

تصميم حسابي لتوربين بيلتون لمحطة الطاقة الكهرومائية ودراسة أثر تغير الارتفاع عليه

باسل حامد محمد *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٨/٢٤ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١٠/٢)
□ ملخص □

تُعتبر الموارد المائية من بين الموارد الطبيعية الأكثر وفرةً، حيث يوجد العديد من الأنهار والجداول والسدود التي تتضمن كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية بالإضافة أنه من المتوقع أن يتم تنفيذ محطات الطاقة الكهرومائية بشكل متزايد في المستقبل وذلك بسبب ازدياد الطلب على الطاقة والنقصان في الوقود الأحفوري، علاوة على ذلك فإن تكلفة الطاقة الكهرومائية أرخص نسبياً مقارنة بالموارد الأخرى. لذلك تم في هذا البحث وضع دراسة حسابية لتصميم الجزء الأهم من المحطة الكهرومائية وهو التوربين الهيدروليكي وسنختص في هذا البحث بدراسة توربين بيلتون المناسب للارتفاعات العالية حيث تم حساب الاستطاعة الممكن إنتاجها عند ارتفاع [m] 512.5 و تدفق [m³/sec] 1 وبلغت [kW] 4524.863 وكانت السرعة الدورانية الحقيقية للتوربين [r.p.m] 671.978 والسرعة النوعية [r.p.m] 18.537 وقطر التوربين [m] 1.312 وقطر النفاث [m] 0.115 وعدد الفوهات المطلوبة فوهة واحدة قطر مخرجها [m] 0.054 وبلغ عدد الشفرات [21]. وتم حساب الأبعاد الأساسية للشفرة والفوهة، كما توصلنا إلى أنه عند تدفق ثابت [m³/sec] 1 وبزيادة الارتفاع من [m] 25 حتى [m] 1000 تزداد الاستطاعة والسرعات عند الدخول والخروج من الشفرة بينما يحقق التوربين أقصى كفاءة بدءاً من ارتفاع [m] 435 وما فوق في حين يكفي فوهة واحدة من ارتفاع [m] 208 وما فوق أما إذا كان الارتفاع أقل من ذلك نحتاج إلى عدد أكبر من الفوهات.

الكلمات المفتاحية: توربين بيلتون - الاستطاعة - الفوهة - الارتفاع - التدفق - EXCEL.

*مهندس حاصل على درجة الماجستير - قسم تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - سوريا.

Computational design of a Pelton turbine for a hydroelectric power plant and a study of the effect of elevation change on it

Basel Hamed Mohammad*

(Received 24/8/2025 . Accepted 2/10/2025)

□ ABSTRACT □

Water resources are among the most abundant natural resources, as there are many rivers, streams and dams that contain large amounts of electrical energy. In addition, it is expected that hydroelectric power plants will be implemented increasingly in the future due to the increasing demand for energy and the decrease in fossil fuels. Moreover, the cost of hydroelectric power is relatively cheaper compared to other resources. Therefore, in this research, a computational study was conducted to design the most important part of the hydroelectric station, which is the hydraulic turbine. In this research, we will specialize in studying the Pelton turbine suitable for high altitudes, as the possible power produced at a height of 512.5 [m] and a flow of 1 [m³/sec] was calculated and amounted to 4524.863 [kW]. The actual Rotational speed of the turbine was 671.978 [r.p.m], the specific speed was 18.537[r.p.m], the turbine diameter was 1.312 [m], the jet diameter was 0.115 [m], and the number of nozzles required was one nozzle with an outlet diameter of 0.054[m] and the number of blades was [21] and the basic dimensions of the bucket and nozzle were calculated and we concluded that at a constant flow of 1[m³/sec] and with an increase in height from 25[m] to 1000[m] the power and speeds increase at the entrance and exit of the bucket while the turbine achieves maximum efficiency starting from a height of 435[m] and above while one nozzle is sufficient for us from a height of 208[m] and above, but if the height is less than that we need a greater number of nozzles.

Keywords: Pelton turbine – power – nozzle – height – flow – EXCEL.

*Engineer with a master's degree - Department of Renewable Energy Technologies, Faculty of Technical Engineering - Tartous University – Syria.

1- مقدمة:

التوربينات المائية هي آلات قوى بسيطة التركيب وسهلة التشغيل، تقوم بتحويل طاقة المياه الساقطة من ارتفاع معين إلى طاقة ميكانيكية تؤدي إلى دوران محور التوربين. ويمكن لهذه العنفات أن تبدأ عملها منذ لحظة دورانها وحتى تحميلها بالحمل الكامل خلال وقت قصير جداً، وهذا ما جعلها كثيرة الاستخدام في محطات التوليد الكهرومائية على اختلاف أنواعها واستطاعاتها [1].

يتألف التوربين المائي بشكل عام من جزأين أساسيين هما: الجزء الثابت ذو الشفرات الثابتة، والجزء المتحرك (الدولاب) ذو الشفرات المتحركة، إذ إن المياه الساقطة من مصادرها المرتفعة عن طريقة قنوات الإيصال إلى الجزء الثابت تتوزع بوساطة شفرات هذا الجزء بشكل منتظم على شفرات الجزء الدائر، والتي تحول طاقة المياه إلى طاقة ميكانيكية على محور دوران التوربين، ليخرج بعد ذلك الماء عن طريقة فتحة التصريف إلى حوض التفريغ [2,3].

تتميز التوربينات المائية بأنها ذات كفاءة عالية وذات عمر طويل، وتوجد هناك تصاميم مختلفة للتوربينات، ولكن يمكن أن تصنف هذه التوربينات عامة إلى نوعين رئيسيين هما [1]:

التوربينات المائية ذات الدفع: تعتمد فكرة التوربينات الدفعية على تحويل طاقة الارتفاع الكامنة إلى طاقة حركية، حيث ينتقل الماء القادم من خزان السد خلال أنابيب ناقلة ويتم توجيهه إلى (الفوهات) (Nozzle) لتحويل طاقة الارتفاع إلى طاقة حركية، ومن ثم يتم توجيه الماء الخارج من (الفوهة) بسرعة عالية إلى ريش التوربين الدفعي ليتم تدوير التوربين، ومن ثم يخرج الماء من التوربين بطاقة حركية منخفضة [2,3]. وتوجد عدة أنواع منها، أهمها توربين بيلتون وتوربين تورغو والتوربين ذو التدفق العرضي.

التوربينات المائية ذات رد الفعل: يقوم الماء في هذه التوربينات بالتأثير على شفرات الجزء الدوار تحت الضغط، وهو يمر حول محيط هذا الجزء، وتكون فتحة خروج الماء فيها أصغر من فتحة دخوله. ولذلك فإن هذه التوربينات تستفيد من ضغط الماء وردود الفعل الناجمة عن تجويفات دولاب الدائر، والتي تسعى لتغيير اتجاه الجريان بهدف تدوير الجزء الدائر. كما أن ممرات الماء في توربينات رد الفعل تكون مغمورة كلياً بالماء [2,3]. ويوجد تصاميم عدة منها توربين فرانسيس وتوربين كابلان.

درس الباحثون (Than Zaw Oo, Nyi Nyi, Cho Cho Khaing) في بحثهم " تصميم حسابي لتوربين بيلتون باستطاعة 220 [kW] " [4] تصميم توربين بيلتون الذي سيولد طاقة خرج [kW] 220 عند ارتفاع 213 [m] ومعدل تدفق $0.135 \text{ [m}^3/\text{sec}]$. وكانت سرعة الدوران 1000 [r.p.m] والسرعة النوعية 18.4 وقطر الدائر 0.56 [m] وقطر النفث 0.053 [m] وقطر مخرج الفوهة 0.064 [m]. كما بلغ عدد الشفرات بناءً على نسبة النفث 21، كما تم تصميم حسابي لأبعاد الشفرة والفوهة.

قام الباحثون (AUNG KYAW MINN, HTAY HTAY WIN, NYEIN AYE SAN) في بحثهم "تصميم توربين بيلتون باستطاعة 225 [kW]" [1] بدراسة تصميم توربين بيلتون عند ارتفاع 213 [m] لتوليد استطاعة خرج 225 [kW] وكان معدل تدفق الماء في هذا التوربين $0.16 \text{ [m}^3/\text{sec}]$ وبلغ قطر الدائر 1.4 [m] كما كان عدد أقطاب المولد 10 أقطاب، وسرعة دوران التوربين 369.4 [r.p.m] في حين كان قطر فوهة التوربين 57 [mm] وعدد الشفرات 27. كما تم حساب أبعاد الفوهة والشفرة.

قام الباحثون (Manjunatha N, Kuldeepak Kumar, Thammaih Gowda) في بحثهم " تصميم توربين بيلتون لمحطة الطاقة الكهرومائية الصغيرة" [5] بتصميم توربين بيلتون بمعدل تدفق منخفض وثابت $0.1 \text{ [m}^3/\text{Sec]}$ وارتفاع متغير من $25-75 \text{ [m]}$ حيث تم حساب جميع بارامترات التصميم وبلغت استطاعة التوربين من 21.75 [kW] حتى 64.25 [kW] ، وقطر الدائر 0.42 [m] ، وكانت السرعة النوعية للتوربين $31.35 - 35.65 \text{ [r.p.m]}$ في حين السرعة الحقيقية الدورانية للتوربين $470 - 770 \text{ [r.p.m]}$ ، بينما عدد الشفرات بلغ 20 بالإضافة لحساب أبعاد الشفرة.

2- مشكلة البحث وأهميته:

تَكْمُن أهمية البحث في الاستفادة من الطاقة المائية المهدورة في السدود والمجاري المائية المتوفرة في توليد الطاقة الكهربائية كمصدر من الطاقات المتجددة. بينما تكمن مشكلة البحث في الاعتماد الكلي على الوقود الاحفوري في انتاج الطاقة الكهربائية والتلوث البيئي الناتج عن احتراقه، وارتفاع صيانة محطات توليد الطاقة وتغير أسعار هذا الوقود.

3- أهداف البحث:

- تصميم نموذج حسابي لتوربين بيلتون اعتماداً على التدفق والارتفاع والاستطاعة.
- دراسة أثر تغيير الارتفاع على أبعاد التوربين وسرعات الدخول والخروج من الشفرة.
- دراسة أثر تغيير الارتفاع على عدد الفوهات المطلوبة.
- دراسة أثر تغيير الارتفاع على النسبة بين قطر التوربين وقطر المنفت وبيان إلى أي مدى تبقى النسبة فعالة لتحقيق أقصى كفاءة.

4- منهجية البحث:

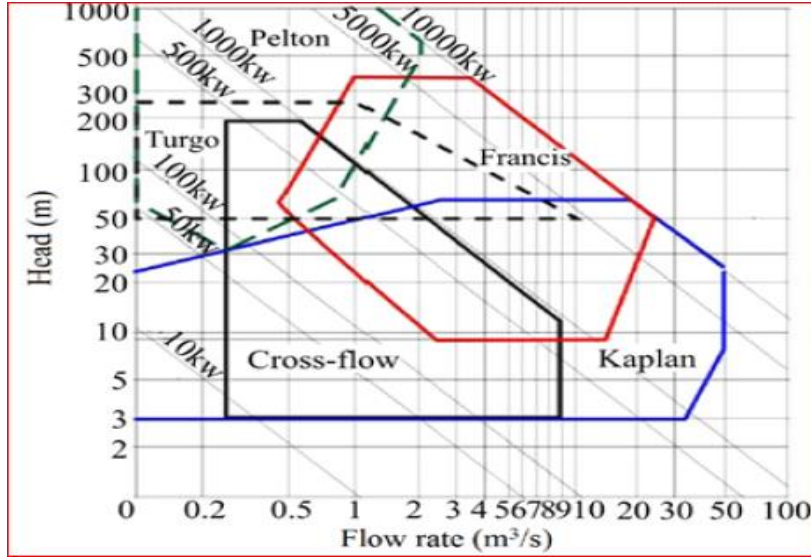
يعتمد البحث على الأسلوب النظري والوصف التحليلي باستخدام المعادلات الحسابية المناسبة ومن ثم إعداد برنامج حسابي باستخدام برنامج EXCEL الذي يساعد في الوصول إلى الهدف المطلوب من البحث.

5- مواد البحث وطرائقه:

1-5- مواد البحث:

1-1-5- البارامترات الأساسية لعمل توربين بيلتون:

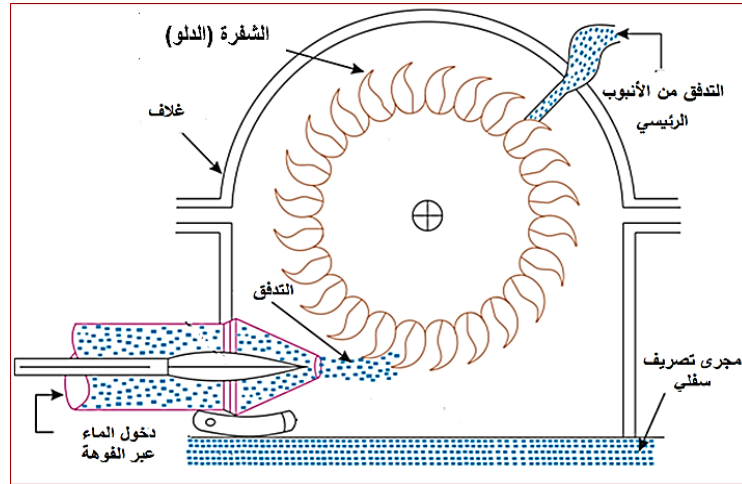
يتم التصميم الحسابي لتوربين بيلتون عند الارتفاعات العالية والتدفقات المنخفضة حيث نجد من الشكل (1) الذي يبين نوع التوربين على أساس معدل التدفق والارتفاع [4] أن توربين بيلتون تعمل من ارتفاع 25 [m] حتى ارتفاع 1000 [m] ويتدفق $2 \text{ [m}^3/\text{sec]}$ أو أقل، لذلك قمنا في هذا البحث بالدراسة عند الارتفاع المائي الضاغط الوسطي $H = 512.5 \text{ [m]}$ والتدفق $Q=1 \text{ [m}^3/\text{s]}$ والكفاءة الإجمالية $\eta_h = 0.9$ وتسارع الجاذبية الأرضية $g=9.81 \text{ [m}^2/\text{s}^2]$ وكثافة الماء $\rho=1000 \text{ [kg/m}^3]$.



الشكل (1): نوع التوربين على أساس معدل الارتفاع والتدفق.

2-1-5- توربين بيلتون:

يتكون توربين بيلتون من أربع أجزاء رئيسية كما هو موضح في الشكل (2)، حيث يوجه الماء عبر فوهة واحدة أو أكثر (حتى 6 فوهات) إلى الدولاب الذي يحتوي على مجموعة من الشفرات (الدلاء) المتوضعة حول محوره، ما يؤدي إلى دورانه [2,3] كما يتميز توربين بيلتون بكفاءة عالية وصغر الحجم بالإضافة إلى أنها ملائمة للارتفاعات العالية والتدفقات المنخفضة، ويمكن تصنيف توربينات بيلتون إلى نوعين أحادي النفاث ومتعدد النفاثات [6].



الشكل (2): أجزاء توربين بيلتون.

يمر تيار الماء ذي السرعة العالية القادم من المنفذ على شفرات التوربين بشكل متوالي من دفعات قصيرة ويلاحظ من هذه الشفرات والتي تشبه الدلو إنها مشطورة إلى نصفين متناظرين بواسطة حافة حادة تشطر الماء إلى نصفين متساويين حيث يتدفق الماء على السطح الداخلي الأملس للريشة ليعود بزواوية مقدارها θ والفائدة من شطر تيار المياه إلى نصفين هي التخلص من قوى الدفع الجانبي على محور التوربين، يكون هذا التوربين غير مغمور بالمياه ويدور بصورة رئيسية في الهواء تحت الضغط الجوي الاعتيادي، ويحاط الجزء الدوار بغطاء من الخارج للمحافظة عليه من الأضرار الجانبية ولمنع تطاير المياه بعيداً عن الريش، ولغرض إيقاف التوربين يتم غلق المنافذ

وتوجيه تيار من الماء على الجهة الخلفية للشفرة بواسطة منفث الإيقاف لغرض تقليل السرعة الدورانية للتوربين ومن ثم إيقافه بصورة نهائية [8].

2-5- طرائق البحث:

1-2-5- حساب الاستطاعة الممكن إنتاجها وعدد دورات التوربين النوعية والحقيقية:

1- الاستطاعة الممكن إنتاجها (P) وتعطى من خلال المعادلة التالية: [7]

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta_h \quad [W] \quad (1)$$

حيث أن:

ρ : كثافة الماء [kg/m³].

g: تسارع الجاذبية الأرضية. [m²/s].

Q: التدفق [m³/sec].

H: الارتفاع المائي الضاغط [m].

η_h : الكفاءة الاجمالية.

2- سرعة الدوران النوعية N_s (عدد دورات التوربين النوعية): [4]

هي معامل تشابه عديم الوحدات يستخدم في تصنيف واختيار نوع التوربين المناسب ويدخل في

حساب سرعة التوربين الحقيقية وكلما انخفضت قيمتها زادت ملائمة توربين بيلتون.

$$N_s = \frac{85.49}{H^{0.245}} [r.p.m] \quad (2)$$

حيث أن:

H: الارتفاع المائي الضاغط [m].

3- سرعة الدوران الحقيقية N (عدد دورات التوربين الحقيقية) هي السرعة التي يدور بها

التوربين فعلياً أثناء التشغيل وتقاس بالدورة في الدقيقة وتعطى بالعلاقة: [4]

$$N = N_s \times \frac{H^{1.25}}{\sqrt{P}} [r.p.m] \quad (3)$$

حيث أن:

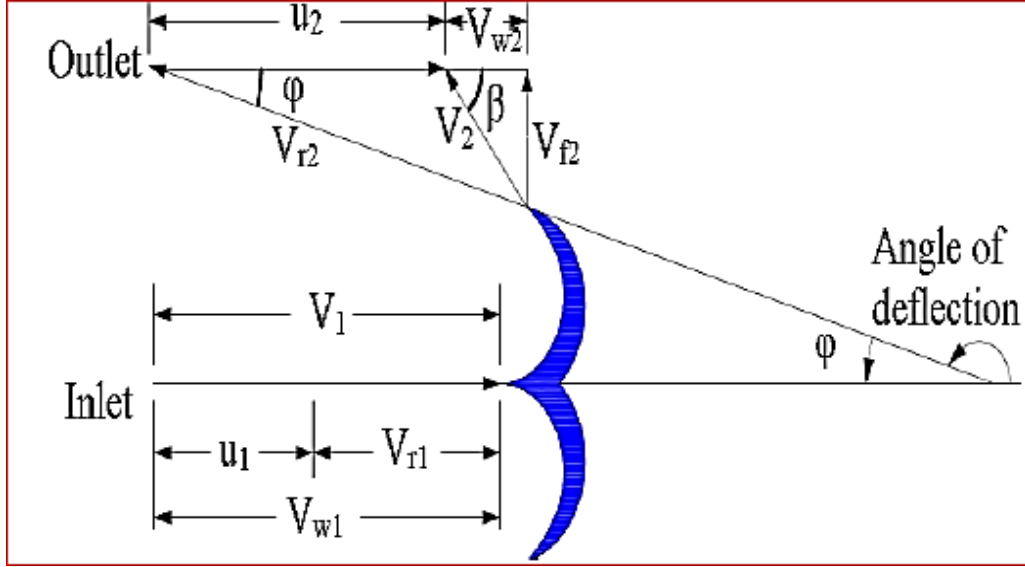
P: الاستطاعة الممكن إنتاجها [kW]

H: الارتفاع المائي الضاغط [m]

N_s : السرعة النوعية [r.p.m]

2-5- حساب سرعات الدخول والخروج لتوربين بيلتون وقطره:

يوضح الشكل (3) مثلثات السرعة لتوربين بيلتون عند الدخول والخروج. [7,8]



الشكل (3): مثلثات السرعة لتوربين بيلتون عند الدخول والخروج.

حيث أن:

V_1 : السرعة المطلقة للماء الداخل إلى الشفرة.

V_2 : السرعة المطلقة للماء الخارج من الشفرة.

V_{r1} : السرعة النسبية للماء الداخل إلى الشفرة.

V_{r2} : السرعة النسبية للماء الخارج من الشفرة.

V_{w1} : سرعة الجريان عند الدخول.

V_{w2} : سرعة الجريان عند المخرج.

U_1 : السرعة المماسية للشفرة عند الدخول.

U_2 : السرعة المماسية للشفرة عند الخروج.

V_{f2} : سرعة التدفق عند الخروج.

β : الزاوية التي تصنعها السرعة المطلقة مع اتجاه حركة الشفرة وتقدر 66° .

ϕ : الزاوية التي تصنعها السرعة النسبية مع اتجاه حركة الشفرة وتقدر 15° .

يتم حساب سرعات الدخول والخروج اعتماداً على المعادلات التالية:

١- سرعة التدفق الحقيقية (V_1) وتعطى بالعلاقة التالية: [4,7]

$$V_1 = C_v \sqrt{2 \times g \times H} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

حيث أن: C_v : معامل السرعة المسؤول عن خسائر الاحتكاك في الفوهة وتتراوح قيمته من 0.97 إلى 0.99

[4]. وفي هذا البحث سنعتمد القيمة المتوسطة 0.985.

٢- السرعة المماسية للشفرة:

السرعة المماسية للشفرة عند الدخول والخروج من توربين بيلتون تكون متساوية $U_1 = U_2$ وتعطى

بالعلاقة: [4,8]

$$U = U_1 = U_2 = 0.46 \times \sqrt{2 \times g \times H} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5)$$

٣- السرعة النسبية للماء:

تعطى السرعة النسبية للماء الداخل إلى الشفرة (V_{r1}) بالعلاقة: [1,4]

$$V_{r1} = V_1 -$$

$$U_1 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

كما تحسب السرعة النسبية للمياه عند المخرج (V_{r2}) بالعلاقة:

$$V_{r2} = K \times$$

$$V_{r1} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (7)$$

حيث أن: K: معامل احتكاك الشفرة (ويمكن اعتباره واحد) وهو أقل من الواحد بقليل ويمكن اعتباره 0.9999، وعندما تكون أسطح الشفرة ناعمة تماماً يكون فقدان الطاقة بسبب الاحتكاك مهمل وتكون قيمته واحد فتكون V_{r2} هي V_{r1} .

٤- سرعة الجريان: [7]

سرعة الجريان (دوران الماء) عند الدخول (V_{w1}) تعطى بالعلاقة:

$$V_{w1} =$$

$$V_1 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8)$$

سرعة الجريان (دوران الماء) عند المخرج (V_{w2}) تحسب من المعادلة:

$$V_{w2} = V_{r1} \times \cos\Phi -$$

$$U_2 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (9)$$

٥- السرعة المطلقة للماء الخارج من الشفرة (V_2) وتعطى بالعلاقة:

$$\cos\beta = \frac{V_{w2}}{V_2} \Rightarrow V_2$$

$$= \frac{V_{w2}}{\cos\beta} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

٦- سرعة تدفق الماء عند الخرج (V_{f2}) تعطى بالعلاقة:

$$\sin\Phi = \frac{V_{f2}}{V_{r2}} \Rightarrow V_{f2} = V_{r2} \times$$

$$\sin\Phi \left[\frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

حيث Φ : الزاوية التي تصنعها السرعة النسبية مع اتجاه حركة الشفرة وتبلغ 15° [7]

٧- قطر التوربين (D) ويعطى بالعلاقة: [1,4]

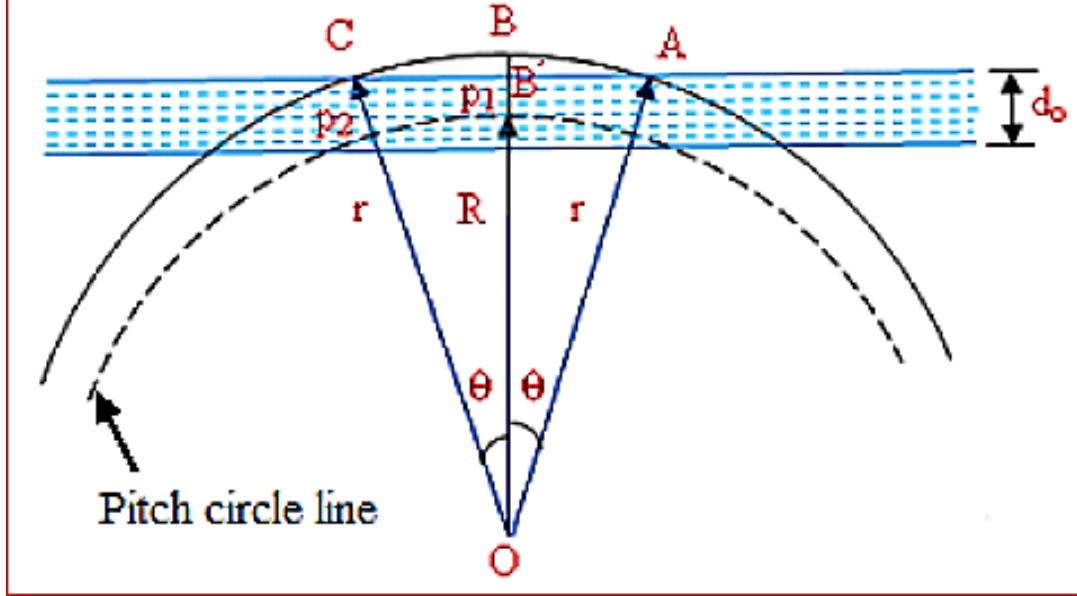
$$D =$$

$$\frac{60 \times U}{\pi \times N} [m] \quad (12)$$

3-2-5- الحساب التصميمي للشفرة (الدلو) (BUCKET):

يتم حساب عدد الشفرات اللازمة وأبعاد كل شفرة اعتماداً على علاقات تجريبية [4] ويوضح الشكل

(4) انحناء الشفرة.



الشكل (4): انحناء الشفرة.

١- عدد الشفرات (Z) يعطى من العلاقة التجريبية التالية: [1,4]

$$Z = 0.5 \times m + 15 \quad (13)$$

حيث m هو النسبة بين قطر الدائر وقطر المنفت ويجب أن تكون بين 11 و 15 لتحقيق أقصى كفاءة

وتعطى بالعلاقة: [1,4].

$$m = \frac{D}{d_0} \quad (14)$$

حيث أن: d_0 قطر المنفت ويعطى بالعلاقة: [1,4]

$$d_0 = 0.545 \times \sqrt{\frac{Q}{Z_0 \times \sqrt{H_n}}} \quad [m] \quad (15)$$

حيث Z_0 عدد الفوهات (تتم أي دراسة عند فوهة واحدة).

٢- الزاوية بين كل شفرتين متتاليتين من مركز الدائر (θ) تعطي بالعلاقة: [1,4]

$$\theta = \frac{360}{Z} \quad (16)$$

٣- خطوة الشفرة (P_1P_2) وتعطى بالعلاقة: [1]

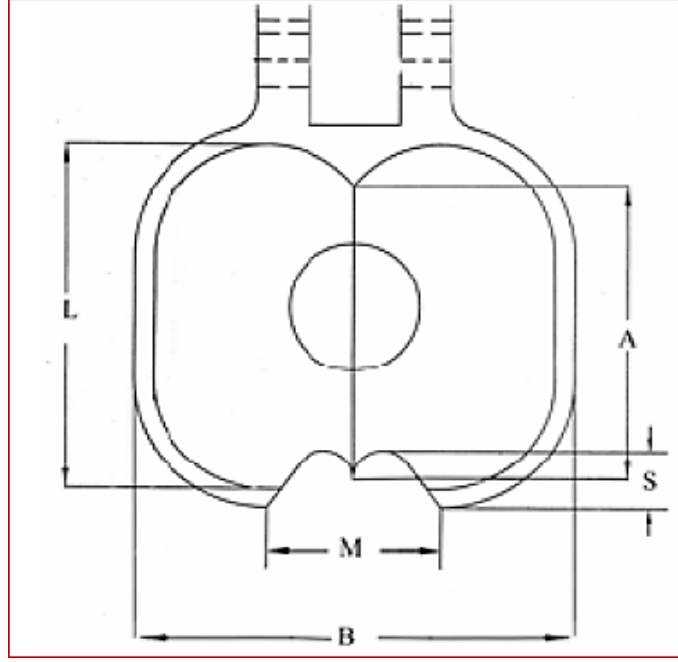
$$P_1P_2 = \frac{2 \times \pi \times R}{Z} \quad (17)$$

حيث R: نصف قطر التوربين.

٤- أبعاد الشفرة:

يتم حساب الأبعاد الرئيسية للشفرة الموضحة في الشكل (5) من خلال العلاقات التجريبية في الجدول (1)

[4].



الشكل (5): الأبعاد الرئيسية للشفرة.

الجدول (1): الأبعاد الرئيسية للشفرة.

البارامتر	أدنى قيمة	أعلى قيمة	القيمة الوسطية
طول الشفرة [m]	$L = 2.28 \times d_0$	$L = 3.3 \times d_0$	$L = 2.79 \times d_0$
عرض الشفرة [m]	$B = 2.8 \times d_0$	$B = 4 \times d_0$	$B = 3.4 \times d_0$
عمق الشق [m]	$S = 0.44 \times d_0$	$S = 0.625 \times d_0$	$S = 0.6325 \times d_0$
عرض الشق [m]	$M = 1.12 \times d_0$	$M = 1.6 \times d_0$	$M = 1.36 \times d_0$
عمق الشفرة [m]	$E = 0.8 \times d_0$	$E = 1.2 \times d_0$	$E = 1 \times d_0$
ارتفاع الشفرة [m]	$A = 1.75 \times d_0$	$A = 2.5 \times d_0$	$A = 2.275 \times d_0$

4-2-5- الحساب التصميمي للفوهة (NOZZLE):

١- عدد الفوهات المطلوبة (Z_0):

يتم تحديد عدد الفوهات المطلوبة اعتماداً على النسبة D/B بحيث يجب أن تكون دائماً أكبر من (2.7). إذا لم يكن الأمر كذلك، فيجب إجراء حسابات جديدة بعدد أكبر من الفوهات [9]:

$$\frac{D}{B} > 2.7 \quad (18)$$

وبالتالي تكفي فوهة واحدة.

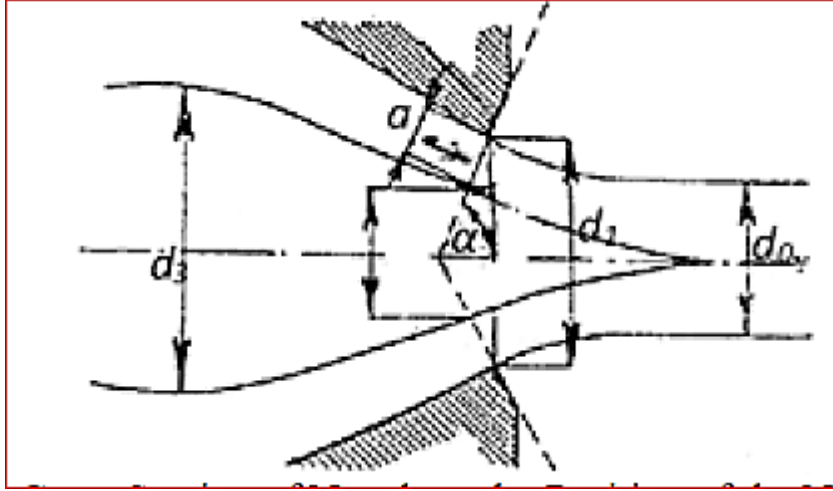
٢- قطر مخرج الفوهة (d_1) يحسب من المعادلة التالية: [4]

$$d_1 = \sqrt{\frac{Q \times \sin 80}{2.66 \times \mu \times C_v \times \sqrt{H}}} \quad [m] \quad (19)$$

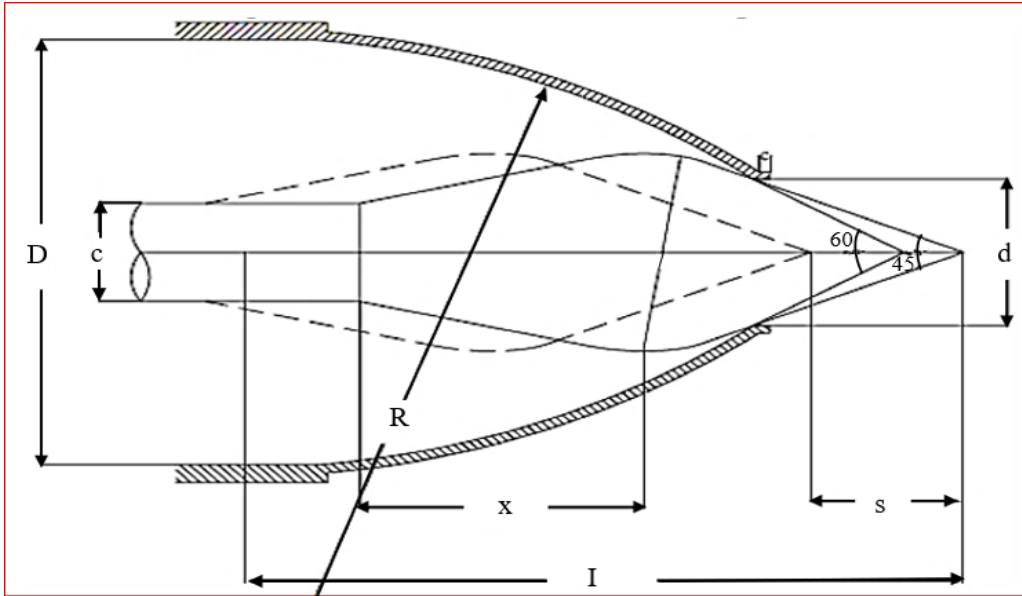
μ : معامل التدفق ويتراوح بين 0.8 و 0.88 وسنقوم بأخذ القيمة الوسطية 0.84.

٣- حساب الأبعاد الرئيسية للفوهة: [1]

يوضح الشكل (6) المقطع العرضي للفوهة في حين الشكل (7) يوضح الأبعاد الرئيسية للفوهة.



الشكل (6): المقطع العرضي للفوهة.



الشكل (7): الأبعاد الرئيسية للفوهة.

يتم حساب الأبعاد الرئيسية للفوهة اعتماداً على قطر النفث، وتحسب من العلاقات التجريبية الموضحة في

الجدول (2): [1]

الجدول (2): الأبعاد الرئيسية للفوهة اعتماداً على قطر النفث.

القيمة	البارامتر
$C = 0.45 \times d_0$	C: المسافة من الابرة إلى الفوهة
$S = 1.35 \times d_0$	S: موقع نصف قطر طرف الإبرة
$X = 0.503 \times d_0$	X: موقع نصف قطر فتحة الفوهة
$d = 0.45 \times d_0$	d: قطر الرمح
$I = 3.17 \times d_0$	I: طول طرف الإبرة
$r = 0.705 \times d_0$	r: منحنى نصف قطر طرف الإبرة

$R = 2.2 \times d_0$	R: منحنى نصف قطر فتحة الفوهة
$h = 0.6 \times d_0$	h: ارتفاع طرف الإبرة

5-2-5- الحساب التصميمي لفطر عمود التوربين والقوى المؤثرة:

١- قطر عمود التوربين (d_s):

ينقل عمود التوربين الحركة الدوارة من التوربين إلى المولد وفي معظم الحالات، يكون للعمود مقطع عرضي دائري ويخضع إما للالتواء أو الالتواء والانحناء ويتم تحديد قطر عمود التوربين (d_s) المطلوب من المعادلة التالية: [1,4]

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{1.77 \times 10^6 \times P}{N}} [m] \quad (20)$$

وبما أنه من الصعب التنبؤ بلحظة الانحناء فيتم عادة زيادة قطر العمود المقدر قليلاً.

٢- القوة النفاثة (التي يؤثر بها تدفق الماء في اتجاه حركته) على التوربين (F) تعطى بالعلاقة: [1,7].

$$F = p \times a \times V_1 (V_{W1} + V_{W2}) [N] \quad (21)$$

حيث أن: a: مساحة المنفذ [m^2]

٣- العمل الذي يبذله النفاث على التوربين (WD) تحسب من العلاقة:

$$WD = F \times U [kW] \quad (22)$$

٤- القوة النفاثة على الشفرة (P_0) تعطى بالعلاقة:

$$P_0 = p \times a \times V_1 \left(\frac{(V_1 - U)^2}{V_1} \right) (1 - \cos \alpha) [N] \quad (23)$$

٥- قوة الطرد المركزي المؤثرة على الشفرة (CF) تعطى بالعلاقة:

$$CF = F - P_0 = \frac{(GU)^2}{g \times R} [N] \quad (24)$$

6-2-6- اجراء الحسابات باستخدام برنامج EXCEL:

تم إعداد برنامج حاسوبي باستخدام برنامج EXCEL يمكننا من خلاله انجاز الحسابات السابقة بعد إدخال البارامترات المطلوبة للحسابات المذكورة في المعادلات الموضحة سابقاً.

6- النتائج والمناقشة:

1-6- نتائج البرنامج الحاسوبي باستخدام EXCEL:

1-1-6- حساب الاستطاعة وعدد دورات التوربين النوعية والحقيقية:

يوضح الجدول (3) نتائج حساب الاستطاعة وعدد دورات التوربين النوعية والحقيقية.

الجدول (3) نتائج حساب الاستطاعة وعدد دورات التوربين النوعية والحقيقية.

P [kW]	Ns [r.p.m]	N [r.p.m]
4524.863	18.537	671.978

يتضح من الجدول (3) أن الاستطاعة الممكن إنتاجها عند تدفق $1 [m^3/s]$ وارتفاع $512.5 [m]$ هي $4524.863 [kW]$ ويكون عدد دورات التوربين الحقيقية $671.978 [r.p.m]$ وعدد دوراتها النوعية 18.537 .

2-1-6- حساب سرعات الدخول والخروج من الشفرة لتوربين بيلتون وقطره:

يوضح الجدول (4) نتائج حساب سرعات الدخول والخروج من الشفرة لتوربين بيلتون وقطره.

الجدول (4) نتائج حساب سرعات الدخول والخروج لتوربين بيلتون وقطره.

V1 [m/s]	U1 [m/s]	U2 [m/s]	Vr1 [m/s]
98.772	46.127	46.127	52.645
Vr2 [m/s]	Vw1 [m/s]	Vw2 [m/s]	V2 [m/s]
52.640	98.772	4.724	11.615
Vf2 [m/s]	D [m]		
13.624	1.312		

نلاحظ من خلال الجدول (3) أن السرعة المطلقة للماء تتناقص من 98.772 [m/sec] عند مدخل الشفرة إلى 11.615 [m/sec] عند مخرج الشفرة بينما تكون السرعة النسبية للماء الداخل والخارج من التوربين تقريبا ثابتة وتبلغ 52.645 [m/sec] في حين سرعة الجريان عند الدخول تبلغ 98.772 [m/sec] وعند الخروج تنخفض لتصل إلى 4.724 [m/sec] أما السرعة المماسية للشفرة عند الدخول والخروج تبقى ثابتة 46.127 [m/sec] وسرعة التدفق عند الخروج تبلغ 13.624 [m/sec] وبلغ قطر التوربين 1.312 [m] .

3-1-6- الحساب التصميمي للشفرة وأبعادها الرئيسية:

يوضح الجدول (5) نتائج الحساب التصميمي للشفرة (BUCKET).

الجدول (5) نتائج الحساب التصميمي للشفرة (BUCKET).

do [m]	m	Z [BUCKET]
0.115	11.451	21
θ [°]	P1P2 [mm]	
17.143	196.124	

نلاحظ من خلال الجدول (5) أن عدد الشفرات المطلوبة [BUCKET] 21 وكانت النسبة بين قطر الدائر وقطر المنفت 11.451 وهي بين القيمتين 11 و 15 وبالتالي تحقق أقصى كفاءة بينما نجد أن قطر المنفت يساوي 0.115 [m] والزاوية بين كل شفتين متتاليتين من مركز الدائر 17.143° وخطوة الشفرة 196.124 [mm] .

يوضح الجدول (6) نتائج الأبعاد الرئيسية للشفرة.

الجدول (6) نتائج الأبعاد الرئيسية للشفرة.

القيمة الوسطية	أعلى قيمة	أدنى قيمة	
0.320	0.378	0.261	L [m]
0.389	0.458	0.321	B [m]
0.061	0.072	0.050	S [m]
0.156	0.183	0.128	M [m]
0.115	0.137	0.092	E [m]
0.243	0.286	0.200	A [m]

4-1-6- الحساب التصميمي للفوهة وأبعادها الرئيسية:

يوضح الجدول (7) نتائج الحساب التصميمي للفوهة (NOZZLE).

الجدول (7) نتائج الحساب التصميمي للفوهة (NOZZLE).

D/B	d1 [m]
3.368	0.054

نجد من الجدول (7) أن النسبة D/B تبلغ 3.368 وهي أكبر من القيمة 2.7 وبالتالي تكفي فوهة واحدة ويكون قطر مخرج الفوهة 0.054[m].

يوضح الجدول (8) نتائج الأبعاد الرئيسية للفوهة.

الجدول (8) نتائج الأبعاد الرئيسية للفوهة.

القيمة	البارامتر
0.052	C [m]
0.155	S [m]
0.058	X [m]
0.052	d [m]
0.363	I [m]
0.081	r [m]
0.252	R [m]
0.069	h [m]

5-1-6- الحساب التصميمي لقطر عمود التوربين والقوى المؤثرة:

يوضح الجدول (9) نتائج الحساب التصميمي لقطر عمود التوربين والقوى المؤثرة.

الجدول (9) نتائج الحساب التصميمي لقطر عمود التوربين والقوى المؤثرة.

ds [mm]	F [N]	WD [kW]
228.424	105286.154	4856.524
PO [N]	CF [N]	
23588.058	81698.095	

نلاحظ من الجدول (9) أن قطر عمود التوربين 228.424[mm] والقوة النفاثة على التوربين 105286.154[N] وبلغ العمل الذي يبذله النفاث على التوربين 4856.524[kW] والقوة النفاثة على الشفرة 23588.058[N] وكانت قوة الطرد المركزي المؤثرة على الشفرة 81698.095[N].

6-1-6- أثر تغير الارتفاع على البارامترات الأساسية لتوربين بيلتون:

يوضح الجدول (10) نتائج أثر تغير الارتفاع على أبعاد التوربين.

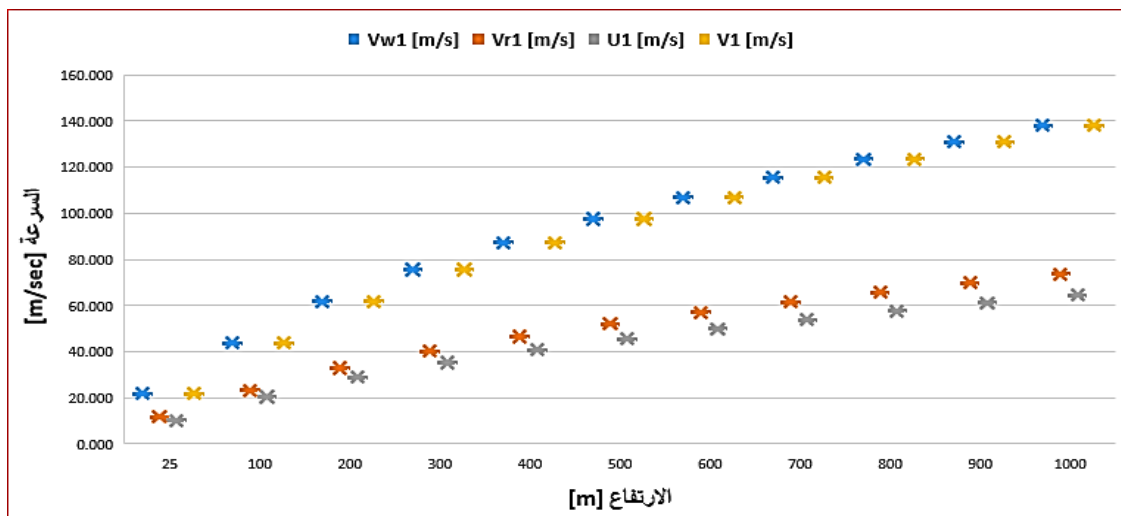
الجدول (10) نتائج أثر تغير الارتفاع على أبعاد التوربين.

ds [mm]	d1 [m]	Z [BUCKET]	do [m]	D [m]	N [r.p.m]	Ns	الارتفاع [m]
138.772	0.116	18.000	0.244	1.332	146.191	38.853	25
174.438	0.082	19.000	0.172	1.322	294.415	27.664	100
195.574	0.069	20.000	0.145	1.318	417.811	23.343	200
209.106	0.062	21.000	0.131	1.315	512.750	21.136	300
219.271	0.058	21.000	0.122	1.313	592.925	19.697	400
227.495	0.055	21.000	0.115	1.312	663.650	18.650	500
234.443	0.052	21.000	0.110	1.311	727.656	17.835	600
240.482	0.050	22.000	0.106	1.310	786.564	17.174	700
245.839	0.049	22.000	0.102	1.309	841.434	16.621	800
250.664	0.047	22.000	0.100	1.308	893.001	16.148	900
255.060	0.046	22.000	0.097	1.307	941.802	15.737	1000

نلاحظ من الجدول (10) أن بزيادة الارتفاع من 25[m] إلى 1000[m] وتدفق ثابت $1 \text{ m}^3/\text{s}$ تتناقص السرعة النوعية من 38,853 إلى 15.737 بينما السرعة الحقيقية تتزايد من 146.191[r.p.m] إلى 941.802[r.p.m] ويكون قطر التوربين شبه ثابت ويبلغ حوالي 1.31[m] بينما ينقص قطر المنفت من 0.244[m] إلى 0.097[m] أما قطر مخرج الفوهة ينقص من 0.116[m] إلى 0.046[m] وقطر عمود التوربين يزداد من 138.772[m] إلى 255.060[m] ويكون عدد الشفرات (الدلاء) بين 18 حتى 22.

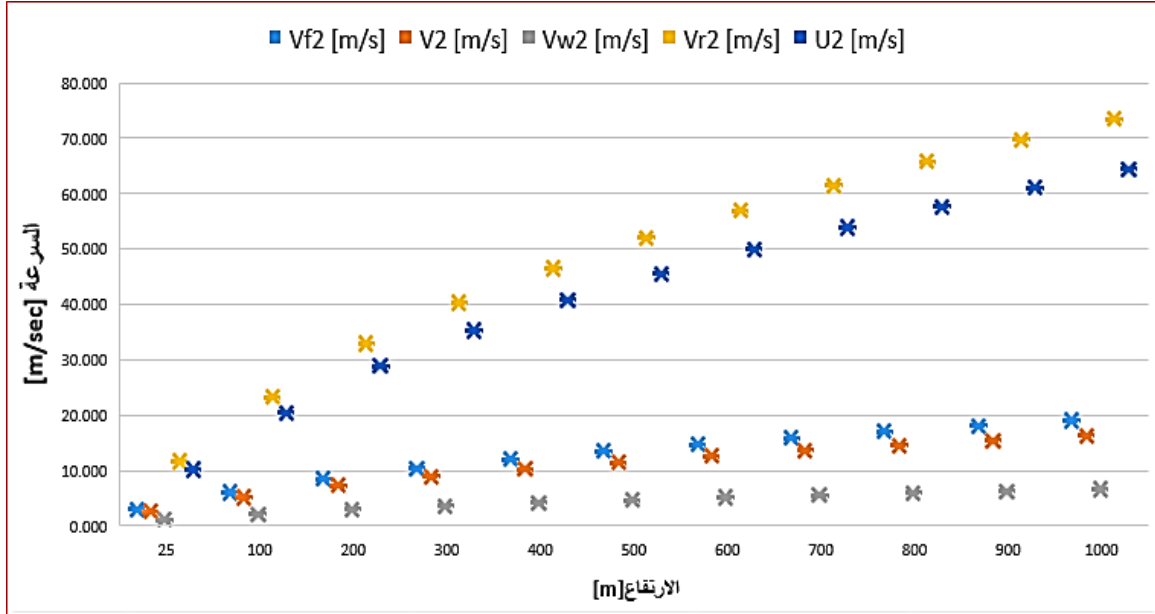
يوضح الشكل (8) و (9) نتائج أثر تغير الارتفاع على سرعات الدخول والخروج من الشفرة لتوربين

بيلتون.



الشكل (8) نتائج أثر تغير الارتفاع على سرعات الدخول إلى الشفرة لتوربين بيلتون.

نلاحظ من الشكل (8) أنه عند تدفق ثابت $1[m^3/s]$ وبزيادة الارتفاع من $25[m]$ حتى $1000[m]$ تتزايد جميع السرعات عند الدخول إلى الشفرة حيث تتزايد السرعة المطلقة للماء الداخل إلى الشفرة من $11.627[m/s]$ إلى $21.815[m/s]$ و $137.970[m/s]$ و السرعة النسبية للماء الداخل إلى الشفرة من $11.627[m/s]$ إلى $73.537[m/s]$ وسرعة الجريان عند الدخول من $21.815[m/s]$ إلى $137.970[m/s]$ و السرعة المماسية للشفرة عند الدخول من $10.188[m/s]$ إلى $64.433[m/s]$.



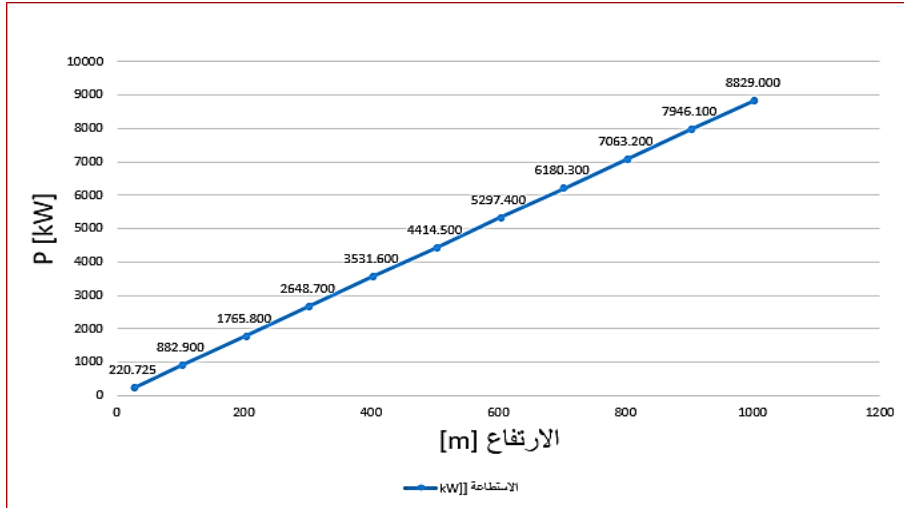
الشكل (9) نتائج أثر تغير الارتفاع على سرعات الخروج من الشفرة لتوربين بيلتون.

نلاحظ من الشكل (9) أنه بزيادة الارتفاع من $25[m]$ حتى $1000[m]$ عند تدفق ثابت $1[m^3/s]$ تتزايد جميع السرعات عند الخروج من الشفرة حيث تتزايد السرعة المطلقة للماء الخارج من الشفرة من $11.626[m/s]$ إلى $2.565[m/s]$ و $16.244[m/s]$ و السرعة النسبية للماء الخارج من الشفرة من $11.626[m/s]$ إلى $73.530[m/s]$ وسرعة الجريان عند الخروج من $1.043[m/s]$ إلى $64.433[m/s]$ و السرعة المماسية للشفرة عند الخروج من $10.188[m/s]$ إلى $64.433[m/s]$ وسرعة التدفق عند الخروج من $3.009[m/s]$ إلى $19.031[m/s]$.

7-1-6- أثر تغير الارتفاع على الاستطاعة وعلى عدد الفوهات المطلوبة وعلى النسبة بين قطر

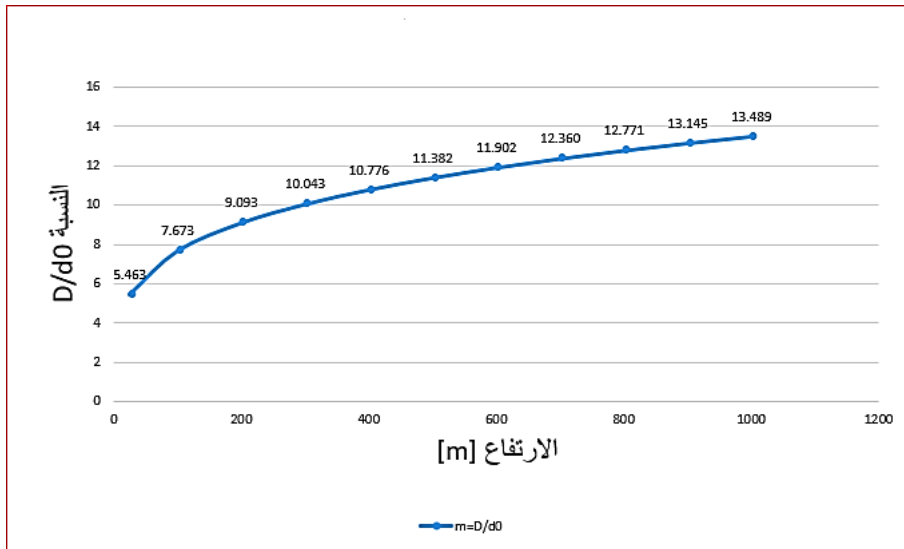
الدائر وقطر المنفت:

يوضح الشكل (10) و (11) و (12) نتائج أثر تغير الارتفاع على الاستطاعة وعلى عدد الفوهات المطلوبة وعلى النسبة بين قطر الدائر وقطر المنفت وبيان إلى أي مدى تبقى النسبة فعالة لتحقيق أقصى كفاءة.



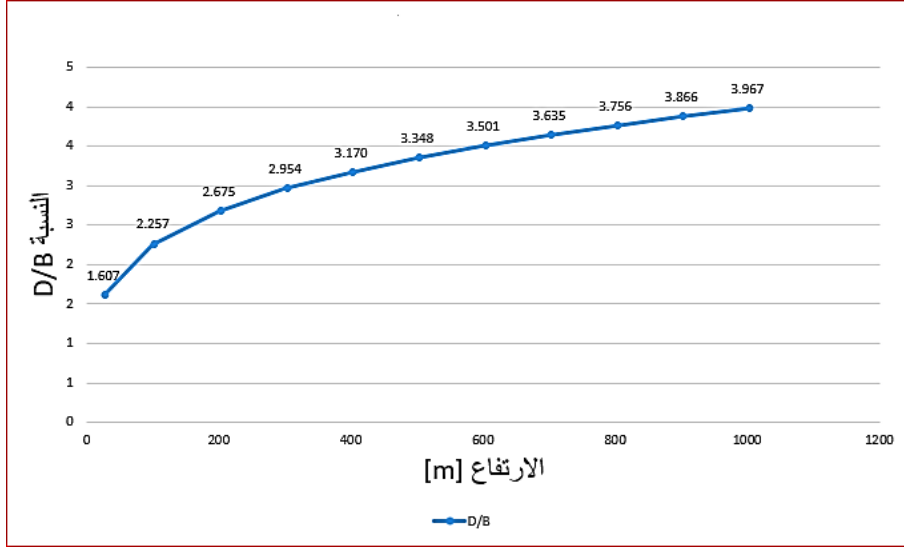
الشكل (10) نتائج أثر تغير الارتفاع على الاستطاعة.

نُلاحظ من الشكل (10) أنه بزيادة الارتفاع من 25[m] حتى 1000[m] عند تدفق ثابت $1\text{ m}^3/\text{s}$ تزايدت الاستطاعة من 220.725[kW] إلى 8829[kW] وبذلك نجد أن بزيادة الارتفاع ستزداد كمية الطاقة الممكن إنتاجها.



الشكل (11) نتائج أثر تغير الارتفاع على النسبة D/d0.

نُلاحظ من الشكل (11) أنه بزيادة الارتفاع من 25[m] حتى 1000[m] عند تدفق ثابت $1\text{ m}^3/\text{s}$ تزداد النسبة بين قطر الدائر وقطر المنفت من 5.463 إلى 13.489 ويجب أن تكون بين 11 و 15 لتحقيق أقصى كفاءة ونستنتج من خلال ذلك أنه يفضل استخدام توربين بيلتون عند الارتفاعات الأعلى من 435[m] لأنها تحقق أقصى كفاءة.



الشكل (12) نتائج أثر تغير الارتفاع على النسبة D/B.

نلاحظ من الشكل (12) أنه بزيادة الارتفاع من 25[m] حتى 1000[m] عند تدفق ثابت $1\text{ m}^3/\text{s}$ تزداد النسبة بين قطر التوربين وعرض الشفرة من 1.607 حتى 3.967 ومن خلال الشكل نجد أن من الارتفاع 208[m] وما فوق تكفي فوهة واحدة لأن النسبة تكون أكبر من 2.7 بينما عند ارتفاعات أقل من 208[m] تكون النسبة أقل من 2.7 وبالتالي نحتاج إلى عدد أكبر من الفوهات.

7- الاستنتاجات والتوصيات:

1-7- الاستنتاجات:

- 1- الاستطاعة الممكن إنتاجها عند تدفق $1\text{ m}^3/\text{s}$ وارتفاع 512.5 [m] هي 4524.863 [kW]، وبلغ قطر التوربين المطلوب 1.312 [m]، وكان عدد الفوهات المطلوب فوهة واحدة قطر مخرجها 0.054 [m]، بينما كان عدد الشفرات [BUCKET] 21، كما بلغ قطر المنفت 0.115[m].
- 2- تزداد الاستطاعة وسرعات الدخول والخروج من الشفرة بزيادة الارتفاع.
- 3- تكون النسبة D/do بين 11 وحتى 15 عند تدفق ثابت $1\text{ m}^3/\text{sec}$ وبدءاً من الارتفاع 435[m] وما فوق، وبالتالي يحقق التوربين أقصى كفاءة بينما عندما يكون الارتفاع أقل من 435[m] لا يحقق التوربين ذلك.
- 4- تكون النسبة D/B أعلى من 2.7 عند تدفق ثابت $1\text{ m}^3/\text{sec}$ وبدءاً من الارتفاع 208[m] وما فوق، وبالتالي تكفي فوهة واحدة أما عندما يكون الارتفاع أقل من 208[m] نحتاج إلى عدد أكبر من الفوهات.
- 5- نستطيع من خلال البرنامج المنجز في هذا البحث إعادة الحسابات الموجودة عند أي قيم أخرى بشكل سريع.

2-7- التوصيات:

- 1- استخدام البرامج الحاسوبية المناسبة من أجل رسم التوربين ومحاكاته حاسوبياً.
- 2- دراسة تأثير نوع المادة المستخدمة على مردود التوربين.

8- المراجع:

- 1- MINN,A;WIN,H;SAN,N. 2014, *Design of 225kW Pelton Turbine*. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, Italy, 4836-4842.
- 2- *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, ESHA 2004.
- 3- Hydraulic Turbines, Prof. Q.H. Nagpurwala.
- 4- ZawOo,T;Nyi,N;Khaing,C. 2019, *Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW*. International Journal of Scientific and Research Publications, Italy, 218-224
- 5- Manjunatha,N;KUMAR,K;GOWDA,T. 2016, *DESIGN OF A PELTON WHEEL TURBINE FOR A MICRO HYDRO POWER PLANT*. International Journal of Innovative Research in Science and Engineering, Italy, 155-162.
- 6- RANE,H,S; THORE,S,B; THAKARE,V,R; PAWAR,H,U. 2025, *PERFORMANCE OF PELTON TURBINE UNDER VARIOUS SPEEDS AND HEADS*. Mazedan International Journal on Engineering Systems Design MTESD ISSN, India, 180-182.
- 7- MON,E;KHAING,C;LYNN,A. 2019, *Design, construction and performance Testing of 1kW Pelton Turbine for pico Hydro power plant*. International Journal of Science Engineering Applications, Italy, 192-196.
- 8- NEMA,A;DPCOE;ANANTHARAM. 2014, *Design and Analysis of Pelton Turbine for Organic Rankine Cycle application*. International Engineering Research Journal, Italy, 514-519.
- 9- NASIR,B,A.2013, *Design of Micro-Hydro-Electric Power Station*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Iraq, Vol.2, 39-47.