودي يقع في هذا المكمن عندما تكون انتاجيته الكلية

$$Q_o = 500\,,1000\,,1500\ \text{STB/day}$$

الحل: خطوة (١) حساب ارتفاع المخروط اللابعدي باستخدام المعادلة (٤-٢١) :

$$z = 0.0492 \times 10^{-4}\,\frac{(63-47)60 \times 80(80-20)}{1.6\ \times 1.2 \times Q_o}$$

$Q_{o=}$	500	1000	1500
$Z =$	0.2362	0.1181	0.0787

خطوة (٢) حساب زمن الاختراق اللابعدي باستعمال المعادلة (٤-٢٦) :

$$t_{D_{BT}} = \frac{Z}{3 - 0.7\,Z}$$

$Q_{o=}$	500	1000	1500
$t_{D_{BT}} =$	0.8333	0.04048	0.02672

خطوة (٣) حساب زمن الاختراق من المعادلة (٤-٢٣):

$$t_{BT} = \left[\frac{20.325\mu_o.h.\emptyset}{(\rho_w - \rho_o)k_v(1+M^{\alpha})}\right] t_{D_{BT}} = 1276.76(\,t_{D_{BT}})$$

$Q_{o=}$	500	1000	1500
$t_{D_{BT}} =$	0.8333	0.04048	0.02672
$t_{BT} =$	106.40	51.58	34.41

خطوة(٤) حساب الاحتياطي الجيولوجي:

$$N = \frac{7758\,A\emptyset h(1-s_{wi})}{B_0} = \frac{7758 \times 80 \times 0.14 \times (1-0.25)}{1.2} = 4344480\ STB$$

خطوة (٥) حساب المؤشر (R) من المعادلة (٤-٣٢):

$$R = \frac{N_P}{N}\left[\frac{1-S_{WC}}{1-S_{or}-S_{wc}}\right] = \frac{N_P}{4344480}\left[\frac{1-0.25}{1-0.35-0.25}\right]\ = 4.315810^{-7}N_P$$

خطوة (٦) حساب تدفق الماء اللابعدي عند ازمنة الاختراق المحسوبة بالخطوة (٣):

Q_o	500	1000	1500
t_{BT}	106.4	51.58	34.11
N_P	53200	51580	51165
R	0.02296	0.022261	0.022082
h	78.16	78.22	78.23
h_W	21.84	21.78	21.77
$(w_c)_{limit}$	0.464	0.463	0.463

خطوة (٧) حساب تدفق الماء بعد انقضاء الزمن المفترض وهو (١٢٠ يوم) بمعدل تدفق كلي ثابت (٥٠٠ برميل /اليوم) كما يلي:

من المعادلة (٤-٢٨) نحسب $t_{D_{BT}}$ كما يلي:

$$t_{D_{BT}} = \frac{120}{106.4} = 1.1278$$

من المعادلة (٤-٣٦) نحسب $(f_w)_D$ كما يلي:

$$(f_w)_D = 0.29 + 0.96\ log(1.1278) = 0.3391$$

من المعادلة (٤-٣٦) نحسب عامل تدفق الماء (f_w) :

$$f_w = 0.3391 \times 0.464 = 0.1573$$

خطوة (٨) حساب معدل تدفق الماء والنفط :

$$Q_w = 0.1573 \times 500 = 78.658\ STB/day$$
$$Q_o = 500 - 78.65 = 421.35\ STB/day$$

خطوة (٩) حساب المعدل التركمي للنفط المنتج من بدء الاختراق وحتى مرور(١٢٠ يوم):

$$\Delta N_P = \left(\frac{500 + 421.35}{2}\right)(120 - 106.4) = 6265.18\ STB$$

خطوة (١٠) حساب كمية النفط التراكمية المنتجة بعد (١٢٠) يوم :

$$N_P = 53200 + 6265.18 = 59465.18\ STB$$

خطوة (١١) حساب عامل المردود كما يلي:

$$R_F = \frac{59465.18}{4344480} = 0.0137$$

خطوة (١٢) بافتراض انه مر زمن (١٣٥ يوم) كرر نفس الحساب السابق عند نفس المعدل الكلي (٥٠٠ برميل باليوم):

$$R = 4.3158 \times 10^{-7} \times 59465.18 = 0.020715$$

$$h_w = 21.66 \,/\, h = 78.34 \,/\, [w_c]_{limit} = 0.4615 /\, (f_w)_D$$

$$= 0.29 + 0.94 \log\left(\frac{135}{106.4}\right) = 0.3872$$

$$f_w = 0.3872 \times 0.4615 = 0.1787$$

$$Q_w = 500 \times 0.1787 = 89.34\, STB/day$$

$$Q_o = 500 - 89.34 = 410.66\, STB/day$$

$$\Delta N_P = \left(\frac{410.66 + 421.34}{2}\right)(135 - 120) = 6240\, STB$$

$$N_P = 59465.18 + 6240 = 65705.22$$

$$R_F = 0.0151$$

الجداول من الرقم (٤-١) وحتى (٤-٣) تبين نتائج الحسابات لعامل الماء (عامل العبور) مقابل الزمن لمعدلات التدفق (٥٠٠-١٠٠٠-١٥٠٠ برميل باليوم) .

مسالة (١١): طريقةهويلاند و بباتزاكوس و جافيلاند

إحسب معدل التدفق الحرج عند توفر المعطيات التالية:

$\rho_w - \rho_o = 17.4\ lb/ft^2$	$k_h = 1000\ md$	$h_p = 50\ ft$
$B_o = 1.376\ RB/STB$	$k_v = 640\ md$	$r_e = 500\ ft$
$\mu_o = 0.8257\ cb$	h=200 ft	

الحل:

خطوة ١- حساب نصف القطر اللابعدي :

$$r_D = \frac{r_e}{h}\left(\frac{k_v}{k_h}\right)^{0.5} = \frac{500}{200}\left(\frac{640}{1000}\right)^{0.5} = 2$$

خطوة ٢- تحديد معدل التدفق الحرج اللابعدي من الشكل (٢-١٧) عند قيمة $(r_D = 2)$

خطوة ٣ – رسم منحني يمثل معدل التدفق الحرج اللابعدي مقابل (كتابع) لإكمال البئر والمخطط مبين في المقطع (A) من الشكل(٢-١٧).

خطوة ٤- حساب طول المجال المثقب اللابعدي:

$$\varepsilon = \frac{h_p}{h} = \frac{50}{200} = 0.25$$

خطوة ٥- نقوم بإدخال القيم في المخطط (A) المبين في الشكل (٢-١٧) فنحصل على معدل التدفق الحرج اللابعدي وكان$(q_{Dc} = 0.375)$.

خطوة ٦- باستخدام المعادلة (٢-١١) نجد:

$$Q_{oc=}0.246 \times 10^{-4}\left[\frac{200^2 \times 17.4}{1.376 \times 0.8257}\right] \times (0.375) = 5.65\ STB/day$$

مسالة (١٢): طريقة سوبوسنسكي و كورنيليوس

احسب اختراق المياه باستخدام طريقة سوبوسنسكي و كورنيليوس لبئر عمودي ينتج (٢٥٠) برميل بالشروط السطحية \ يوم وفيما يلي بيانات المكمن:

Q_o = 250 STB/day , h = 50 ft , h_p = 15 ft , ρ_w= 63.76 lb/ft3

ρ_o = 47.5 lb/ft3 , μ_o = 0.73 cp ,B_o = 1.1 bbl/STB ,k_v = 9 md

k_h = 93 md , ∅ = 13% , M = 3

الحل:

الخطوة الأولى: حساب ارتفاع المخروط اللابعدي من المعادلة :

$$z = 0.0492 \times 10^{-4} \frac{(\rho_w - \rho_o) k_h \times h(h - h_p)}{\mu_o B_o Q_o} \qquad (4-21)$$

$$z = 0.0492 \times 10^{-4} \left[\frac{(63.76 - 47.5) \times 93 \times 50(50 - 15)}{0.73 \times 1.1 \times 250} \right] = 0.6486$$

الخطوة الثانية: حساب زمن الاختراق اللابعدي من المعادلة:

$$t_{D_{BT}} = \frac{4Z + 1.75Z^2 - 0.75Z^3}{7 - 2Z} \qquad (4-22)$$

$$(t_D)_{BT} = \frac{4(0.6486) + 1.75(0.6486^2) - 0.75(0.6486^3)}{7 - 2(0.6486)} = 0.5481$$

الخطوة الثالثة : حساب زمن الاختراق من المعادلة:

$$t_{BT} = \frac{20325 \mu_o . h . \emptyset t_{D_{BT}}}{(\rho_w - \rho_o) k_v (1 + M^{\alpha})} \qquad (4-23)$$

$$\alpha = 0.5 \; FOR \; M = 1; \; \alpha = 0.6 \; FOR \; 1 < M < 10$$

$$t_{BT} = \frac{20.325 \times 0.73 \times 50 \times 0.13 \times 0.5481}{(63.76 - 47.5) \times 9 \times (1 + 3^{0.6})} = 123 \; days$$

الخطوة الرابعة : حساب معدل التدفق الحرج من المعادلة:

$$Q_{oc} = 0.141 \times 10^{-4} \left[\frac{k_h (\rho_w - \rho_o)(h - h_p)}{\mu_o B_o} \right] \qquad (4-25)$$

$$Q_{oc} = 0.141 \times 10^{-4} \left[\frac{93(63.76 - 47.5)(50 - 35)}{0.73 \times 1.1} \right] = 46.3 \; STB/day$$

الفهرس

الفصل الاول **استثمار المكامن النفطية غير المتجانسة والخاضعة لنظام دفع المائي**	1
١-١- اشكال الطبقات غير المتجانسة وطرق دراستها	1
٢-١- عدم تجانس الطبقات حسب النفوذية	5
الفصل الثاني **اجتياح الماء للمجال النفطي وحسابات تدفق الماء من المنطقة المائية الى المجال النفطي**	13
٢-١- دفع المياه الجوفية (التعدي المائي)	13
٢-٢- انظمة تدفق الموائع	15
٢-٢-١- تدفق (جريان) الموائع بالحالة المستقرة	15
٢-٢-٢- تدفق الحالة غير المستقرة (المكمن غير محدود) والمائع غير قابل للانضغاط	16
٢-٢-٣- معادلة التدفق بالحالة المستقرة عند ادخال تأثير الظاهرة السطحية	17
٢-٢-٤- معادلة التدفق الشعاعي للحالة المستقرة (مكمن غير محدود) للمائع غير القابل للانضغاط مع الاخذ بعين الاعتبار تأثير الظاهرة السطحية	17
٢-٣- نماذج حسابات طبقات (خزانات) المياه الجوفية	17
٢-٣-١- نموذج بوت	18
٢-٣-٢- نموذج سيلزيوس	19
٢-٣-٣- نموذج هورست المعدّل عند نظام التدفق المستقر	20
٢-٣-٤- نموذج فان افريدنجن وهورست	21

٢-٣-٥- نموذج كارتر - تريسي	33
٢-٣-٦- نموذج تدفق المياه لفيتكوفيتش	35
الفصل الثالث **الحساب الهيدروديناميكي للإنتاجية والضغط قبل وبعد عبور الماء عند نظام دفع الماء القاسي للطبقات المتجانسة مع عدم الاخذ بعين الاعتبار اختلاف لزوجة النفط والماء**	39
٣-١- المكمن المستطيلي (نظام السائل وحيد الطور)	39
٣-٢- المكمن الدائري (النظام وحيد الطور)	45
٣-٣- الدفع ثنائي الاتجاه	48
٣-٤- الانتاجية من الماء والنفط وعامل المردود النفطي قبل وبعد عبور الماء الى صفوف الابار مع الاخذ بعين الاعتبار اختلاف لزوجة النفط والماء والازاحة غير مكبسية	52
الفصل الرابع **المخاريط المائية والغازية**	55
٤-١- تشكل المخاريط	55
٤-٢- المخاريط في الابار العمودية	60
٤-٢-١- علاقات المعدل الحرج للآبار العمودية	60
٤-٢-٢- علاقة ماير-كاردر	60
٤-٢-٣- بيرسون (١٩٧٧)	64
٤-٢-٤- علاقة تشيرسي و كويسي (١٩٦٤)	65
٤-٢-٥- طريقةهويلاند و بباتزاكوس و جافيلاند	72
٤-٢-٦- مخططات المعدل الحرج المقدمة من قبل تشاني واخرون(١٩٥٦)	73

٤-٢-٧- طريقة تشابرسون	74
٤-٢-٨- طريقة سكولز(١٩٧٢)	75
٤-٢-٩- طريقة سوبوسنسكي و كورنيليوس	75
٤-٢-١٠- طريقة بورنازيل و جينسون	77
٤-٣- الادائية بعد اختراق المخروط المائي للبئر	77
الفصل الخامس **مفهوم الازاحة**	87
٥- ١- الازاحة اللامتزاجية	87
٥-٢- الازاحة الامتزاجية	88
٥-٢-١- العوامل التي تؤثر على سلوك الازاحة الامتزاجية	88
٥-٢-١-١- نسبة قابلية الحركة	88
٥-٢-١-٢- تشتت المائع	90
٥-٢-١-٣- نظام التدفق	91
٥-٢-١-٤- التصبع اللزج	94
٥-٢-١-٥- كفاءة الإزاحة والكسح	94
٤-٧-٥-١- كفاءة الإزاحة الماكروسكوبية	94
٥-٢-١-٥- كفاءة الإزاحة الميكروسكوبية	96
٥-٣- دور الامتزاجية في مردود النفط	98
الفصل السادس **استثمار المكامن النفطية عند النظام المرن**	101
٦-١- تأثير عامل مرونة الطبقة على الضغط الطبقي	101
٦-٢- تعيين تغير (توزع) الضغط عند النظام المرن	102
الفصل السابع	106

استثمار المكامن النفطية عند نظام الغاز المنحل والنظام المختلط	
٧-١ نظام الغاز المنحل	106
٧-٢- النظام المختلط	109
الفصل الثامن **استثمار مكامن النفط الثقيل**	111
حل المسائل	114
حل مسائل الفصل الاول	111
حل مسائل الفصل الثاني	116
مسائل الفصل الرابع	132

د. ايمن شقوف