4 –1– 3 – الإجهادات التي تتعرض لها مجموعة مواسير الحفر :

تتحدد نوعية الإجهادات التي تتعرض لها مجموعة مواسير الحفر بطريقة الحفر المتبعة (حفر مطرقي أو طاحوني أو بمحركات مغمورة . . إلخ) ، وبالشروط التي يتم مصادفتها أثناء الحفر ، وأيضاً العمليات المختلفة التي تجري أثناء الحفر (حفر ، رفع ، إنزال . . إلخ). وتقسم الإجهادات إلى نوعين :

1 – إجهادات سكونية : وتتميز بأن قيمتها ثابتة ولا تتغير مع الزمن .

2 – إجهادات متغيرة (ديناميكية) .

ويمكن أن تؤثر الإجهادات على مجموعة المواسير بشكل منفصل أو بشكل موحد ، وفي الحالة الأخيرة هذه تسمى بالإجهادات المركبة . إلا أنه من الصعب تعيين الإجهادات المؤثرة على مجموعة مواسير الحفر بدقة كافية وذلك للأسباب التالية[6] :

آ – إن مجموعة المواسير لا تشكل ساقاً ثابتة المقطع، بسبب وجود النهايات المغلظة في المواسير ووجود الوصلات بأنواعها المختلفة .

ب – وجود قوى السائل السكونية والمتغيرة ، وقوى الاحتكاك عند الحركة الخطية أو الدورانية لمجموعة الحفر .

لذلك فإن حساب الإجهادات تقريبي ، ويمكن الاستعاضة عن القوى التي لا تحسب بعامل أمان، يحدد على أساس الخبرة . وعند حساب الإجهادات سوف نفرض أن مجموعة الحفر إما أن تكون مجموعة وحيدة القطر ، وهي عبارة عن مواسير لها القطر نفسه وسماكة الجدار نفسها ، أو مجموعة متعددة الأقطار ، وفي هذه الحالة تتكون من عدة قطاعات ، كل منها وحيدة القطر .

تتعرض مجموعة مواسير الحفر عند الحفر للإجهادات التالية [6، 13،23]:

1 – جهد الشد .

2 – جهد الانضغاط المحوري .

3 – جهد الفتل .

4 – جهد الانحناء .

5 – جهد الضغط الداخلي .

6 – جهد الضغط الخارجي .

7 – الاهتزازات الطولية والعرضية التي تنشأ عن رد فعل الصخر على رأس الحفر ، أو عند استخدام معدات غير مناسبة ضمن مجموعة مواسير الحفر.

والإجهادات عند الحفر باستخدام محركات مغمورة هي من النوع السكوني لأن مجموعة المواسير في هذه الحالة لا تدور، بينما تتميز بالديناميكية عند استخدام طريقة الحفر الطاحوني .

وفيما يلي سنقوم بدراسة هذه الإجهادات بالتفصيل .

4-1-3-1 – جهد الشد (Tension Stress) :

تتعرض مجموعة مواسير الحفر لجهد الشد باستمرار طيلة زمن وجودها في البئر ، ويبلغ قيمته العظمى على السطح . وتحسب قيمة جهد الشد – تبعاً للوضعية التي يوجد فيها رأس الحفر في البئر – على النحو الآتي [36، 6] :

1– في حالة وجود رأس الحفر فوق القاع (لا يلامس القاع) ، وبفرض أن البئر شاقولية ، ولا يوجد دوران لسائل الحفر في البئر :

يبلغ هذا الجهد قيمة عظمى على السطح ، وقيمته الصغرى عند رأس الحفر وتساوي الصفر ، الشكل (4–37 a).
القيمة العظمى لجهد الشد الذي يتعرض له القسم العلوي من مواسير الحفر تحسب بالعلاقة الآتية :

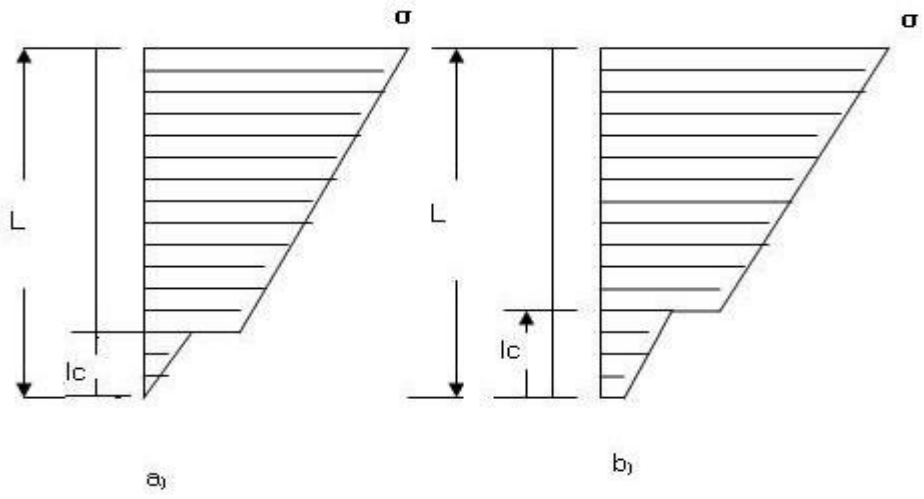
$$\sigma_{t1} = \frac{(K.L_P.q_P + L_C.q_C + G_m + G_{accs}).b}{A_P} \qquad (1-4)$$

حيث أن :

K – عامل يأخذ بالاعتبار وزن الوصلات الخاصة لمواسير الحفر وللنهايات المغلظة وتأثيرها على وزن واحدة الطول لجسم المواسير . عملياً قيمة هذا المعامل تتراوح ما بين (K = 1.05 - 1.08) .

q_C, q_P – وزن واحدة الطول لمواسير الحفر ، ثم لأعمدة الحفر .

L_C, L_P – طول مواسير الحفر وأعمدة الحفر على التوالي .



الشكل (4–37): رسم تخطيطي لتغير جهد الشد .

a – عند عدم وجود دوران لسائل الحفر. b – عند وجود دوران لسائل الحفر.

G_m – وزن المحرك المغمور (التوربين أو المحرك الكهربائي) مع رأس الحفر ، وعند الحفر الطاحوني فإن قيمة هذا الحد تهمل ، لأن وزن رأس الحفر صغير ($G_m \approx 0$) .

G_{accs} – وزن الملحقات أو المتممات لتشكيلة الحفر .

A_P – مساحة المقطع العرضي لمواسير الحفر ، وتحسب من العلاقة التالية :

$$A_P = \frac{\pi}{4}(d_{eP}^2 - d_{iP}^2) \qquad (2-4)$$

d_{iP}, d_{eP} – القطر الخارجي والداخلي لمواسير الحفر على التوالي .

b – عامل الطفو (Buoyancy Factor) ويحسب من العلاقة الآتية :

$$b = 1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_O} \qquad (3-4)$$

γ_O, γ_f – الوزن النوعي لسائل الحفر وللمعدن المصنوعة منه أعمدة الحفر (الفولاذ) ($\gamma_O = 78500N/m^3 = 7850kgf/m^3$)

يأخذ عامل الطفو في الحسبان وزن مجموعة مواسير الحفر وهي مغمورة في سائل الحفر ، وهو أقل من وزنها في الهواء . ويؤخذ هذا العامل في الاعتبار عند حفر الآبار الإنتاجية ، وعندما يتم التأكد من أن البئر سوف تبقى مملوءة بسائل الحفر ، أي أنه لن يحصل تهريب كلي للسائل يؤدي إلى إفراغ البئر . أما في الآبار الاستكشافية فلا يؤخذ هذا العامل في الحسبان لأن الشروط الجيولوجية للبئر غير معروفة ، ويمكن أن يفرغ البئر من السائل وتبقى مجموعة المواسير معلقة في الهواء ، وتكون قيمة جهد الشد في هذه الحالة أكبر ، ويمكن أن تنقطع المواسير ، خصوصاً أنها مصممة بحيث تتحمل ثقلها وهي مغمورة في السائل .

ملاحظة : إن وزن متممات تشكيلة الحفر عادةً ما يكون متضمناً مع وزن الأعمدة .

2– وجود رأس الحفر بعيداً عن القاع، وعند دوران سائل الحفر في البئر:

تصادف عادةً هذه الوضعية عند استهلاك رأس الحفر ، إذ يرفع عن القاع قليلاً مع متابعة ضخ سائل الحفر لتنظيفه من نواتج الحفر قبل البدء بالرفع لاستبدال رأس الحفر المستهلك بآخر جديد . قيمة جهد الشد في هذه الوضعية أكبر من قيمتها في الوضعية السابقة، وذلك بسبب الضغوط الضائعة داخل مجموعة مواسير الحفر الشكل (4–37 b–).

وتحسب القيمة العظمى لجهد الشد عند السطح بالعلاقة الآتية :

$$\sigma_{t2} = \sigma_{t1} + P_C \frac{A_{iP}}{A_P} \qquad (4-4)$$

حيث أن :

A_{iP} – مساحة مقطع جريان سائل الحفر داخل مجموعة مواسير الحفر (مساحة المقطع الداخلي لمواسير الحفر) وتحسب من العلاقة :

$$A_{iP} = \frac{\pi}{4} d_{iP}^2 \qquad (5-4)$$

A_P – مساحة المقطع العرضي للمواسير .

P_C – الضغط الضائع داخل مجموعة مواسير الحفر(القلم، المواسير، الوصلات ، الأعمدة ، رأس الحفر) .

إذا كانت البئر غير عمودية فإنه عند رفع مجموعة المواسير لتبديل رأس الحفر المستهلك ، أو إصلاح الأجزاء المتضيقة من جدران البئر ، فإنها سوف تحتك مع جدران البئر ، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة قيمة جهد الشد ، وبمعدل يتناسب وزاوية ميل البئر . القيمة العظمى لجهد الشد عند السطح في هذه الحالة تعطى بالعلاقة الآتية : (6–4)

$$\sigma_{t2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} W_i.\mu_i.\sin\alpha_i + \sum_{i=1}^{n} W_i.\cos\alpha_i + G_m + (\mu_n.\cos\alpha_n.\sin\alpha_n)\right].b + P_C.A_{ip}}{A_P}$$

حيث أن : W_i – وزن القسم i من مجموعة مواسير الحفر وذلك بفرض أن البئر مقسمة إلى عدة قطاعات وفقاً لزاوية الميل (زاوية الميل ثابتة ضمن قطاع واحد) .

α_n, α_i – زاوية ميل البئر في القطاع i وفي القطاع الأخير n .

μ_n, μ_i – معاملات الاحتكاك ما بين جدران البئر ومجموعة مواسير الحفر في القطاعين i و n .

ونتيجةً لتأثير جهد الشد على مجموعة مواسير الحفر فإن مواسير الحفر تتمدد بتأثير ثقلها وثقل الوزن المحمول . مقدار هذا التطاول يمكن حسابها على الشكل التالي :

آ – تمدد مواسير الحفر بتأثير ثقلها :

يعطي معهد البترول الأمريكي API المعادلة التالية لحساب تمدد مواسير الحفر بتأثير ثقلها:

$$l_1 = 2.346x10^{-8} L_P^2(\gamma_0 - 1.44\gamma_f) \qquad (7-4)$$

ب – تمدد مواسير الحفر بتأثير الوزن المحمول :

وذلك بفرض أن التغيرات في قطر أنبوب الحفر صغيرة جداً ، بحيث يكون تمدد أنبوب الحفر في الاتجاه المحوري فقط . وحسب قانون هوك فإن التمدد الناتج عن الوزن المحمول يعطى بالعلاقة الآتية :

$$l_2 = 373.8x10^{-10}\left[(W.L_P)/q_P\right] \qquad (8-4)$$

حيث أن :

W – الوزن المحمول (بالنيوتن) (وزن الأعمدة + وزن مواسير الحفر المثقلة +وزن الممركزات والقواشط والوصلات) .

ويكون التمدد الكلي في مواسير الحفر :

$$l_t = l_1 + l_2 \qquad (9-4)$$

3– حساب جهد الشد عند العمل العادي لرأس الحفر على القاع :

في هذه الحالة يترك عليه جزء من وزن أعمدة الحفر (الحمل المطبق على رأس الحفر). قيمة جهد الشد هنا تقل عن سابقاتها بما يساوي الوزن المحمول على رأس الحفر ، حيث تحسب القيمة العظمى لجهد الشد عند السطح بالعلاقة الآتية :

$$\sigma_{t5} = \frac{(K.L_P.q_P + L_{Ct}.q_C + G_m + G_{accs}).b + P.A_{iP}}{A_P} \qquad (10-4)$$

حيث أن :

L_{Ct} – طول الجزء المعرض لجهد الشد من أعمدة الحفر (الجزء الواقع فوق المقطع الحر للأعمدة) ويحسب بالعلاقة :

$$L_{Ct} = (1-C).L_C \qquad (11-4)$$

C – نسبة التحميل من وزن الأعمدة (70 - 80 %) = C

L_C – الطول الكلي لأعمدة الحفر .

إضافةً إلى الحالات السابقة لحساب جهد الشد ، توجد حالات أخرى تتطلب حساب هذا الجهد وهي :

1– عند رفع مجموعة مواسير الحفر وبفرض أن البئر شاقولية :

جهد الشد في هذه الحالة يحسب على الشكل الآتي :

آ– عند عدم وجود دوران لسائل الحفر :

$$\sigma_{t3} = \sigma_t (1 + \frac{a}{g} + \mu_f) \qquad (12-4)$$

أو

$$\sigma_{t3} = \left[(K.L_P + L_C.\frac{q_C}{q_P})(\gamma_0 - \gamma_f) \right] \left[(1 + \frac{a}{g} + \mu_f) \right] \qquad (13-4)$$

ب- عند وجود دوران لسائل الحفر :

$$\sigma_{t3} = \sigma_{t1}(1 + \frac{a}{g} + \mu_f)$$

$$\sigma_{t3} = \left[(K.L_P + L_C.\frac{q_C}{q_P})(\gamma_0 - \gamma_f) + \frac{P_{iP}}{A_P} \right] \left[(1 + \frac{a}{g} + \mu_f) \right] \quad (14\text{-}4)$$ أو

حيث أن :

a - تسارع مجموعة مواسير الحفر أثناء الرفع وتتراوح قيمته بين $a = 20 - 40 cm/s^2$

μ_f - معامل يعطي قيمة الاحتكاك ما بين مجموعة مواسير الحفر وجدران البئر ، ويأخذ قيم في المجال $\mu_f = 0.2 - 0.3$

2- جهد الشد عند إنزال مجموعة المواسير :

آ- **عند عدم وجود دوران لسائل الحفر :**

$$\sigma_{t4} = \sigma_{t1}(1 + \frac{a}{g} - \mu_f) \qquad (15 - 4)$$

$$\sigma_{t4} = \left[(K.L_P + L_C.\frac{q_C}{q_P})(\gamma_0 - \gamma_f) \right].(1 + \frac{a}{g} - \mu_f) \qquad (16 - 4)$$ أو

ب- عند وجود دوران لسائل الحفر :

$$\sigma_{t4} = \sigma_{t1}(1 + \frac{a}{g} - \mu_f) \qquad (17 - 4)$$

$$\sigma_{t4} = \left[(K.L_P + L_C.\frac{q_C}{q_P})(\gamma_0 - \gamma_f) + P\frac{A_{iP}}{A_P} \right].(1 + \frac{a}{g} - \mu_f) \quad (18\text{-}4)$$ **أو**

حيث أن : a - تسارع مجموعة مواسير الحفر عند الإنزال :

$a = 200 - 400\ cm/s^2$

3-جهد الشد عند سقوط مجموعة المواسير لمسافة قصيرة مع التوقف المفاجئ:

آ- **عند عدم وجود دوران لسائل الحفر :**

$$\sigma_{t5} = \sigma_{t1}.K_2^{\delta}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{6E.h}{(\gamma_o - \gamma_f).L^2}} \right] \qquad (19 - 4)$$

ب- عند وجود دوران لسائل الحفر :

$$\sigma_{t5} = \sigma_{t2}.K_2^{\circ}\left[1+\sqrt{1+\frac{6E.h}{(\gamma_o-\gamma_f).L^2}}\right] \quad (20-4)$$

حيث أن :

E- معامل المرونة الطولي للمواسير .

h - الارتفاع الذي تسقط منه المواسير .

L - طول مجموعة المواسير .

4-1-3-2- جهد الانضغاط المحوري (Axial Compression Stress):

يتعرض القسم السفلي من أعمدة الحفر (والذي يتم بواسطته تطبيق الحمل المقرر على رأس الحفر) لجهد الانضغاط المحوري أثناء عملية الحفر ، وكذلك عند إنزال مجموعة المواسير في البئر في مناطق التضيق أو الانحراف [6،25]. ويبلغ قيمته العظمى فوق رأس الحفر مباشرةً ، الشكل (4-38) ويحسب بالعلاقة الآتية :

$$\sigma_{aC} = \frac{L_{CC}.q_C.b}{A_C} \quad (21-4)$$

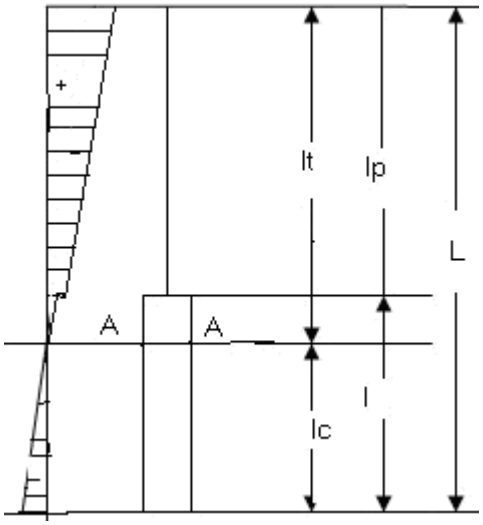
حيث أن :

A_C - مساحة المقطع العرضي لأعمدة الحفر .

L_{CC} - طول الجزء من أعمدة الحفر المعرض لجهد الانضغاط المحوري :

$$L_{CC} = C.L_C \quad (22-4)$$

L_t - الجزء من المواسير والأعمدة المعرض لجهد الشد .



الشكل (4-38): رسم تخطيطي لتغير كل من جهد الشد وجهد الانضغاط المحوري.

أما القيمة الصغرى لجهد الانضغاط المحوري فهي في المقطع الحر (A – A) وهو السطح الفاصل بين قسمي المواسير : الأول من الأعلى وهو معرض لجهد الشد دائماً ، وتقع مواسير الحفر بكاملها فيه إضافةً إلى جزء من أعمدة الحفر (L_t) ، والثاني من الأسفل ويتضمن الجزء الباقي من طول أعمدة الحفر ، وهو الجزء الذي يتم بواسطته تطبيق الحمل المقرر على رأس الحفر L_{CC} .

تكمن خطورة هذا الجهد في تناوبه مع جهد الشد في منطقة المقطع الحر ، والناتجة عن التغير المستمر للحمل على رأس الحفر ، حيث أن زيادة الحمل تؤدي إلى ابتعاد المقطع الحر للأعلى ، ونقصانه يؤدي إلى ابتعاد المقطع الحر للأسفل ، وبالتالي فإن المجال الذي يتحول فيه المقطع الحر يتعرض بالتناوب لجهدي الشد والانضغاط المحوري ، الأمر الذي يؤدي إلى تعب المعدن وفقدان مقاومته وبالتالي كسر مجموعة المواسير ، وخصوصاً إذا وقع هذا المجال في منطقة وصل ، حيث يتآكل الشرار بسرعة نتيجة تناوب الإجهادات المتعاكسة . لذلك ، ومن أجل تفادي خطر تأثير هذا الجهد ينصح بالتالي [31،6] :

1 – تحديد الحمل على رأس الحفر بحيث يكون المقطع الحر بعيداً عن منطقة وصل مجموعة المواسير مع بعضها ، وأن يكون مجال تحول هذا المقطع أقل ما يمكن ، أي المحافظة على الحمل بقيمة ثابتة قدر الإمكان .

2 – عدم السماح للمقطع الحر بالوصول إلى مواسير الحفر أو منطقة وصلها مع أعمدة الحفر .

4-1-3-3- جهد الفتل Torsion Stress :

يحسب جهد الفتل في الحالات الآتية :

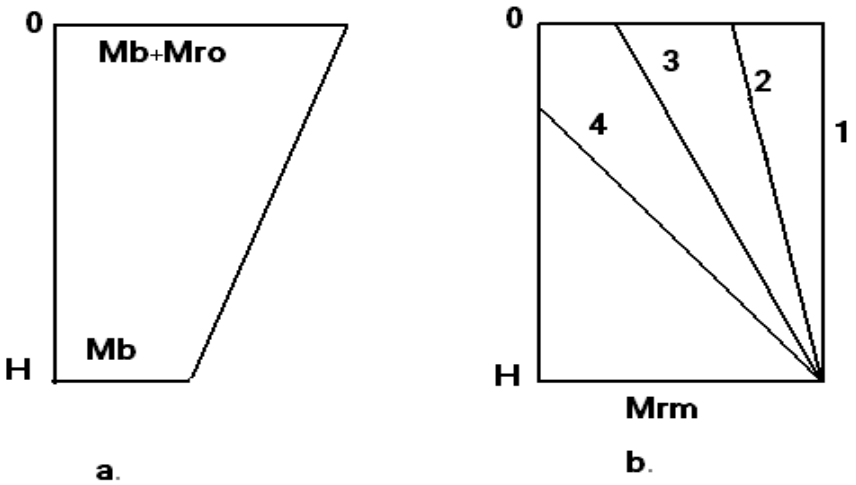
1- جهد الفتل عند عمل رأس الحفر على قاع البئر :

تتعرض مجموعة مواسير الحفر لعزم فتل بسبب تأثير قوتين متعاكستين في الاتجاه على كل من طرفيها أثناء عملية الحفر الفعلية ، فعند الطرف العلوي تؤثر قوة دورانية باتجاه اليمين تنتقل إليها من قبل الطاحون ، أما في الطرف

السفلي فتتعرض لرد فعل الصخر على رأس الحفر،والذي يساوي الحمل المطبق عليه من قبل أعمدة الحفر [6،30،31]

.

وبالتالي فإن مجموعة مواسير الحفر تتعرض أثناء الحفر الطاحوني لجهد فتل له قيمة عظمى على السطح الشكل (4-39-a) يمكن حسابها بالعلاقة الآتية :



الشكل (4-37) : رسم تخطيطي لتغير جهد الفتل في حالة :

a – الحفر الطاحوني . b – الحفر التوربيني .

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_P} = \frac{N}{\omega . M_P} = \frac{30(N_P + N_B)}{\pi . n . M_P} \qquad (23-4)$$

حيث أن :

$M_{\max}$ – عزم الفتل الذي ينقل من الطاحون إلى قلم الحفر .

M_p – معامل عزم المقاومة القطبي (Polar Modulus) لمساحة المقطع العرضي لجسم أعلى ماسورة حفر ، والذي يحسب بالعلاقة التالية :

$$M_p = \frac{\pi}{16} . \frac{d_{ep}^4 - d_{ip}^4}{d_{ep}} \qquad (24-4)$$

أو بالعلاقة :

$$M_p = 0.2 d_{ep}^3 (1 - m^4) \qquad (25-4)$$

$$m = \frac{d_{ip}}{d_{ep}} \qquad (26-4)$$

حيث أن :

ω – السرعة الزاوية لدوران مجموعة مواسير الحفر (rad/s) .

N_p – الاستطاعة (الطاقة) اللازمة لتدوير مجموعة مواسير الحفر ، وتستهلك هذه الطاقة خلال احتكاك مجموعة مواسير الحفر مع جدران البئر ومع سائل الحفر الموجود في الفراغ الحلقي ، وتعتمد على طول وقطر وعدد دورات مجموعة مواسير الحفر،وكذلك على نوعية البئر(عمودية أو مائلة – خطية أو متعرجة)، وخواص سائل الحفر . وتحسب قيمة الطاقة باستخدام علاقة فيودوروف (Fedorov) الآتية [31،2] :

$$N_p = d_\alpha . \gamma_f (L_p . d_{ep}^2 + L_c . d_{ec}^2 + ...) n^{1.7} \quad \text{(KW)} \quad (27-4)$$

حيث أن :

d_α – معامل ذو قيمة متغيرة ويعتمد على درجة ميل البئر α ويؤخذ من الجدول (4–7) :

α(º)	3	3-5	6-9	10-16	18-25	26-35
$d_\alpha.10^{-5}$	18.8	22.6-28.8	30.8-34.3	35.2-40.3	41.5-46.6	47.5-52.2

جدول (4–7) [6،25] .

γ_f – الوزن النوعي لسائل الحفر (gf/cm^3)

d_{ec}, d_{ep} – القطر الخارجي لمواسير الحفر ثم لأعمدة الحفر ، m

L_c, L_p – طول مواسير الحفر ثم طول أعمدة الحفر على التوالي ، m

n – عدد دورات مجموعة مواسير الحفر ، rot/min

N_B – الطاقة اللازمة لحت الصخور وتدوير رأس الحفر (الاستطاعة أو الطاقة المستهلكة من قبل رأس الحفر) وتعتمد على نوع وأبعاد ودرجة تآكل رأس الحفر ، ونظام الحفر المعتمد ، والخصائص الميكانيكية للصخور ، وخواص سائل الحفر . . . إلخ . وقد أدت الأبحاث النظرية إلى اعتماد العلاقة الآتية لحساب هذه الطاقة :

$$N_B = (2.2...3.2).10^{-4} (W_{OB})^{0.5} . D_B^{1.75} . n \quad \text{(KW)} \quad (28-4)$$

حيث أن :

W_{OB} – الحمل المطبق على رأس الحفر ton.f

D_B – قطر رأس الحفر cm

n – عدد دورات رأس الحفر rot/min

تعتمد القيم الصغرى للمعامل العددي عند حفر الصخور القاسية ، أما القيم الكبيرة فتعتمد في حالة الصخور الطرية (اللدنة) .

أما في حالة الحفر التوربيني وحيث أن مجموعة مواسير الحفر لا تدور فإن القيمة العظمى لجهد الفتل تكون عند رأس الحفر والصغرى عند النهاية العليا لمجموعة المواسير، وتتعلق القيمة الصغرى لهذا الجهد بدرجة احتكاك هذه المجموعة مع جدران البئر ، حيث تقل كلما ازداد الاحتكاك ، الشكل (4-37-b) .

2- جهد الفتل الذي تتعرض له مجموعة مواسير الحفر عندما يكون رأس الحفر غير مستند على القاع :

في هذه الحالة فإن جهد الفتل الذي يتعرض له القسم العلوي في المواسير يعطى بالعلاقة :

$$\tau = \frac{30 N_P}{\pi . n . M_P} \qquad (29-4)$$

3- جهد الفتل الذي يتعرض له قلم الحفر :

يعطى حسب شكل مقطع القلم على الشكل الآتي :

آ- في حالة استخدام قلم الحفر ذي المقطع الرباعي :

$$\tau_{\max} = \frac{18(N_P + N_B)}{\pi . n . \left[(1 - 0.7(\frac{d_i}{2a})^4 \right] . a^3} \qquad (30-4)$$

أو

$$\tau_{\max} = \frac{0.6 M_{\max}}{\left[(1 - 0.7(\frac{d_i}{2a})^4 \right] . a^3} \qquad (31-4)$$

حيث أن :

d_i - القطر الداخلي لقلم الحفر ذي المقطع الرباعي .

a - نصف طول ضلع المربع .

ب- في حالة استخدام قلم الحفر ذي المقطع السداسي :

$$\tau_{\max} = \frac{20(N_P + N_B)}{\pi . n . \left[(1 - 0.852(\frac{d_i}{2b})^4 \right] . b^3} \qquad (32-4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{0.66 M_{\max}}{\left[(1 - 0.852(\frac{d_i}{2b})^4 \right] . b^3} \qquad (33-4)$$

حيث أن :

d_i – القطر الداخلي لقلم الحفر ذي المقطع السداسي .

b – نصف المسافة بين وجهين متقابلين للمسدس .

4– جهد الفتل عند التوقف المفاجئ لرأس الحفر عن الدوران :

وهنا ينتج جهد فتل إضافي نتيجةً للتوقف المفاجئ لرأس الحفر عن الدوران ويعطى بالعلاقة الآتية :

$$\tau_d = \frac{d_{ep}.\omega}{2}\sqrt{\frac{G.\gamma_o}{g}} \qquad (34-4)$$

حيث أن :

G – معامل المرونة العرضي لمواسير الحفر ويعطى بالعلاقة الآتية :

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad (35-4)$$

E – معامل المرونة الطولي للفولاذ (معامل يونغ)

(Young‘s Modulus of steel)

μ – عامل بواسون للفولاذ وتؤخذ قيمته $\mu = \frac{1}{4}$

$$E = 210x10^9\, N/m^2 \Rightarrow G = 84x10^9\, n/m^2$$

ω – السرعة الزاوية لدوران رأس الحفر قبل توقفه مباشرةً وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$\omega = \pi.n/30 \qquad (36-4)$$

ويكون جهد الفتل الكلي في هذه الحالة :

$$\tau_t = \tau_d + \tau_{\min} \qquad (37-4)$$

حيث أن :

$\tau_{\min}$ – جهد الفتل الأصغري الذي يأخذ قيمة صغرى فوق رأس الحفر مباشرةً ويعطى بالعلاقة الآتية :

$$\tau_{\min} = \frac{30N_B}{\pi.n.M_C} \qquad (38-4)$$

حيث أن :

M_C – معامل عزم المقاومة القطبي لأعمدة الحفر ، والذي يحسب بالعلاقة الآتية :

$$M_C = \frac{\pi}{16}.\frac{d_{ec}^4 - d_{ic}^4}{d_{ec}} \qquad (39-4)$$

أو بالعلاقة :

$$M_C = 0.2 d_{ec}^3 \left[1 - (\frac{d_{ic}}{d_{ec}})^4 \right] \qquad (40-4)$$

حيث أن :

d_{ic}, d_{ec} – القطر الخارجي ثم القطر الداخلي لأعمدة الحفر .

– يتم تعيين الجهد المكافئ للإجهادات المركبة المتولدة عن كل من جهد الشد $\sigma_{t\max}$ وجهد الفتل $\tau_{\max}$ بالعلاقة الآتية :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2} \qquad (41-4)$$

– من أجل التأكد من قدرة المواسير على تحمل الإجهادات التي تتعرض لها مهما كانت الشروط ، يجب أن يتحقق الشرط الآتي :

$$(\frac{\sigma_C}{C_S})^2 = \sigma_{eq}^2 \geq \sigma_{t\max}^2 + 4\tau_{\max}^2 \qquad (42-4)$$

حيث أن :

σ_C – الجهد الذي تتحمله مواسير الحفر ويدعى بالنهاية الحدية لانسياب المعدن المصنوعة منه ، أو مقاومة الخضوع الصغرى (Minimum Yield Strength)

C_S – عامل أمان (Safety Factor) ، وهو النسبة ما بين النهاية الحدية لانسياب المعدن والجهد الكلي الناتج عن جهدي الشد والفتل :

$$C_S = \frac{\sigma_C}{\sigma_{eq}} \geq 1.5 \qquad (43-4)$$

أما عند حفر الآبار ذات الميل الكبير فإنه يجب أن يؤخذ في الاعتبار جهد الانحناء الذي تتعرض له مجموعة مواسير الحفر، إضافةً إلى كل من جهد الشد وجهد الفتل ، وفي هذه الحالة فإن العزم المكافئ يحسب بالعلاقة :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{\max} + \sigma_b)^2 + 4\tau_{\max}^2} \qquad (44-4)$$

حيث أن :

σ_b – جهد الانحناء ، وتؤخذ قيمة جهد الشد عند العمق المقابل لمنطقة الميل ، أما قيمة عزم الفتل فهي أيضاً عظمى .

يمكن تحديد عزم الفتل الذي تتعرض له مجموعة مواسير الحفر بالعلاقة الآتية :

$$M_t = (1.154 I_P . \sigma_C) / d_{ep} \qquad (\text{N.m}) \qquad (45-4)$$

حيث أن :

I_P – عزم العطالة القطبي (Polar Moment of Inertia) ويعطى بالعلاقة :

$$I_P = \frac{\pi}{32}(d_{ep}^4 - d_{ip}^4) \qquad ، \qquad (\text{m}^4) \qquad (46-4)$$

عندما تتعرض مواسير الحفر لجهد الفتل وجهد الشد – كما يحصل في عمليات الحفر – فإن العلاقة (4 – 45) تصبح على الشكل الآتي :

$$M_t = \frac{1.154 I_P}{d_{ep}} \sqrt{\sigma_C^2 - \frac{F^2}{A_P^2}} \qquad (47-4)$$

حيث أن :

M_t – عزم الفتل الأعظمي الذي تتعرض له مواسير الحفر تحت حمل الشد (N.m) .

F – قوة (حمل) الشد الكلي الذي تتعرض له مواسير الحفر (N) .

– يمكن حساب العزم الأعظمي المسموح به الذي تتعرض له المواسير من أجل حمل معلق (W) وبالعلاقة مع الخواص الميكانيكية للمواسير [31] بالعلاقة :

$$M_t \langle M_a = \sqrt{1 - \frac{(\sigma_C . A_P)^2}{F^2}} \qquad (48-4)$$

حيث أن :

M_a – عزم الفتل الذي تتحمله مواسير الحفر ، ويؤخذ من الملحق .

ويمكن حساب حمل الشد الأعظمي المسموح به للمواسير من أجل عزم فتل M وبالعلاقة مع الخواص الميكانيكية للمواسير بالعلاقة :

$$F = \sigma_t . A_P \langle \sigma_C . A_P \sqrt{1 - (\frac{M_t}{M_a})^2} \qquad (49-4)$$

حيث أن :

σ_t – جهد الشد الذي تتعرض له المواسير $\sigma_t = F / A_P$

σ_C – قوة الشد التي تتحملها المواسير .

4-1-3-4- جهد الانحناء Bending Stress :

ينتج جهد الانحناء في مجموعة مواسير الحفر عن سببين رئيسيين :

1 – فقدان البئر لوضعها الشاقولي وتغير اتجاهها ، وهذه الحالة تمثل وجود مجموعة مواسير الحفر ثابتة (لا تدور) داخل بئر منحرفة (حالة الحفر التوربيني) :

في هذه الحالة فإن جهد الانحناء الذي تتعرض له مجموعة مواسير الحفر يمكن تعيينه بالعلاقة :

$$\sigma_{bd} = \frac{(R_o + \frac{d_P}{2}).\alpha - \alpha.R_o}{R_o.\alpha}.E = \frac{E.d_{ep}}{2R_o} \qquad (50-4)$$

حيث أن :

R_o – نصف قطر انحناء البئر ، وذلك بفرض أن البئر المنحنية تشكل قوساً من دائرة في منطقة تغير اتجاهها ، ويعطى بالعلاقة :

$$R_o = \frac{180}{\pi}.\frac{l}{\Delta\alpha} \qquad (51-4)$$

l – طول الجزء المنحني من المواسير

$\Delta\alpha$ – الفرق المطلق لزوايا الميل ما بين طرفي المقطع المفترض :

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \qquad (52-4)$$

2 – مجموعة مواسير الحفر تدور في بئر منحرفة :

جهد الانحناء في هذه الحالة

$$\sigma_{bt} = \sigma_{bd} + \sigma_{br} \qquad (53-4)$$

حيث أن :

σ_{bd} – جهد الانحناء الناتج عن انحراف البئر (Hole Deviation) .

σ_{br} – جهد الانحناء الناتج عن دوران مجموعة مواسير الحفر في البئر ويعطى بالعلاقة :

$$\sigma_{br} = \frac{\pi^2.E.d_{ep}(K_e.D_B - d_{ep})}{4l^2} \qquad (54-4)$$

K_e – عامل يأخذ بالاعتبار عدم تجانس قطر البئر ، ويأخذ قيماً تتراوح في المجال : $K_e = 1.1-1.2$

4-1-3-5- الجهد الناتج عن الضغط الخارجي (Collapse Pressure):

في عمليات الحفر العادية فإن الضغط الخارجي الذي تتعرض له مواسير الحفر – والذي سببه هو أن الوزن النوعي لسائل الحفر في الفراغ الحلقي أكبر بقليل من الوزن النوعي لسائل الحفر داخل المواسير – ليس له أي تأثير على مقاومة المواسير ، أما في الحالة التي يكون فيها الوزن النوعي لسائل الحفر في الفراغ الحلقي أكبر بكثير منه داخلها – وهذا يحدث في حالات خاصة جداً ، وذلك عند إنزال المواسير بنهاية مغلقة ، والذي نستخدمه عند اختبار الطبقات أثناء الحفر – فإن أقصى ضغط تفاضلي عبر مواسير الحفر يحدث قبل فتح جهاز الاختبار، والذي يمكن حسابه بالعلاقة الآتية [6،18] :

$$\Delta P = H.\gamma_{f1} - (H - h).\gamma_{f2} \qquad (55 - 4)$$

حيث أن :

γ_{f2}, γ_{f1} – الوزن النوعي لسائل الحفر خارج المواسير ثم داخل مواسير الحفر على التوالي .

H – العمق الكلي للبئر .

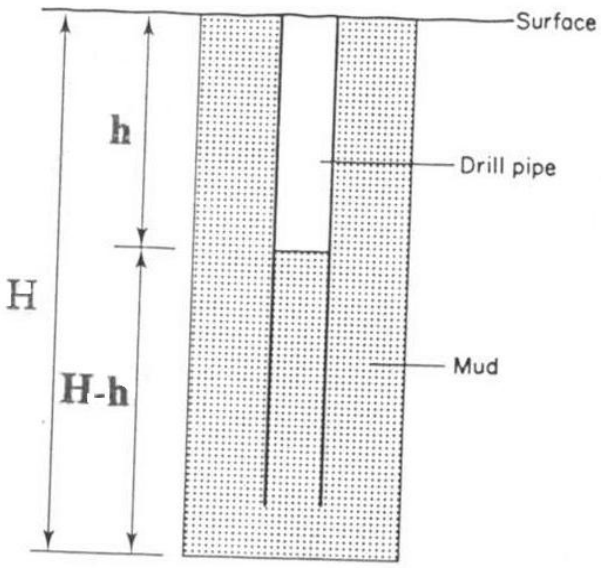
h – ارتفاع السائل داخل مواسير الحفر .

عندما تكون مواسير الحفر فارغة كلياً ($h = 0, \gamma_{f2} = 0$) **فإن :**

$$\Delta P = H.\gamma_{f1} \qquad (56 - 4)$$

– عندما يكون : $\gamma_{f1} = \gamma_{f2} = \gamma_f$ فإن :

$$\Delta P = h.\gamma_f \qquad (57 - 4)$$



الشكل (4–40) : حالات الضغط الخارجي التي تؤخذ بالاعتبار عند تصميم مجموعة مواسير الحفر.

وعندما يتم حساب ضغط التطبق ΔP فإنه يمكن مقارنته مع ضغط التطبق الذي تتحمله مواسير الحفر ، وتستعمل غالباً قيمة معامل الأمان 1/8 1 حيث أن معامل الأمان (Safety Factor (SF) : هو النسبة ما بين مقاومة التطبق وضغط التطبق ΔP .

4-1-3-6- الجهد الناتج عن الضغط الداخلي (Internal Pressure):

تتعرض مجموعة مواسير الحفر للضغط الداخلي أثناء جريان سائل الحفر بسبب الاحتكاك بينه وبين الجدران الداخلية للمواسير ، وكذلك عندما يكون ضغط عمود سائل الحفر داخل المواسير أكبر من الضغط خارجها ، ويحدث ذلك [6،23]:

1 – عند حدوث التهريب الكلي لسائل الحفر ومتابعة الحفر الأعمى ، حيث ينتج الضغط الداخلي عن الفرق في ارتفاعات السوائل داخل مجموعة المواسير وخارجها .

2 – عند حدوث اندفاع للموائع الطبقية من خلال الفراغ الحلقي أثناء وجود مجموعة المواسير داخل البئر ، وفي هذه الحالة ينتج الضغط الداخلي عن الفرق في كثافات السوائل داخل مجموعة المواسير وخارجها .

ويمكن توضيح تأثير الضغط الداخلي على مجموعة مواسير الحفر بتحليل قوة الضغط الداخلي وذلك بإسقاطها على محورين متعامدين ، فتكون إحداهما موازية لمحور المواسير (القوة المماسية للسطح الداخلي للمواسير) وهي تعمل على زيادة قوة شد المواسير باتجاه الأسفل ، والثانية عمودية على السطح الداخلي وتسمى أيضاً القوة القطرية لأنها تؤثر باتجاه قطر المواسير ، وهي عبارة عن الضغط الداخلي الناتج عن جريان السائل داخل المواسير ، ويمكن أن تؤدي في حالاتها القصوى – عندما تكون أكبر من مقاومة معدن المواسير – إلى انتفاخ المواسير في المناطق الأقل مقاومةً (وهذا نادراً ما يحصل إلا بسبب خطأ في التقدير .

يبلغ الضغط الداخلي قيمة عظمى على السطح ، وتعتمد هذه القيمة على خواص سائل الحفر (اللزوجة ، الوزن النوعي) وعلى مقطع الجريان داخل المواسير وفي الفراغ الحلقي ، وتزداد بشكل كبير عند انسداد فتحات رأس الحفر ، أو عند الضخ تحت ضغط لإيقاف اندفاع الموائع الطبقية . يمكن حساب هذا الجهد بالعلاقة الآتية :

$$\sigma_i = \frac{P_i . d_P}{2t} \qquad (58-4)$$

حيث أن :

d_P – القطر الخارجي عند الجسم لماسورة الحفر .

t – سماكة جدار ماسورة الحفر المفترضة .

P_i – الضغط الداخلي في المكان الذي يحسب فيه الجهد ، وفي حال كون هذا الضغط ناتجاً عن احتكاك السائل مع جدران المواسير فإن قيمته العظمى تكون عند الماسورة الأولى بعد قلم الحفر ، ويحسب بدوره بالعلاقة التالية :

$$P_i = \Delta P_{iP} + \Delta P_{ic} + \Delta P_{ir} + \Delta P_{oB} + \Delta P_{ec} + \Delta P_{ep} + \Delta P_{er} \quad (59\text{-}4)$$

حيث أن :

ΔP_{iP} – الضغط الضائع بالاحتكاك داخل مواسير الحفر .

ΔP_{ic} – الضغط الضائع بالاحتكاك داخل أعمدة الحفر .

ΔP_{ir} – الضغط الضائع بالاحتكاك داخل الوصلات الخاصة .

ΔP_{oB} – الضغط الضائع بالاحتكاك داخل فتحات رأس الحفر .

ΔP_{ec} – الضغط الضائع بالاحتكاك خارج أعمدة الحفر .

ΔP_{ep} – الضغط الضائع بالاحتكاك خارج مواسير الحفر .

ΔP_{er} – الضغط الضائع بالاحتكاك خارج الوصلات الخاصة .