الفصل التاسع

تأثير اختلاف الوزن النوعي لسائلين في الطبقة على توزع الضغط وسلوكية الآبار

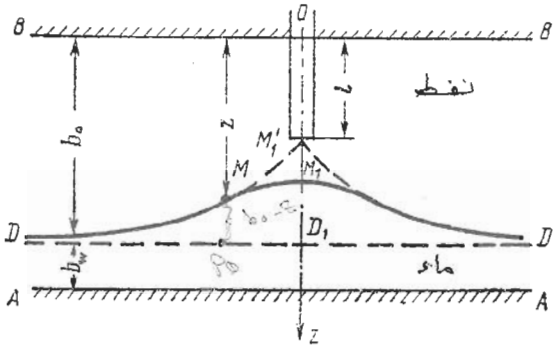
من المعروف أن الطبقة قد تحتوي أكثر من سائل وقد يوجد الغاز أيضاً ، ولهذه السوائل والغازات قدرة مختلفة على الحركة لذلك سيكون هناك توزع معين لهذه السوائل والغازات في الطبقة في كل لحظة . والظاهرة غير المستحبة أثناء عمليات الاستثمار هي إماهة البئر أو خروج الغاز مع النفط ، التي يمكن أن تحدث عند شروط معينة ، وهذه الشروط يجب معرفتها بدقة من أجل الحصول على الاستثمار الأمثل للطبقة .

٩-١- نظرية تشكل المخروط المائي في الطبقة ذات الدفع المائي :

إذا شغل الجزء السفلي من طبقة أفقية أو مائلة قليلاً بالماء ، فإنه سيتشكل مخروط مائي ، لدى استغلال بئر غير تام من ناحية اختراق الطبقة . وعندما تكون سرعة استخراج السائل من البئر كبيرة (إنتاجية كبيرة) ، فإن الماء يمكن أن يصل إلى قاع البئر وبالتالي حدوث إماهة فيه .

إن مشكلة وصول المياه إلى البئر من خلال المجال النفطي تعتبر معقدة ، ولايمكن تحليل هذه الظاهرة بشكل دقيق . لذلك تستخدم طرق تقريبية للحسابات اللازمة لاستثمار هذا البئر دون إماهة . فكيف يعبر عن الشروط الحدية التي يكون عندها هذا المخروط مستقراً وغير متصل مع البئر ؟ .

من أجل الإجابة عن هذا السؤال يجب استخدام الافتراض الذي اقترحه ماسكيت (M . MASKET) ، والذي ينص على أن توزع الكمون فوق المخروط على طول المحور OZ سيكون مشابهاً لسطح التلامس مابين الماء والنفط قبل وضع البئر في الإنتاج DD كما في الشكل (٩-١) .



شكل (٩-١) المقطع العمودي لطبقة نفطية حاوية مياه تماسية

قبل إدخال البئر في الإنتاج وعندما يكون التلامس نفط ـ ماء أفقياً DD ، والضغط في أية نقطة من المجال (M) الحاوي للنفط سيكون مساوياً :

$$P_o = P_D - \gamma_o (b_o - Z) \qquad (٩-١)$$

حيث إن :

P_o ـ الضغط في النقطة M ، γ_o ـ الوزن النوعي للنفط ،

Z ـ ارتفاع النقطة M عن مستوى الغطاء العلوي للطبقة (مستوى المقارنة) ،

P_D ـ الضغط عند المستوى DD (هذا الضغط يبقى ثابتاً على المستوى DM_1D) ،

b_o ـ سماكة الجزء المشبع بالنفط من الطبقة قبل دخول البئر في الإنتاج .

من المعادلتين (٧-٥) ، (٩-١) يمكن حساب قيمة الكمون ϕ_M باستخدام سرعة الارتشاح الحجمية ، في النقطة :

$$\phi_o = \frac{k}{\mu} P_o = \frac{k}{\mu} \left[P_D - \gamma_o (b_o - Z)\right] \qquad (٩-٢)$$

وقيمة الضغط في ذروة المخروط المائي الواقعة على المحور OZ تحدد كما يلي :

$$P = P_D - \gamma_w (b_o - Z) \qquad (٩-٣)$$

حيث إن P ـ الضغط في أية نقطة M الواقعة على ذروة سطح التلامس بين النفط والماء ، γ_w ـ الوزن النوعي للمياه الطبقية .

وبالتالي فإن الكمون في النقطة M الواقعة في ذروة المخروط ستكون مساوية :

$$\phi = \frac{k}{\mu}\left[P_b - \gamma_w (b_o - Z)\right] \qquad (٤-٩)$$

ومن المعادلتين (٩-٢) ، (٩-٤) نحصل على :

$$\phi_o - \phi = \frac{k}{\mu}(\gamma_w - \gamma_o)(b_o - Z) \qquad (٥-٩)$$

حيث إن $\phi_o = const$.

وبإجراء تفاضل لهذه المعادلة يمكن الحصول على :

$$\frac{\partial \phi}{\partial Z} = \frac{k}{\mu}\Delta\gamma \qquad (٦-٩)$$

حيث إن $\Delta\gamma = \gamma_w - \gamma_o$.

إن الطرف الأيسر من المعادلة (٩-٦) يمثل سرعة الارتشاح على طول المحور العمودي OZ وذلك حسب المعادلة (٧-٦) ، وقيمتها الممثلة بالمعادلة (٩-٦) تمثل السرعة المقابلة للقيمة $Z = L$ ، أي أنها السرعة الحدية التي يصل عندها المخروط المائي إلى قاع البئر ، لذلك فإن الشروط اللازمة للإنتاج دون إماهة هي :

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial Z}\right)_{r=0} \le \frac{k}{\mu}\Delta\gamma \qquad (٧-٩)$$

حيث إن r ـ بعد النقطة عن محور البئر (المحور OZ) .

عند الإخلال بهذا الشرط فإن الماء سوف يصل إلى قاع البئر ، حيث تبدأ إماهته . وكما هو معروف فإن سرعة الارتشاح تزداد عند زيادة وتيرة إنتاج السائل من البئر ، حيث سيزداد فاقد الضغط عند القاع وبالتالي في الطبقة ، وبالعكس .

تؤكد المسائل المذكورة أعلاه الظواهر العملية التي تحدث في الحقول النفطية ، فمثلاً لدى ظهور المياه في الآبار نتيجة لارتفاع المخروط المائي إلى قاعها ، فإن تخفيض إنتاجية الآبار سيساعد مع الزمن من جديد على إنتاج النفط من الآبار دون إماهة ، وفي أسوأ الأحوال إلى تقليص نسبة الإماهة فيها . عدا عن ذلك وفي أغلب

الأحيان لدى ظهور المياه التماسية في البئر ، يرفع قاع البئر باتجاه الأعلى باستخدام جسر اسمنتي (يصب الجزء السفلي من البئر بالأسمنت) ، الذي بدوره سيؤدي إلى إنتاج النفط غير المماه بصورة مؤقتة .

ولإمكانية التحكم بحركة المياه التماسية لابد من معرفة الشروط الحدية الواجب توفرها لتلافي وصول هذه المياه إلى الآبار .

٩-٢- الطرق المبسطة لحساب الإنتاجية العظمى للبئر دون إماهة ودون غاز :

٩-٢-١- وجود مياه تماسية :

لنفرض أن الوضع المستقر للمخروط المائي يقع عند الحالة الحدية ، حيث إن قمة المخروط تقع عند قاع البئر (M_1) كما في الشكل (٩-١) . هذه الحالة الحدية توافق إنتاجية حدية دون إماهة للبئر . لنرمز لهذه الإنتاجية بـ Q_{max} والمطلوب إيجاد العلاقة التقريبية لحسابها .

تحسب سرعة الارتشاح حسب قانون دارسي :

$$v = \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dr} \qquad (٩-٨)$$

حيث إن μ - لزوجة النفط ، r - بعد النقطة عن محور البئر .

أما الإنتاجية الحدية فتعطى بالمعادلة التالية :

$$Q_{max} = v \cdot F = 2 \pi r Z \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dr} \qquad (٩-٩)$$

بافتراض عدم قابلية السائل للانضغاط فإن $\frac{k}{\mu} = const$ ، حيث يمكن الحصول على تفاضل الضغط في كافة نقاط تماس النفط مع الماء من المعادلة (٩-٦) :

$$dP = \Delta\gamma \, dZ \qquad (٩-١٠)$$

وبتعويض هذه المعادلة في المعادلة (٩-٩) نجد :

$$\frac{Q_{max}}{2 \pi \Delta\gamma} \int_{R_k}^{R_c} \frac{dr}{r} = \int_{b_o}^{c} Z \, dZ \qquad (٩-١١)$$

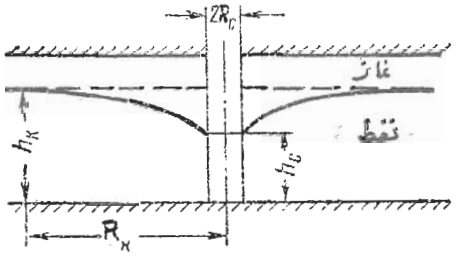
وبالنتيجة يمكن الحصول على الإنتاجية العظمى (الحدية) كما يلي :

$$Q_{max} = \frac{\pi k \Delta\gamma}{\mu} \frac{b_o^2 - \ell^2}{\ell n \frac{R_k}{R_c}} \qquad (١٢-٩)$$

نلاحظ أن هذه المعادلة تشبه تماماً معادلة حساب الإنتاجية للسائل غير القابل للانضغاط ذات السطح الحر الممثلة بالمعادلة (٥-١٦) وذلك بعد استعاضة قيم H_k ، H_c ، γ بالقيم b_o ، ℓ ، $\Delta\gamma$. عندئذ يمكن رسم علاقة الضغط بشكل مشابه تماماً للشكل (٥-٢) . وإذا دوِّر هذا المنحني 180° فإن المنحني سيعطينا شكل سطح تلامس النفط مع الماء في الطبقة ، والذي يعبر عن الارتفاع الأعظمي للمخروط المائي لدى استثمار البئر غير التام من ناحية اختراق الطبقة دون إماهة والممثل بالشكل (٩-١) .

٩-٢-٢- وجود قبعة غازية :

يمكن تطبيق الطريقة التقريبية هذه أيضاً من أجل حساب إنتاجية البئر العظمى للنفط دون غاز ، عند وجود قبعة غازية . لذلك سنفترض أنه لدينا طبقة حاوية على نفط وقبعة غازية تحتل القسم العلوي منها ، كما في الشكل (٩-٢) .



شكل (٩-٢) مخطط لبئر اختزق طبقة حاوية على نفط وبقعة غازية

سنفترض أن h_k ارتفاع سطح التلامس بين النفط والغاز قبل البدء بالاستثمار عن الحدود السفلي للطبقة . أما المجال المفتوح من الطبقة فيتمثل بـ h_c بالنسبة إلى الحدود السفلى للطبقة .

لنبحث عن السؤال التالي : ماهي الإنتاجية العظمى الممكنة من النفط دون غاز؟

إذا كان الضغط في القبعة الغازية مساوياً للضغط في البئر فوق مستوى السائل ، فإن حركة السائل إلى البئر يمكن أن تحدث فقط عند انخفاض بسيط في مستوى السائل في البئر عن مستوى السائل في الطبقة . أما عند تخفيض مستوى السائل بقيمة $h_k - h_c$ عن المستوى الأولي للسائل في الطبقة ، فإن الغاز يبدأ بالدخول إلى البئر . لذلك تعتبر هذه الحالة حدّية للإنتاج دون غاز ، وهي مشابهة لحالة جريان السائل غير القابل للانضغاط ذات السطح الحر (انظر الفصل الخامس) .

تشبه هذه الحالة تماماً حالة وجود مياه تماسية المذكورة في الفقرة السابقة ، لذلك سوف نستخدم الطريقة التقريبية السابقة نفسها من أجل حساب الإنتاجية الحدية (العظمى) للنفط دون خروج الغاز Q_{max} . فإذا دوِّر الشكل (٩-١) حول الخط BB سنحصل على الشكل (٩-٢) ، حيث سيحتل الغاز مكان الماء ، وهكذا يمكن استخدام المعادلة (٩-١٢) بعد تبديل قيم b_o ، ℓ ، $\Delta\gamma$ بالقيم h_k ، h_c ، $\Delta\gamma$ ، من أجل حساب الإنتاجية الحدية للسائل دون غاز :

$$Q'_{max} = \frac{\pi k \Delta\gamma}{\mu} \frac{h_k^2 - h_c^2}{\ell n \frac{R_k}{R_c}} \qquad (٩-١٣)$$

حيث إن $\Delta\gamma = \gamma_o - \gamma_g$ ـ الفرق مابين الوزن النوعي للنفط والغاز .

وعندما يكون $\gamma_g = 0$ فإننا سنحصل على المعادلة (٥-١٦) .

٩-٢-٣- وجود مياه تماسية وقبعة غازية :

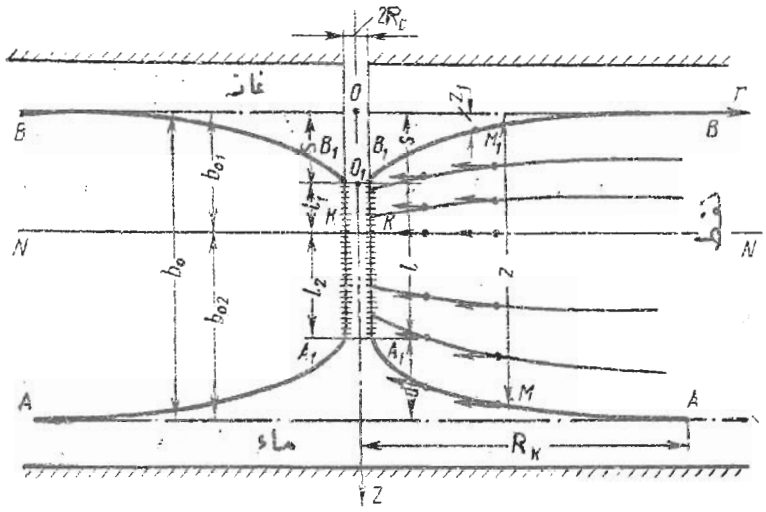
لنفرض أنه لدينا طبقة حاوية على النفط وقبعة غازية ومياه تماسية كما في الشكل (٩-٣) ، وقد حفر فيها بئر غير تام من ناحية اختراق الطبقة ومن ناحية فتحها ، حيث لم يصل الجزء المثقب إلى الحدود العليا للطبقة . سماكة الجزء الحاوي للنفط b_o ، والمطلوب الإجابة عن السؤال التالي : ماهي الإنتاجية الأعظمية للبئر دون إماهة ودون

خروج غاز. وأين نبدأ بتثقيب المواسير تحت القبعة الغازية .

لنحاول الإجابة عن هذين السؤالين باستخدام المعادلتين (٩-١٢)،(٩-١٣) .

لنفرض أن AA_1 A_1A ـ المجال المفتوح من الطبقة ـ خط تماس النفط مع الماء ، الذي يمثل الحالة الحدية لإنتاجية البئر دون إماهة .

BB_1 B_1B ـ خط التقاء النفط بالغاز ، الذي يمثل الحالة الحدية لإنتاجية البئر دون غاز . أما سماكة المجال النفطي فيبقى ثابتاً ومساوياً b_0 عند مسافة عن البئر R_k ، حيث تبقى المياه والغاز ساكنة دون تحرك .



شكل (٩-٣) مخطط لبئر ينتج من طبقة حاوية للنفط مع مياه تماسية وقبعة غازية

إن مسارات حركة جزيئات السائل عند جدران البئر وفي النقاط الواقعة فوق المجال المفتوح من الطبقة (فوق المستوى B_1B) ، ستكون منحنيته باتجاه الأسفل أما في النقاط الواقعة تحت المستوى A_1A ، فإن مسارات الحركة ستنحني باتجاه الأعلى . بينما ستكون هذه المسارات مستقيمة أفقية بين هذين المجالين ، حيث تشكل هذه النقاط مستوياً أفقياً يقسم مجال الجريان إلى قسمين : المجال العلوي ، حيث تنحني مسارات الحركة فيه نحو الأسفل ، والمجال السفلي ، حيث تنحني المسارات نحو الأعلى .

لنفرض أن NN ـ المستوي الأفقي الذي تكون فيه مسارات الحركة أفقية ، ففي المجال العلوي سيتم الجريان عند ظروف القبعة الغازية ، حيث يمكن استخدام المعادلة (٩-١٣) ، أما في المجال السفلي ، فسيتم الجريان عند ظروف المياه التماسية وبالتالي يمكن استخدام المعادلة (٩-١٢) .

وباستخدام المعادلتين (٩-١٢) ، (٩-١٣) بنفس الوقت عند جريان النفط في الطبقة بوجود مياه تماسية وقبعة غازية ، يمكن الحصول على المعادلات التالية :

$$S = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_w}\left(b_o - \ell\right) \qquad (٩-١٤)$$

حيث إن S ـ بعد القبعة الغازية عن الحدود العليا للجزء المفتوح من الطبقة ، والممثلة بالنقاط B_1B_1 .

$$Q_{max} = \frac{\pi k \Delta\gamma \left(b_o^2 - \ell^2\right)}{\mu \ln \frac{R_k}{R_c}} \cdot \frac{\gamma_o - \gamma_g}{\gamma_w - \gamma_g} \qquad (٩-١٥)$$

حيث إن $\Delta\gamma = \gamma_w - \gamma_o$ ، γ_g ـ الوزن النوعي للغاز .

إن المعادلة (٩-١٤) تجيب عن السؤال الثاني السابق الذكر ، حيث يتم بها تحيد العمق الذي سنبدأ تثقيب مواسير التغليف عنده ، وذلك عندما يكون لدينا سماكة الجزء المثقب معروفة .

أما المعادلة (٩-١٥) ، فتجيب عن السؤال الأول ، حيث إنها تسمح بحساب إنتاجية النفط دون إماهة ودون غاز ، عند وجود مياه تماسية وقبعة غازية .

وعندما تكون إنتاجية البئر محددة بشكل مسبق فيمكن حساب سماكة المجال اللازم تثقيبه من مواسير التغليف باستخدام المعادلة (٩-١٥) .