الحفر التوربيني

(TURBO DRILLING)

انطلقت فكرة الحفر التوربيني من مبررات اقتصادية بحتة، حيث هدفت إلى التقليل من الهدر في الطاقة لتدوير مجموعة مواسير الحفر. فالحفر التوربيني هو عبارة عن طريقة حفر دورانية تعتمد الآلية الأساسية المعتمدة في طريقة الحفر الطاحوني نفسها، والفرق الأساسي هو أن دوران رأس الحفر هنا يتم بواسطة توربين (Turbine) يركب فوق رأس الحفر ويحصل على طاقته من سائل الحفر، وبالتالي فإن دوران محور التوربين يؤدي إلى دوران رأس الحفر – المتصل معه – على قاع البئر، بينما يوصل الجسم الخارجي للتوربين – وهو عديم الحركة – مع مجموعة مواسير الحفر لذلك فإن هذه المجموعة تبقى ثابتة لا تدور. إذن، الفرق الأساسي بين طريقتي الحفر التوربيني والطاحوني يكمن في طريقة إيصال الطاقة إلى رأس الحفر، فبينما يتم توليد هذه الطاقة في الحفر الطاحوني على السطح بواسطة محركات ديزل أو محركات كهربائية فإنها في الحفر التوربيني هيدروليكية، يولدها التوربين بواسطة سائل الحفر [6].

5-1 – خصائص الحفر التوربيني ومميزاته :

5-1-1 – محاسن الحفر التوربيني (Advantages of turbo drilling):

يتميز الحفر التوربيني بالمحاسن الآتية مقارنةً مع الحفر الطاحوني [6،22،27 ،3]:

١ – تعتمد سرعة تقدم رأس الحفر في الصخر بصورة قليلة على العمق الذي يعمل عنده، وذلك لأن الحمل الذي يترك على رأس الحفر وعدد دوراته ليست محددة بقدرة مجموعة مواسير الحفر، بينما يحدد عدد الدورات في الحفر الطاحوني بحيث يتم تلافي الإجهادات الخطرة، مثل الاهتزازات الطنينية، والانحناء الناتج عن قوى الطرد المركزية . . . إلخ.

٢ – إن حوادث كسر مجموعة مواسير الحفر وانقطاعها هنا قليلة نظراً لأن قيم الإجهادات التي تتعرض لها – بسبب عدم دورانها – قليلة. ونذكر هنا أن المشاكل التي تنتج عن تعب معدن المواسير بسبب الإجهادات ذات القيم المتغيرة كجهد الانحناء لا يمكن مصادفتها أثناء الحفر التوربيني، أو أن احتمال حدوثها قليل جداً.

٣ – نظراً للقيم القليلة لبعض الإجهادات (جهد الفتل ، جهد الانحناء) فإنه يمكن استخدام مواسير حفر بسماكة جدار أقل، الأمر الذي يجعل عمليات الرفع والإنزال تتم بشكل أسرع وبطاقة أقل، كما أن الجهد الذي تتعرض له مجموعة الرفع والإنزال أقل، وبالتالي فإن عمر هذه المجموعة يكون أطول، وبالنتيجة فإن الكلفة الإجمالية لحفر البئر تكون أقل.

٤ – نظراً لعدم دوران مجموعة مواسير الحفر فإن احتكاكها مع جدران البئر قليل جداً ، وبالتالي فإن معدل تآكلها منخفض ، الأمر الذي يجعل عمر هذه المجموعة أطول ، وبالتالي يمكن استخدامها لحفر عدد أكبر من الآبار.

٥ – إن تآكل مواسير التغليف نتيجة تعرضها للاحتكاك مع مجموعة مواسير الحفر قليل لأن هذه الأخيرة لا تدور، وينحصر الاحتكاك أثناء رفع مجموعة مواسير الحفر وإنزالها.

٦ – معدل تآكل معدات التدوير السطحية (الطاحون، قلم الحفر، الرأس الهيدروليكي، أجهزة نقل الحركة من علبة السرعة إلى الطاحون) هو قليل نظراً لعدم دوران القسم المعلق مع مواسير الحفر وعدم دوران هذه الأخيرة، الأمر الذي يعني إطالة عمر هذه المعدات ، وإمكانية استخدامها في عدد أكبر من الآبار.

٧ – نظراً لأن مجموعة مواسير الحفر لا تدور فإن تمييل الآبار أو حفر الآبار الموجهة يتم بسهولة كبيرة باستخدام هذه الطريقة من الحفر، بل إنها الطريقة الوحيدة المستعملة لتمييل الآبار وحفر الآبار الموجهة.

5-1-2- مساوئ وعيوب الحفر التوربيني

(Disadvantages of turbo drilling)

على الرغم من المحاسن والمزايا المذكورة سابقاً للحفر التوربيني فإن انتشاره ما يزال قليلاً مقارنةً بالحفر الطاحوني، وذلك بسبب بعض العيوب والمساوئ التي رافقت استخدامه، والتي نذكر منها [29،3,6،28]:

١ – إن عدد دورات محور التوربين كبير جداً (أكثر من 1000دورة / دقيقة) ، وهذا يتطلب استخدام رؤوس حفر قادرة على تحمل هذا العدد الكبير من الدورات ، لأن رؤوس الحفر ذات التروس المخروطية المستخدمة حالياً مصممة لتحمل ضغط محوري كبير وعدد دورات قليلة، وعند استخدامها في الحفر التوربيني فإنها تستهلك بسرعة (خصوصاً مراكز استناد التروس المخروطية) وتعطي مردوداً أقل من ذلك الذي تعطيه عند استخدامها مع الحفر الطاحوني، كما أن رؤوس الحفر الألماسية – ومع أنها تتحمل عدد مرتفع من الدورات – تتطلب غزارة كبيرة لسائل الحفر، وذلك لتبريد حبيبات الألماس، وهذا ما يصعب تأمينه في الحفر التوربيني، نظراً للوظيفة الإضافية المطلوبة من سائل الحفر، وهي تشغيل التوربينات.

٢ – تتطلب بعض الصخور (خصوصاً اللدنة) تأمين عزم دوران مرتفع للحصول على حت حجمي فيها، وتتميز توربينات الحفر العادية بأنها غير قادرة على توليد مثل هذه العزوم، مما يؤدي إلى إيقاف التوربين عن الدوران، وربما تعطله.

٣ – تتعرض مضخات سائل الحفر لضغط كبير جداً، لأن المضخات وإضافةً إلى وظائفها الأساسية المتمثلة في تحمل الضغط الضائع نتيجة جريان السائل داخل مجموعة الحفر وخارجها، فإنها يجب أن تؤمن تشغيل التوربين وبطاقة كافية لتدوير رأس الحفر، وهذا يعني ضغوطاً إضافية ويتطلب استخدام مضخات ذات استطاعة كبيرة. وفي كثير من الأحيان فإن مضخات سائل الحفر على السطح تحدد العمق الأعظمي الذي يمكن عنده استعمال الحفر التوربيني، حيث أن البئر تصمم عادةً كي تحفر باستخدام الطاحون، وتختار المضخات عادةً وفقاً لهذه الطريقة، لأنه لا يمكن حفر البئر بكاملها توربينياً.

٤ – إن مجال تحول عدد دورات محور التوربين كي يعمل بنظام مستقر محدود جداً لمعظم توربينات الحفر، وخروج عدد الدورات عن مجال التحول يؤدي إلى إيقاف التوربين، فعند عدد قليل من الدورات لا يتحمل التوربين رد فعل القاع، أما عند عدد دورات كبير فتزداد الاهتزازات وتصبح خطرة.

٥ – لا يمكن استخدام فالات في فتحات رأس الحفر لزيادة سرعة خروج السائل وتأمين تنظيف تام لقاع البئر، لأن نبل التوربين (وهو الوصلة التي يربط من خلالها مع رأس الحفر) لا يحقق إغلاقاً جيداً للتوربين، خصوصاً مع ارتفاع الفرق ما بين الضغط داخل التوربين وخارجه.

٦ – إن تكاليف صنع التوربينات وكذلك صيانتها المستمرة وإصلاحها المتكرر نتيجة الأعطال الكثيرة التي تتعرض لها تؤدي إلى زيادة تكاليف الحفر. فإذا كانت سرعة الحفر (سرعة إنجاز البئر) لا تزداد بشكل مناسب، فإن استخدام الحفر التوربيني يصبح غير اقتصادي.

بالنظر إلى إيجابيات الحفر التوربيني وسلبياته، نرى أن اختيار طريقة الحفر المناسبة يجب أن يتم بعد دراسة الفعالية الاقتصادية لكل طريقة، واستخدام الطريقة الأكثر اقتصاديةً.

يستخدم الحفر التوربيني في الوقت الحاضر وعلى نطاق واسع عند حرف الآبار عن الاتجاه الأولي، وكذلك عند حفر الآبار الموجهة، كما يستخدم لحفر المراحل السطحية من الآبار، والمناطق التي تتطلب سرعة كبيرة في الاختراق [3،6].

5-2- تصنيف توربينات الحفر وتركيبها

Classification and construction of turbines

تصنف توربينات الحفر إلى الأنواع الرئيسية الآتية [3، 36،31،6]:

5-2-1 – توربينات عادية :

وهي من أكثر التوربينات استخداماً، وتقسم بدورها إلى الأنواع الآتية:

1 – توربينات بسيطة (وحيدة القطاع):

وتتألف من 100 طابق. يتألف التوربين البسيط (وحيد القطاع) من الأجزاء الآتية (الشكل 5-1):

– **الجزء الساكن** (Stator): وهو عبارة عن ماسورة أسطوانية الشكل (1) تمثل الجسم الخارجي للتوربين (مبيت التوربين)، تثبت عليه الأقراص الساكنة (4). يوصل الجزء الساكن من الأعلى مع مجموعة مواسير الحفر بواسطة وصلة ذات شرار (8).

– **الجزء الدوار** (Rotar): وهو محور التوربين (2) الذي تثبت عليه الأقراص الدوارة (3) ، وينتهي من الأسفل بوصلة ذات شرار داخلي لوصله مع رأس الحفر (12). ينتهي محور التوربين من الأعلى بشرار خارجي تثبت عليه عزقة دوارة (9) والتي يؤدي شدها إلى الضغط على الأقراص الدوارة وتثبيتها مع المحور وتقليل الفراغ ما بين طابق وآخر، وعزقة أخرى من نوع كبس (10) لمنع حل العزقة الأولى.

– **مركز استناد محوري أو الرئيسي (5):** ويتواجد عادةً في الطرف العلوي للتوربين، ويمكن أن يوضع في الأسفل، ويتم من خلاله تعليق محور التوربين مع الجسم الخارجي ، والاحتكاك فيه من نوع معدن – مطاط، أو مطاط – مطاط، وأحياناً يكون ذا رولمانات (مضاجع) بحيث يمنع سائل الحفر من الدخول إليه.

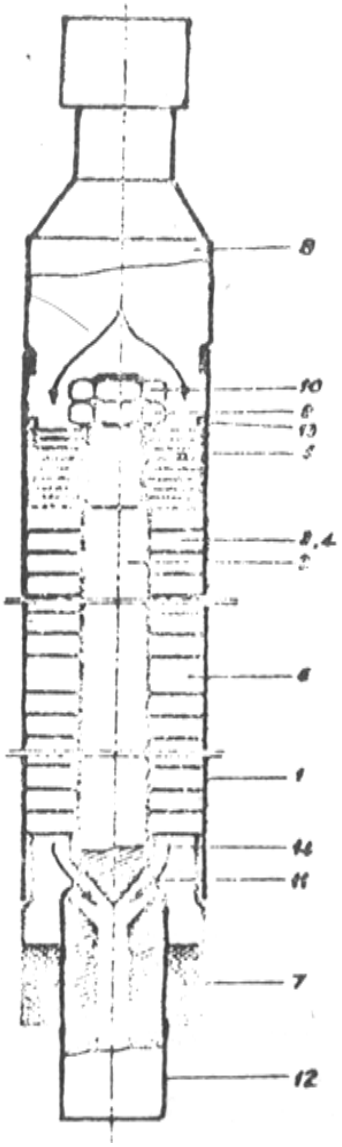
– **ممركزات قطرية (6):** وعددها ممركزان أو ثلاثة ممركزات توضع ما بين الطوابق وعلى مسافات متساوية. وظيفتها إبقاء محور التوربين متمركزاً مع جسمه الخارجي، ومنعه من الحركة الأفقية أو الانحناء.

– **الجزء السفلي من التوربين (نبل التوربين)**: يستند محور التوربين من الأسفل على ركيزة (14) مجهزة بفتحتين (11) لمرور سائل الحفر الخارج من التوربين باتجاه رأس الحفر. ولمنع سائل الحفر من الخروج إلى الفراغ الحلقي دون مروره إلى رأس الحفر يستعمل المطاط (7) الذي يسمح بدوران المحور في الوقت نفسه.

يستخدم توربين الحفر البسيط في حفر الآبار الشاقولية والمائلة بعمق يتراوح ما بين 2000-2500 m ، وإذا كانت زاوية الانحراف في البئر كبيرة يستخدم توربين بسيط قصير (30 – 60 طابق وبطول 4 – 3 m). وفي الجدول (5–1) نبين بعض المواصفات التقنية لبعض التوربينات البسيطة المستخدمة في حفر الآبار.

2 – توربينات مركبة (عديدة القطاعات) :

حيث توصل عدة توربينات بسيطة مع بعضها على التسلسل، فقد يوصل توربينان (ثنائية القطاع)،أو ثلاثة (ثلاثية القطاع)، ونادراً ما توصل أربعة توربينات (رباعية القطاع).



الشكل (5–1): رسم توضيحي لتوربين حفر بسيط.

نوع التوربين	عدد الطوابق K	عدد طوابق مركز الاستناد الرئيسي	القطر الخارجي D_t,mm	القطر الحسابي d_c, mm	طول التوربين mm	وزن التوربين kg
$T_{12}M_2$-10"	100	12	250	175.5	8500	2530
$T_{12}M_3$-9"	120	12	240	160	9400	2100
$T_{12}M_3$-8"	100	12	215	147	8940	1690
$T_{12}M_3$-6 5/8"	100	8	170	119	8660	1090

جدول (5–1) : بعض المواصفات التقنية لبعض توربينات الحفر البسيطة .

آ– التوربينات المركبة ثنائية القطاع :

وهي تتألف من توربينين بسيطين، ويصمم التوربين الأسفل بحيث يمكن استخدامه بشكل مستقل. ويتميز هذا النوع عن البسيط بتركيب الجزء العلوي من المحور، وبعدد طوابق مركز الاستناد المحوري. ينتهي المحور العلوي من الأسفل بوصلة ذات شرار لربطه مع التوربين الثاني. يتكون التوربين السفلي من عدد الطوابق نفسها التي يتكون منها التوربين البسيط، إلا أن عدد طوابق مركز الاستناد المحوري أكبر وذلك من أجل استيعاب الأحمال المحورية الناتجة عن كلا التوربينين. كما يحوي ممركزين قطريين. تستخدم في الوقت الحاضر توربينات ثنائية القطاع لأخذ العينات الأسطوانية، حيث يستبدل المحور الدوار المصمت بآخر مجوف يوضع بداخله حامل العينة الذي يعلق في الطرف العلوي من التوربين الثاني.

ب– التوربينات المركبة ثلاثية القطاع :

وهي عبارة عن ثلاثة توربينات توصل مع بعضها على التسلسل بطريقة وصل التوربينات ثنائية القطاع نفسها، ويصل عدد طوابقها إلى 350 طابقاً، مما يسمح بتوليد طاقة كبيرة وعزم دوران مرتفع لرأس الحفر، الأمر الذي يمكن من حفر آبار لعمق 4500 – 5000 m

3 – توربينات حفر نفاثة:

حيث توصل التوربينات مع بعضها على التوازي وذلك لحفر آبار ذات أقطار كبيرة. ويمكن استخدام توربينات نفاثة مكونة من توربينين (توربين نفاث مزدوج) لحفر آبار بقطر 1020 mm ، أو من ثلاثة توربينات لحفر آبار بقطر (1260–2080 mm)، أو من أربعة توربينات لحفر آبار بقطر 2600 mm .

يتكون التوربين النفاث المزدوج (الشكل 5–2) من وصلة ذات شرار داخلي (1) لوصله مع مجموعة مواسير الحفر، ثم الجسم الخارجي للتوربين النفاث (2) ، والذي يقوم بدور حماية المكونات الداخلية للتوربين، وعارضتين (3) مجهزتين بوصلتين مذكرتين يقرن بهما التوربينان ، وأوزان (4) و (6) لزيادة وزن التوربين النفاث المزدوج، وكلابتين

عليا وسفلى (5) لتأمين المتانة اللازمة للتوربين، ويوصل التوربين مع رأس الحفر ذي التروس المخروطية الثلاثة (8) بالوصلة (7).

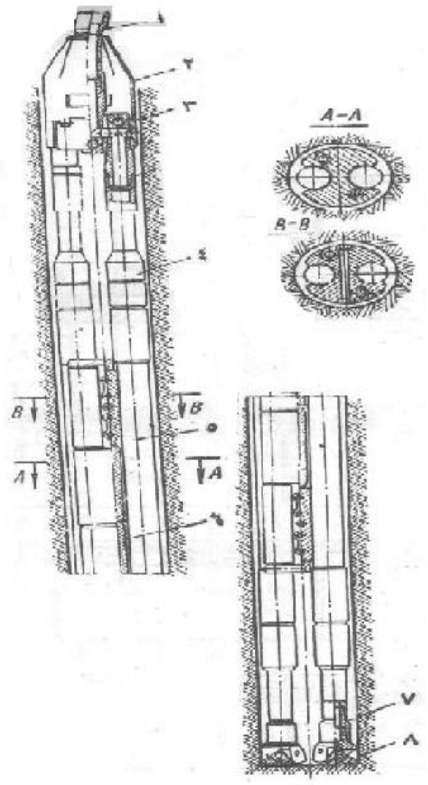
يتلقى رأسا الحفر المعلقان بمحوري التوربينين حركة دورانية وأخرى انتقالية إضافية حول محور التوربين النفاث المزدوج، الذي يدور إما على حساب قوى رد فعل القاع فقط، أو على حساب هذه القوى، والدوران القسري للتوربين المزدوج مع مجموعة مواسير الحفر. ويتم تحطيم الصخر بأسنان الرؤوس نتيجةً لدورانها حول محورها، وحول محور رأس الحفر في الوقت نفسه، وكذلك حول محور التوربين النفاث المزدوج.

5-2-2 – توربينات حفر قصيرة :

وهي تتألف من 30 طابق فقط، وتستخدم لحفر الآبار الموجهة أو حرف الآبار.

5-2-3 – توربينات لأخذ العينات الأسطوانية:

ويمكن أن تكون من النوع البسيط أو من النوع المركب. وتتميز عن سابقاتها بأن محورها مجوف ويعمل كأنبوب لحفظ العينة الأسطوانية، ويوصل في نهايته مع رأس التلبيب، كما أن مركز الاستناد المحوري يقع في الجزء السفلي أسفل الفتحات التي يمر من خلالها سائل الحفر داخل المحور، الأمر الذي يؤدي إلى توفير الظروف الملائمة لزيادة سرعة الحفر. والجدول (5-2) يبين بعض الخصائص التقنية لبعض توربينات الحفر المركبة.



الشكل (5-2) : توربين الحفر النفاث المزدوج .

النوع	عدد الأجزاء	عدد الطوابق	عدد طوابق مركز الاستناد المحوري	القطر الخارجي D_t,mm	طول التوربين L_t, mm	وزن التوربين kg
$T_C4\text{-}10^{"}$	2	200	18	250	16180	4680
$T_C5B\text{-}9^{"}$	2	215	18	240	15050	3425
$T_C4\text{-}8^{"}$	2	197	18	215	15900	3135
$T_C4\text{-}6\ ^{5/8"}$	2	187	17	170	15250	2530
$T_C4A\text{-}5^{"}$	2	240	15	127	13950	1120

جدول (5-2) : بعض الخصائص التقنية لبعض توربينات الحفر المركبة .

5-3- دراسة جريان سائل الحفر خلال التوربين :

إن دراسة جريان سائل الحفر خلال التوربين غايةي الصعوبة، نظراً لأن هذا الجريان يتم من خلال القنوات الضيقة المتشكلة ما بين ريش الأقراص الساكنة والدوارة، ولأن سائل الحفر لزج، ويتحرك بذبذبات مستمرة لكل من السرعة والضغط، ناتجة عن حركة ريش الأقراص الدوارة بالنسبة إلى الريش الساكنة من جهة، وبسبب استعمال مضخات لسائل الحفر من النوع المكبسي، والتي تتميز بتذبذب الغزارة من جهة أخرى. لذلك، وللتمكن من دراسة هذا الجريان، وتحديد معاملات تشغيل التوربينات بطريقة رياضية سوف نفترض ما يلي[6،17]:

1 – يتمتع سائل الحفر بحركة مطلقة، وهذه الفرضية تمكن من إهمال تأثير القوى المتسببة عن اللزوجة .

2 – بما أن تردد التذبذبات كبير جداً، فإنه تؤخذ قيم وسطية لكل من الضغط وسرعة جريان السائل.

3 – معدل جريان سائل الحفر خلال قنوات ريش التوربين ثابت.

4 – يتحرك سائل الحفر خلال التوربين بين سطحين أسطوانيين متمركزين – ما بين الجسم الخارجي للتوربين ومحوره الداخلي – أي أن السائل يجري في طبقات حلقية أسطوانية متمركزة ومنفصلة. هذه الفرضية تمكن من تطبيق نظرية يولر اللابعدية على توربينات الحفر.

5 – الفراغ المحوري ما بين قرصين متتاليين صغير، ويبقى مليئاً بسائل الحفر.

5-3-1- بعض المفاهيم الأساسية في دراسة الجريان :

5-3-1-1- القطر النظري (الحسابي) لتوربين الحفر (Mathematical diameter)

من أجل دراسة عمل توربين الحفر نعزل طبقة حلقية أسطوانية وسطية من تيار سائل الحفر ونفرض أنها وحيدة في الفراغ الذي يجري خلاله سائل الحفر، وأن سرعة الجريان في هذه الطبقة ثابتة كتابع للزمن. قطر هذه الطبقة نطلق عليه

تسمية " القطر الحسابي أو النظري للتوربين المحوري". ويمكن تعيين هذا القطر بالعلاقة مع القطر الخارجي D_e والداخلي D_i لقنوات ريش الأقراص الدوارة والساكنة (الشكل 5-3) بطريقتين [6،27] :

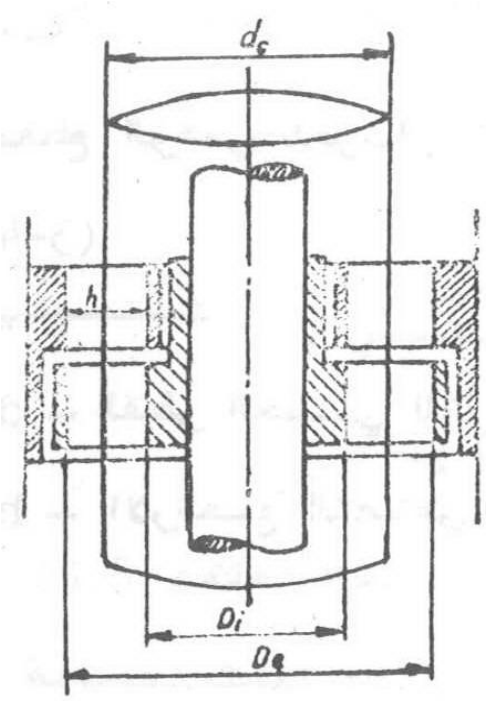
1 – القطر النظري هو الوسط الحسابي لكل من قطري القنوات الداخلي والخارجي:

$$d_C = \frac{D_e + D_i}{2} \qquad (1-5)$$

2 – هو القطر الذي يقسم مساحة السطوح الحلقية المحددة بالقطرين الداخلي والخارجي إلى قسمين متساويين، أي بالعلاقة:

$$d_C = \sqrt{\frac{D_e^2 + D_i^2}{2}} \qquad (2-5)$$

وهذه العلاقة هي الأكثر دقةً ، لذلك تستخدم نتائجها في حساب معاملات تشغيل التوربين.



الشكل (5-3) مقطع طولي في طابق من توربين الحفر .

5-3-1-2 – معامل تضيق توربين الحفر :

وهو معدل تناقص مقطع جريان سائل الحفر بسبب وجود الريش في سلسلة الأقراص الدوارة والساكنة لتوربين الحفر، ويعرف بالنسبة ما بين مساحة المقطع الحقيقي للجريان A_C (أي مع الأخذ بعين الاعتبار وجود الريش) ومساحة المقطع الوهمي للجريان A'_C (عند إهمال وجود الريش) [6،27] ، أي بالعلاقة:

$$X = \frac{A_C}{A_C^{'}} \qquad (3\text{-}5)$$

المقطع الوهمي للجريان $A_C^{'}$ يعطى بالعلاقة :

$$A_C^{'} = \pi . d_C . h \qquad (4\text{-}5)$$

h – الارتفاع الشعاعي لريش التوربين باتجاه القطر :

$$h = \frac{D_e - D_i}{2} \qquad (5\text{-}5)$$

أما المقطع الحقيقي للجريان A_C فيعين من الفرق ما بين المقطع الوهمي والمساحة التي تشغلها الريش ، أي بالعلاقة :

$$A_C = A_C^{'} - A_P \qquad (6\text{-}5)$$

A_P – مساحة الريش، وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$A_P = Z.h\frac{\delta}{\sin\alpha} = \frac{\pi . d_C}{t}.h\frac{\delta}{\sin\alpha} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث أن :

Z – عدد ريش كل قرص (وهو ثابت لجميع الأقراص الساكنة والدوارة) .

δ – سماكة الريش عند حدود المخارج للأقراص .

t – المسافة بين ريشتين متتاليتين

α – الزاوية التي تصنعها الريش مع الأقراص عند حدود مخارجها .

وبالتالي يكون معامل تضيق توربين الحفر :

$$X = 1 - \frac{\delta}{t.\sin\alpha} \qquad (8\text{-}5)$$

تحدد قيمة هذا المعامل من قبل المصنع، وهي بالنسبة إلى توربينات الحفر تتراوح بين 0.85÷0.75.

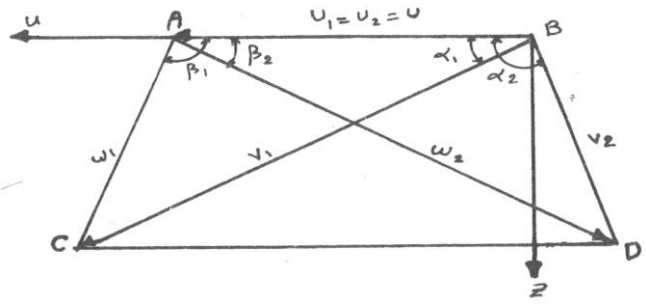
5-3-1-3- مثلثات السرعة :

يتعرض سائل الحفر أثناء عبوره خلال القنوات ما بين ريش القسم الدوار لحركتين نسبيتين هما: حركة انتقالية أو دائرية مع الريش بسرعة u ، والثانية حركة نسبية بالنسبة إلى الريش بسرعة W . محصلة هاتين السرعتين هي سرعة مطلقة V . مثلثات السرعة هي العلاقة ما بين السرعات الثلاث u, W, V [6،27]. يوجد مثلث سرعة في كل نقطة من

نقاط قنوات الأقراص ، أي أنه هناك عدد لانهائي من مثلثات السرعة لكل توربين حفر. إلا أنه من أجل دراسة جريان سائل الحفر وتحديد معاملات تشغيل التوربينات سوف نأخذ أربع نقاط مميزة تقع عند حدود المداخل والمخارج لكل من الأقراص الساكنة والدوارة ولطابق وحيد، أي سوف يكون لدينا أربعة مثلثات للسرعة كما في الشكل (5–4).

ومن أجل دراسة مثلثات السرعة لتوربين الحفر سوف نفرض ما يلي [6،27]:

1 – إن الأقراص قريبة من بعضها (ويمكن تحقيق ذلك بالشد الجيد للعزقة الدوارة)، وأن كمية السائل التي تهرب ما بين قرصين متتاليين قليلة جداً بحيث يمكن إهمالها (وهذا يعني عملاً منتظماً خال من التغيرات الحادة لتوربين الحفر).



الشكل (5–4) : مثلثات السرعة.

2 – إن ما يحدث عند حدود المداخل والمخارج للأقراص الساكنة والدوارة متماثل، أي أن مثلث السرعة المقابل للخروج من القرص الساكن يشابه مثلث السرعة المقابل للدخول في القرص الدوار، وأن مثلث السرعة المقابل للخروج من القرص الدوار يشابه مثلث السرعة المقابل للدخول في القرص الساكن للطابق التالي. إذن يكفي أن ندرس المثلثين الموضحين في الشكل (5–4) : ABC المقابل للدخول في القرص الدوار ، و ABD المقابل للخروج من القرص الدوار .

من الفرضيات السابقة نجد :

$$V_1 = V, \qquad u_1 = u, \qquad W_1 = W$$

$$V_2 = V_0, \qquad u_2 = u_0, \qquad W_2 = W_0 \qquad (9\text{-}5)$$

حيث أن : الرمز 0 : يشبر إلى القيم المقابلة لوضعية الدخول في الأقراص الساكنة .

1 : يشبر إلى القيم المقابلة لوضعية الدخول في الأقراص الدوارة .

2 : يشبر إلى القيم المقابلة لوضعية الخروج من الأقراص الدوارة .

والقيم التي لا يرافقها أي رمز تقابل وضعية الخروج من الأقراص الساكنة .

من مثلثات السرعة المقابلة لحدود مداخل ومخارج الأقراص الدوارة يمكن استنتاج العلاقات التالية :

$$u_1 = u_2 = u$$

$$V_{1z} = V_{2z} = W_{1z} = W_{2z} = V_z$$

$$V_{1u} = V_z \cdot \operatorname{cotg} \alpha_1$$

$$V_{2u} = u - V_z \cdot \operatorname{cotg} \beta_2 = V_z \cdot \operatorname{cotg} \alpha_2 \qquad (10\text{-}5)$$

حيث استخدمنا الدليل u لمساقط السرعات في مستوي عمودي على محور التوربين ، والدليل z لمساقطها باتجاه هذا المحور .

5-3-1-4- نظرية يولر (Euler) من أجل التوربينات المحورية :

حسب هذه النظرية فإن القوة الفعالة على الريش والتي تحقق العمل الميكانيكي الدوراني لمحور التوربينات هي عبارة عن القوة المتغيرة لتيار السائل الذي يؤمن تشغيل التوربينات، أي القوة المعطاة بالعلاقة [6،35،36] :

$$F = \frac{Q.\gamma}{g}(V_{1u} - V_{2u}) \quad (11\text{-}5)$$

حيث أن: Q – غزارة سائل الحفر الذي يجري خلال قنوات التوربين.

γ – الوزن النوعي لسائل الحفر. g – تسارع الجاذبية الأرضية.

وبالتالي فإن قيمة عزم الدوران لمحور التوربين الذي يتألف من K طابق يعطى بالعلاقة:

$$M = K.\frac{Q.\gamma}{g}.r_C.(V_{1u} - V_{2u}) \quad (12\text{-}5)$$

r_C – نصف القطر الحسابي للتوربين : $r_C = d_C / 2$

وتكون الطاقة المستهلكة من قبل محور التوربين تساوي إلى جداء عزم الدوران والسرعة الزاوية w والتي يفترض أنها تساوي السرعة u :

$N = M . u$

$$N = K.\frac{Q.\gamma}{g}.u.(V_{1u} - V_{2u}).r_C \quad (13\text{-}5)$$

والطاقة على محور التوربين تنتج عن الضغط الضائع في القسم الدوار، والذي يسمى بالضغط الفعال، ويحسب بالعلاقة :

$$H_{ef} = \frac{N}{Q.\gamma} = K.\frac{u}{g}.(V_{1u} - V_{2u}).r_C \quad (14\text{-}5)$$