

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

هيا قرقجيه^{1*} سليمان الأعوج²

^{1*} طالبة ماجستير، مهندسة، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

haya2.karakjiah@damascusuniversity.edu.sy

² مدرس، دكتور، مهندسة، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق

s.aawaj@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يُعد موضوع ترشيد استهلاك الطاقة أحد العوامل الأساسية عند تصميم عديد من الأنظمة الهندسية كأنظمة ضخ المياه التي تتميز باستهلاك كبير للطاقة.

يهدف هذا البحث لإجراء دراسة تحليلية لاستخدام المضخات متغيرة السرعة Variable Speed Pumps (VSPs) في محطات ضخ المياه بوصفها أحد الاستراتيجيات الممكنة لترشيد استهلاك الطاقة وتخفيض التكاليف التشغيلية للضخ، تعتمد المنهجية المتبعة في البحث على تكوين أنماط تشغيلية للتحكم في أداء محطة ضخ مياه في ريف دمشق لضخ كمية المياه المتوفرة بأقل استهلاك طاقي ممكن مع مراعاة الشروط الهيدروليكية للشبكة، إذ تم تقديم مناقشة ومقارنة بين أنماط تشغيلية مختلفة (حالات عند العمل عند السرعة الاسمية، وحالات عند تخفيض السرعة)، وتبين أنه يمكن تحقيق توفير بنسبة تعادل نحو 18% في الطاقة المستهلكة والتكاليف التشغيلية عند عمل المحطة بحالة استخدام مضخات متغيرة السرعة، يوصي البحث بتعميم استخدام أجهزة تغيير سرعة الدوران لمحركات المضخات لما لها من أثر إيجابي في إدارة نظم الضخ في شبكات المياه وترشيد استهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: محطات ضخ المياه، أداء المضخات النابذة، أجهزة تغيير السرعة، طاقة الضخ.

تاريخ الإيداع: 2023/4/3

تاريخ القبول: 2024/4/2



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب CC BY-

NC-SA

Studying the Performance of Water Pumping Stations with Changing Speed of Pumps

Haya Karakjiah^{*1} Sulaiman Al Aawaj²

^{*1}. Master student, Eng, General Mechanical Engineering Department, Mechanical and Electrical Engineering College, Damascus University.
haya2.karakjiah@damascusuniversity.edu.sy

². Teacher, General Mechanical Engineering Department, Mechanical and Electrical Engineering College, Damascus University. s.aawaj@damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

The issue of the energy consumption rationalization is a key factor in the design of many engineering systems, such as water pumping systems, which are characterized by significant energy consumption. This research aims to conduct an analytical study of the use of variable Speed Pumps (VSPs) in water pumping stations as one of the possible strategies for rationalizing energy consumption and reducing the operational costs of pumping. The methodology used in the research is based on the formation of operational patterns to control the performance of a water pumping station in Damascus countryside to pump the available amount of water with the lowest possible energy consumption, taking into account the hydraulic conditions of the network, where a discussion and comparison of different operating patterns were presented (Cases when working at nominal speed and cases when reducing speed). It was found that savings of about 18% in energy consumed and operational costs could be achieved when the station was operating in the case of variable speed pumps. The research recommends generalizing the use of Variable Speed Drives (VSDs) for pump motors because of their positive impact on the management of pumping systems in water networks and the rationalization of energy consumption.

Keywords: Water Pumping Stations, Performance of Centrifugal Pumps, Variable Speed Drives (VSDs), Pumping Power

Received: 3/4/2023
Accepted: 2/4/2024



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

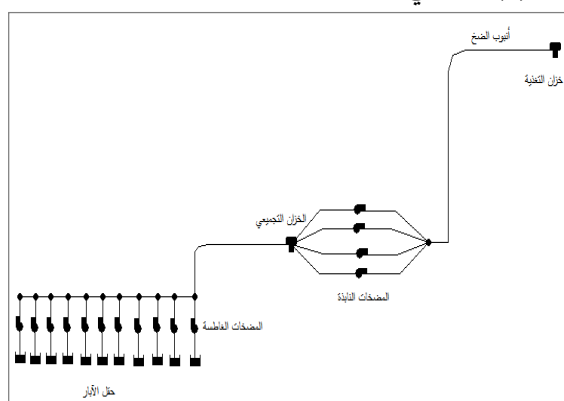
المقدمة:

أنها يمكن أن تجعل التدفق والضغوط قريباً من الحد الأصغري المطلوب في الشبكة وبالتالي استهلاك قليل للطاقة.

الحالة المدروسة:

الحالة المدروسة في البحث هي محطة ضخ المياه في منطقة تل كردي في ريف دمشق التي تعد كأحد المصادر المغذية لمدينة عدرا الصناعية.

حيث يتكون النظام الهيدروليكي للمحطة المدروسة الموضح في الشكل (1) مما يلي:



الشكل (1) رسم تخطيطي للنظام الهيدروليكي المدروس

1. حقل آبار يضم 11 بئر في محيط المحطة (كل بئر له مضخة غاطسة).

2. خزان تجميعي بيتوني في المحطة بسعة $2000m^3$.



الشكل (2) خطوط الضخ من المضخات الغاطسة والخزان التجميعي في المحطة المدروسة

يُعد استهلاك الطاقة العامل الأهم في تشغيل محطات ضخ المياه، حيث تُمثل الكهرباء التي تستهلكها محطات الضخ حوالي 20% من إجمالي الكهرباء المطلوبة في العالم، وهناك ما يقرب من 95% من استهلاك الطاقة في شبكات المياه مرتبط بتكاليف طاقة الضخ، و 90% من التكلفة الإجمالية لدورة المضخات مرتبطة بالتكاليف التشغيلية (Christian et al., 2021). الأمر الذي يحفز الباحثين على تطوير استراتيجيات للتوفير من الطاقة المستهلكة في محطات ضخ المياه، ويعدّ استخدام المضخات متغيرة السرعة (VSPs) Variable Speed Pumps أحد التدابير الممكن اتخاذها لتحقيق تلك الغاية، حيث تطرقت بعض الأبحاث الحديثة لعمل المضخات متغيرة السرعة بهدف تغيير نقطة تشغيل المضخة لتتناسب مع معدل الضخ اعتماداً على خصائص الشبكة، ويمكن أن يؤدي هذا النهج إلى توفير كبير في التكاليف التشغيلية، كما تناول الباحثون تأثير كفاءة جهاز تعديل السرعة (VSD) على استطاعة المضخة متغيرة السرعة والتوفير في الطاقة الذي يمكن الحصول عليه من خلال إدخال مضخات متغيرة السرعة في أنظمة توزيع المياه (Marchi et al., 2012)، وناقش آخرون العدد الإجمالي الأنسب للمضخات الثابتة السرعة Constant Speed Pumps (CSPs) والمتغيرة السرعة في تشغيل محطة الضخ وتحديد نمط الضخ الأمثل لتأمين الاحتياج المائي المطلوب في الشبكة (Christian et al., 2019)، كما قارن آخرون بين الطريقة الكلاسيكية للضخ وهي تسلسل التشغيل / الإيقاف (on/off) لمضخات السرعة الثابتة، وطريقة استخدام تغيير سرعة المضخات (Cimorelli et al., 2020)، فقد بينت كل الدراسات أن استخدام هذا النوع من المضخات سيسهل من إدارة نظم الضخ في شبكات المياه، وسيساهم في تخفيض الطاقة المستهلكة للضخ، حيث تتميز هذه المضخات

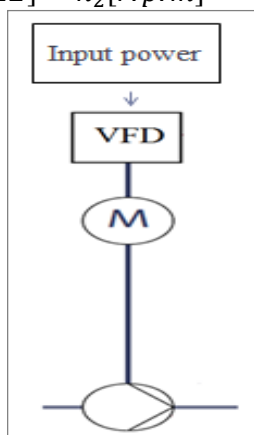
لتغيير سرعة المحركات عموماً يوجد طريقتين: إما تغيير عدد الأقطاب أو تغيير تردد التغذية الكهربائية الواردة للمحرك حسب العلاقة:

$$n = 120 f / P \dots \dots (1)$$

حيث: f التردد، P عدد الأقطاب

أجهزة تعديل سرعة الدوران Adjustable Speed Drives (ASDs) ويطلق عليها أيضاً أجهزة تعديل التردد Variable Frequency Drives (VFDs) هي أجهزة كهربائية تُستخدم للتحكم بسرعة الدوران لمحرك التيار المتردد AC عن طريق ضبط تردد الطاقة الكهربائية الواردة للمحرك حيث أن العلاقة التي تربط بين تغير التردد وسرعة المحرك:

$$\frac{f_1 [HZ]}{f_2 [HZ]} = \frac{n_1 [r.p.m]}{n_2 [r.p.m]} \dots \dots (2)$$



الشكل (4) مبدأ تعديل سرعة المضخات

3. صالة المضخات: تحوي أربع مضخات نابذة متماثلة ثلاثة عاملة وواحدة احتياط، كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل (3) صالة المضخات في المحطة المدروسة

الجدول (1) المواصفات الاسمية للمضخات النابذة في المحطة

111.2	الاستطاعة [kw]
1490	السرعة الاسمية [rpm]
79.7	الكفاءة %
Nominal : 500	التدفق m^3/h
Max : 886.1	
Min : 186.4	
65:Nominal	الضاغط m
37.1:at Q_{max}	
69.8 :at Q_{min}	
At $Q=0$ (H=70 m)	

4. جهاز تعديل سرعة الدوران لكل مضخة من المضخات النابذة في المحطة.

تصميم نظم الضخ لتلبية المتطلبات القصوى للشبكة ومع ذلك، نادراً ما تعمل محطة الضخ في هذه الظروف، وبالتالي فإن نظام التحكم المناسب يسمح بتكييف عمل محطة الضخ مع ظروف التشغيل المتغيرة، فنحن بحاجة لإدارة عمل المضخات بشكل يوصلنا لأنماط تشغيل أمثلية للتخفيف من استهلاك الوقود والطاقة الكهربائية مع مراعاة القيود (الشروط) الهيدروليكية للشبكة وتحقيق متطلبات المستهلكين (ضغط، تصريف)، والحفاظ على مناسب الماء داخل خزانات التجميع ضمن الحدود المقبولة.

تعتمد المنهجية المتبعة في البحث على تكوين أنماط تشغيلية لعمل المضخات في محطة الضخ المدروسة وذلك بربط المضخات النابذة المتماثلة على التفرع، والتحكم بعوامل التشغيل التالية:

1. عدد المضخات العاملة.
2. السرعة الدورانية للمضخات العاملة.
3. مدة التشغيل.

وذلك بعد تثبيت العاملين التاليين:

1. خصائص الشبكة (المنحني المميز للشبكة).
2. كمية المياه المستجرة من المصدر (والتي تعتبر عامل ثابت خلال فترة الدراسة).

وذلك بهدف الوصول إلى نمط التشغيل الأمثل لعمل المضخات، لضخ كمية المياه المستجرة من الآبار في المحطة والتي تتراوح يومياً بين $6500 - 7000 \text{ m}^3/\text{d}$.

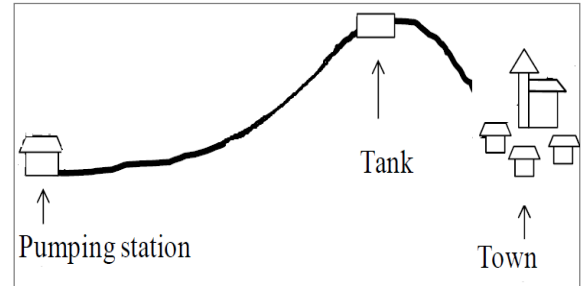
يمكن توضيح اصطلاح نمط تشغيل بالرسم البياني في الشكل (7) الذي يمثل ربط مضختين نابذتين متماثلتين على التفرع وتشغيل المضخة الأولى عند عدد دورات يوافق $n = 95\%$ (حيث عدد الدورات الاسمية ويعادل 1490 r.p.m) وتشغيل المضخة الثانية عند عدد دورات يوافق $n = 85\%$ ، حيث تمثل النقطة A على الشكل (7b) نقطة عمل المضختين على الشبكة، ويتم إيجاد بارامتراتهما (تدفق، ضاغط) من خلال الحل المشترك لمعادلة منحنى الشبكة مع معادلة المنحني المميز



الشكل (5) جهاز تعديل السرعة المستخدم في المحطة المدروسة

5. أنبوب الضخ: يربط بين المضخات النابذة في المحطة وخزان التغذية في منطقة الجبل في مدينة عدرا الصناعية من نوع البولي إيثيلين بطول 17km تقريباً وقطر 630mm
6. خزان التغذية: في منطقة الجبل بمدينة عدرا الصناعية.

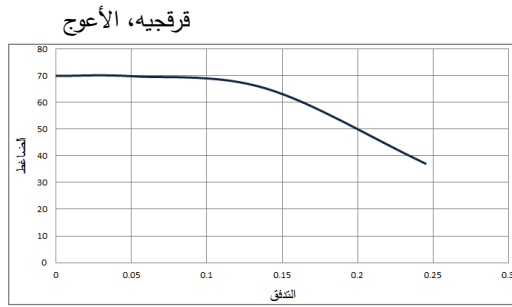
أي يعتمد نظام توزيع المياه في الحالة المدروسة على التغذية بالجاذبية حيث تتدفق المياه في خط أنابيب التوزيع بسبب الجاذبية ويتم تغذية المدينة بسبب الضغط الناتج عن الفارق الستاتيكي بين منسوب الخزان في الجبل ومنسوب المدينة.



الشكل (6) نظام توزيع المياه في الحالة المدروسة

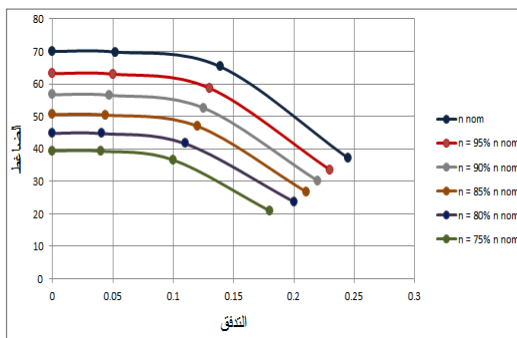
المنهجية Research Methodology:

إن عملية إدارة تشغيل شبكات المياه، وعملها المتغير موسمياً، يعتبر موضوع مهم جداً عند تصميم منظومات ضخ المياه، فمهما كان التخطيط أمثل، فإن أداء هذه الشبكة وتصميمها سيكون منخفضاً ما لم يتم إدارتها بشكل أمثل، لأن عادة ما يتم



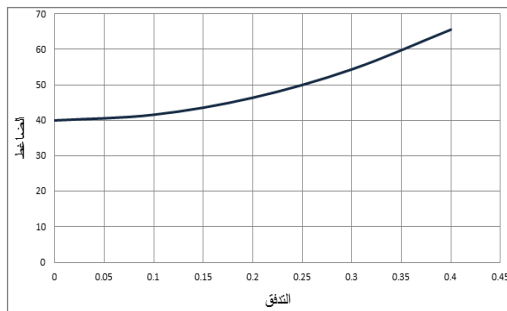
الشكل (8) المنحني المميز للمضخة عند السرعة الاسمية

2. رسم المنحنيات المميزة للمضخات العاملة عند أعداد دورات متغيرة، بتطبيق قوانين التشابه على النقاط الواردة في الجدول (1).



الشكل (9) المنحني المميز للمضخة عند أعداد دورات متغيرة

3. رسم المنحني المميز للشبكة المتمثلة بأنبوب الضخ بين المضخات النابذة في المحطة وخزان التغذية في الجبل (من معطيات تم الحصول عليها من المحطة).

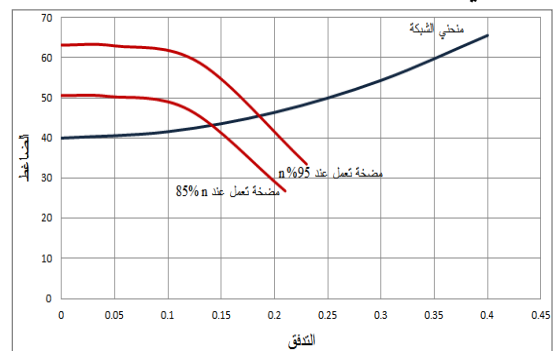


الشكل (10) المنحني المميز للشبكة

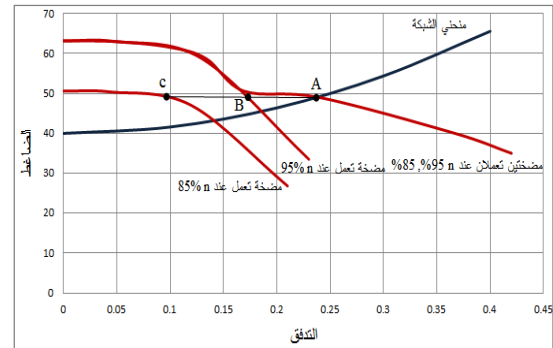
4. رسم أنماط لتشغيل المحطة وفق تكوينات ضخ مقترحة.
5. حساب بارامترات نقاط التشغيل (نقاط التقاطع) من خلال الحل المشترك لمعادلة منحني الشبكة ومعادلة منحني تكوين الضخ.

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

لتكوين الضخ (منحني عمل المضختين معاً)، والنقطة B هي النقطة التي تعمل عندها المضخة الاولى والنقطة C هي النقطة التي تعمل عندها المضخة الثانية، ويتم حساب بارامترات نقاط التشغيل (B,C) من خلال تعويض قيمة ضاغط النقطة A في معادلة المنحني المميز لكل من المضختين، ويتم تحديد مدة التشغيل اللازمة للنمط بعد حساب التصريف الساعي للمضخات العاملة، ثم يتم تطبيق المعادلات الرياضية اللازمة لحساب الطاقة المستهلكة لعمل المضختين وبالتالي الطاقة المستهلكة في هذا النمط.



الشكل (7a) نمط تشغيل (بدون منحني المضختين)



الشكل (7b) نمط تشغيل (مع منحني المضختين)

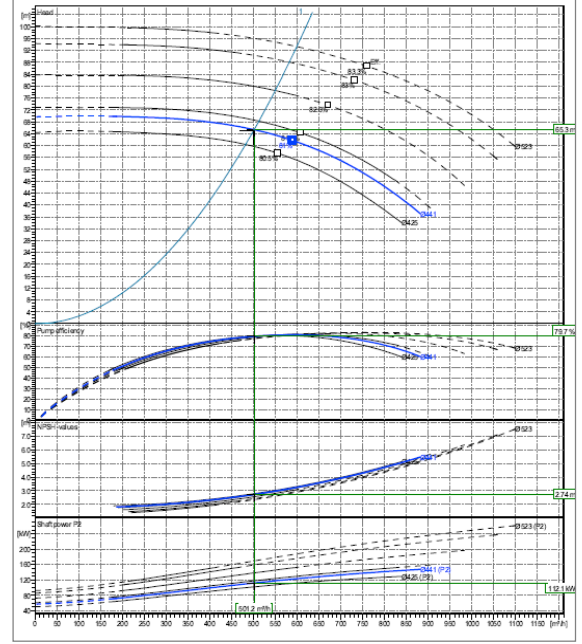
الدراسة الفنية Technical Study:

تم دراسة الأنماط التشغيلية الواردة في الجدول (12) المقترحة لعمل المضخات في المحطة باستخدام برنامج Excel تبعاً للخطوات التالية:

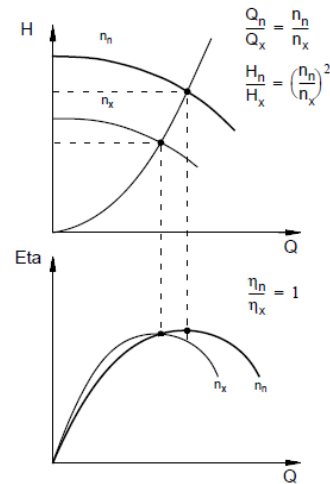
1. رسم المنحني المميز للمضخات عند السرعة الاسمية، باستخدام البيانات في الجدول (1) والمأخوذة من كتالوج المضخة.

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

6. إيجاد الكفاءة الهيدروليكية لنقاط التشغيل من الكتالوج عند عمل المضخة عند السرعة الاسمية الشكل (11)، وحسابها من قوانين التشابه بالنسبة للمضخات العاملة عند سرعة غير السرعة الاسمية من خلال إيجاد النقطة المكافئة التي لها نفس الكفاءة على المنحني المميز للمضخة عند السرعة الاسمية يمكن توضيح ذلك في الشكل (12).



الشكل (11) منحنى الأداء الهيدروليكي للمضخة المستخدمة في المحطة (من الكتالوج)



الشكل (12) المنحنيات المعبرة عن قوانين التشابه

قرقبيه، الأعوج

7. تحديد مدة التشغيل اللازمة لكل نمط بعد حساب التصريف الساعي للمضخات العاملة فيه.
8. حساب الطاقة المستهلكة لعمل المضخات لضخ كمية المياه المستجرة من الآبار في المحطة.
9. المفاضلة بين أنماط التشغيل المقترحة وإيجاد النمط الأمثل الذي يحقق الشروط الهيدروليكية للشبكة المدروسة بأقل استهلاك ممكن للطاقة.

الحسابات الرياضية :Mathematical Calculation

الاستطاعة الهيدروليكية التي تقدمها المضخة للماء $[W]$ ، (أبو حامد وآخرون، 2014):

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \dots\dots (3)$$

حيث:

ρ : كثافة الماء $[kg/m^3]$.

g : تسارع الجاذبية الأرضية $[m/s^2]$.

Q : الغزارة $[m^3/s]$.

H : الضاغط $[m]$.

الاستطاعة اللازمة لعمل المضخة:

$$P_2 = P_1/\eta \dots\dots (4)$$

حيث:

η : الكفاءة الكلية للضخ.

الكفاءة الكلية للضخ (Zyubin et al., 2020):

$$\eta = \eta_P \cdot \eta_m \cdot \eta_V \dots\dots (5)$$

حيث:

η_P : الكفاءة الهيدروليكية للمضخة.

η_m : كفاءة المحرك.

η_V : كفاءة جهاز تعديل السرعة.

يمكن اعتبار كفاءة المحرك ثابتة ضمن تخفيض مجاله 33%

(Marchi et al., 2012,17) حيث أن العلاقة التي تربط بين

تغير كفاءة المحرك وتغير عدد الدورات:

$$\eta_{m2} = 1 - (1 - \eta_{m1}) \cdot (n_1/n_2)^{0.1} \dots\dots (6)$$

حيث:

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

η_{m1} : كفاءة المحرك عند السرعة n_1 .

η_{m2} : كفاءة المحرك عند السرعة n_2 .

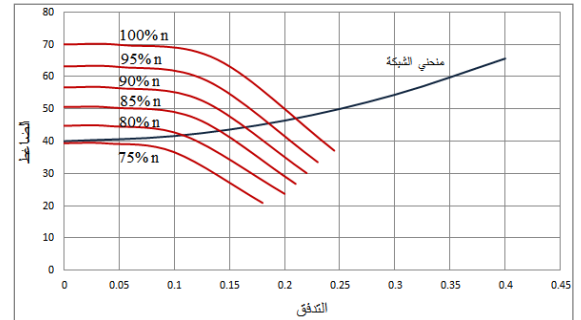
تتغير كفاءة جهاز تعديل السرعة بحسب تغير الحمل على المحرك وذلك بحسب الجدول (2) الموجود في ورقة بحثية تم نشرها من قبل قسم الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2012، نلاحظ أنه بحسب الحالة المدروسة لدينا (استطاعة المحرك تعادل 175 hp) يمكن اعتبار كفاءة الجهاز ثابتة ضمن تخفيض مجاله 25%.

الجدول (2) تغير كفاءة أجهزة تعديل السرعة حسب تغير الحمل

Variable Drive hp Rating	Efficiency (%)						
	Load, Percent of Drive Rated Power Output						
	1.6	12.5	25	42	50	75	100
5	35	80	88	91	92	94	95
10	41	83	90	93	94	95	96
20	47	86	93	94	95	96	97
30	50	88	93	95	95	96	97
50	46	86	92	95	95	96	97
60	51	87	92	95	95	96	97
75	47	86	93	95	96	97	97
100	55	89	94	95	96	97	97
200	61	81	95	96	96	97	97

المناقشة Discussion:

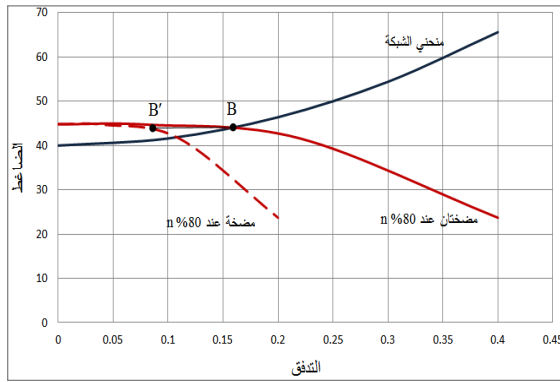
1. إن مجال السرعات المتاح لتشغيل المضخات محدد بالمجال $[80\%n - 100\%n]$ حيث n السرعة الاسمية للمضخة، لأن الحد الأقل من n 80% لا يؤمن الضاغط الستاتيكي المطلوب في الشبكة كما هو موضح بالشكل (13):



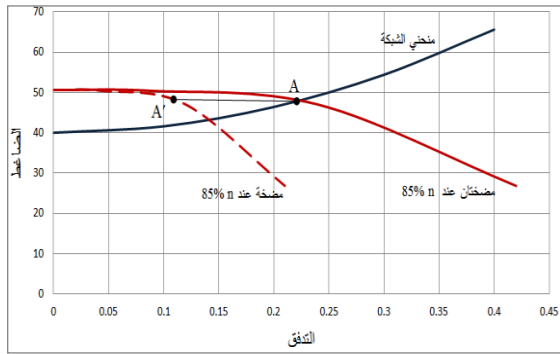
الشكل (13) مجال السرعات المسموح به للعمل

قرقبيه، الأعوج

2. بالرغم من أن بارامترات النقطة B' نقطة تشغيل كل من المضختين اللتين تعملان عند n 80% ($Q=0.08m^3/s$) من المضختين اللتين تعملان عند n 85% ($Q=0.11m^3/s$)، $H = 44$ m، أقل من بارامترات النقطة A' نقطة تشغيل كل من المضختين اللتين تعملان عند n 85% ($Q=0.11m^3/s$)، إلا أن $H=47.5$ m) عند n 80% أكبر، وذلك بسبب انخفاض كفاءة عمل المضخات إلى حوالي 73% عند تخفيض سرعتها إلى n 80%، ويمكن توضيح ذلك في الشكل (14) وفي النمطين (8،9) في الجدول (12).



الشكل (14a) المنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع تعملان عند 80% من السرعة الاسمية، B نقطة تشغيل المضختين معاً، B' نقطة تشغيل كل مضخة على حدا.



الشكل (14b) المنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع تعملان عند 85% من السرعة الاسمية، A نقطة تشغيل المضختين معاً، A' نقطة تشغيل كل مضخة على حدا.

قرقبيه، الأعوج

الاستطاعة المستهلكة اللازمة لتشغيل كل مضخة:

$$P_2 = P_1 / \eta$$

$$= 80 / 0.797 = 100.4 \text{ kw}$$

عدد الساعات اللازمة للتشغيل:

$$7000 / 1080 = 6.4 \text{ hours}$$

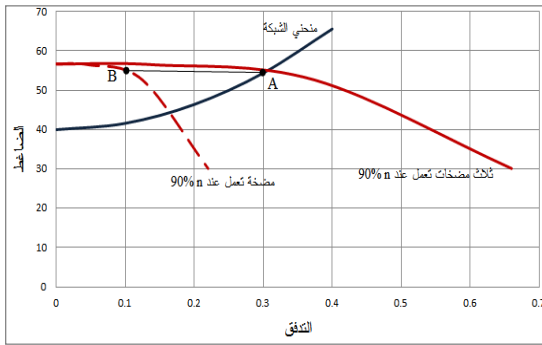
التصريف المائي خلال اليوم:

$$1080 \times 6.4 = 6912 \text{ m}^3 / \text{d}$$

استهلاك الطاقة خلال اليوم لمجموعة الضخ:

$$= 2 \times 100.4 \times 6.4 = 1285.12 \text{ kwh}$$

• النمط الثاني: تشغيل ثلاث مضخات عند 90%:



الشكل (16) المنحني المميز لثلاث مضخات متماثلات موصولة على

التفرع تعمل عند 90% من السرعة الاسمية

الجدول (5) بارامترات نقطة التشغيل (A)

H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
54.4	1080	0.3

الجدول (6) بارامترات نقطة عمل كل من المضخات الثلاث B

η [%]	H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
78	54.4	360	0.1

الاستطاعة الهيدروليكية التي تقدمها كل المضخة:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

$$1000 \times 9.81 \times 0.1 \times 54.4 = 53366.4 \text{ w}$$

$$= 53.4 \text{ kw}$$

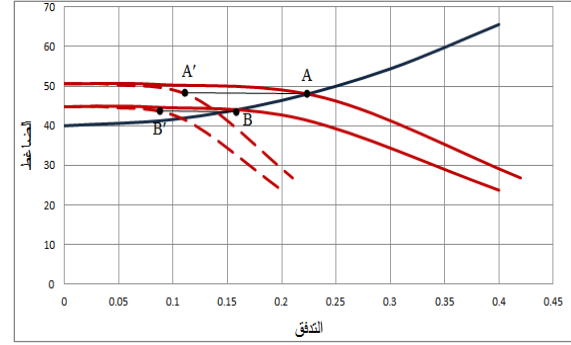
الاستطاعة المستهلكة اللازمة لتشغيل كل المضخة:

$$P_2 = P_1 / \eta$$

$$= 53.4 / 0.78 = 68.5 \text{ kw}$$

عدد الساعات اللازمة للعمل:

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات



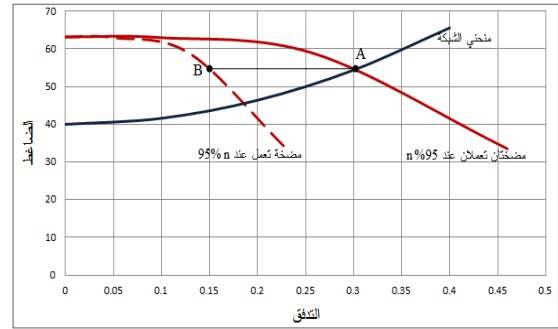
الشكل (14) المنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع

تعملان عند 80%, 85% من السرعة الاسمية.

3. يمكن ضخ كمية مياه بمعدل $6912 \text{ m}^3 / \text{d}$ عند عدد

ساعات تشغيل 6.4 hours بنمطي تشغيل:

• النمط الأول: تشغيل مضختين عند 95%:



الشكل (15) المنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع

تعملان عند 95% من السرعة الاسمية

الجدول (3) بارامترات نقطة التشغيل (A)

H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
54.4	1080	0.3

الجدول (4) بارامترات نقطة عمل كل من المضختين (B)

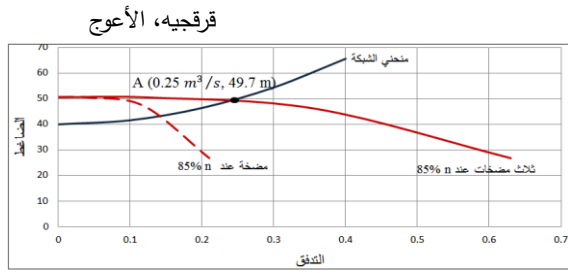
η [%]	H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
79.7	54.4	540	0.15

الاستطاعة الهيدروليكية التي تقدمها كل مضخة:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

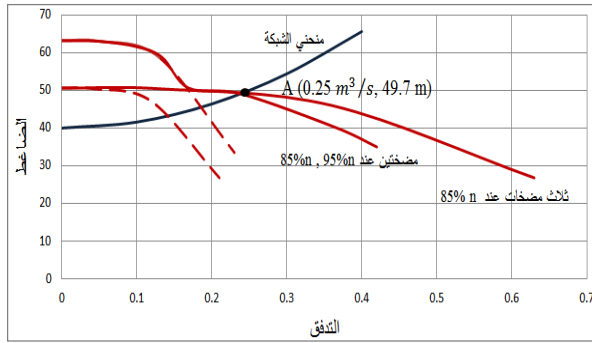
$$1000 \times 9.81 \times 0.15 \times 54.4 = 80049.6 \text{ w}$$

$$= 80 \text{ kw}$$



الشكل (19) المنحني المميز لثلاث مضخات متماثلة موصولة على التفرع تعمل عند 85% من السرعة الاسمية، نقطة تشغيل المضخات الثلاث معاً.

إلا أن استهلاك الطاقة في النمط الأول يكون أقل بمقدار 76.23 kwh، ويمكن توضيح النمطين في الشكل (20)، وفي النمطين (7،16) من الجدول (12).



الشكل (20) المنحني المميز لثلاث مضخات متماثلة موصولة على التفرع تعمل عند 85%n، والمنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع تعملان عند 85%n، 95%n، نقطة التشغيل المشتركة للنمطين.

وهذا مؤشر يدل على أن أسلوب التشغيل المناسب للمضخات لكل منظومة ضخ لا يمكن تحديده مسبقاً ولكنه يتطلب دراسة متعمقة للخيارات المختلفة المتاحة، لذا من الضروري إجراء الحسابات الهيدروليكية اللازمة لإدارة عمل المضخات وإيجاد أسلوب التشغيل الأمثل الموافق لمتطلبات شبكة معينة بأقل استهلاك للطاقة.

4. تبين وفق الظروف التشغيلية للحالة المدروسة في البحث أن أفضل الأنماط التشغيلية (الاستهلاك الطاقوي الأصغري) هو تشغيل مضختين عند 85% من السرعة الاسمية، لكن يترتب على استخدام هذا النمط مدة زمنية متزايدة إلا أنه يمكن اعتبارها مقبولة بناءً على عاملين:

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

$$7000/1080 = 6.4 \text{ hours}$$

التصريف المائي خلال اليوم:

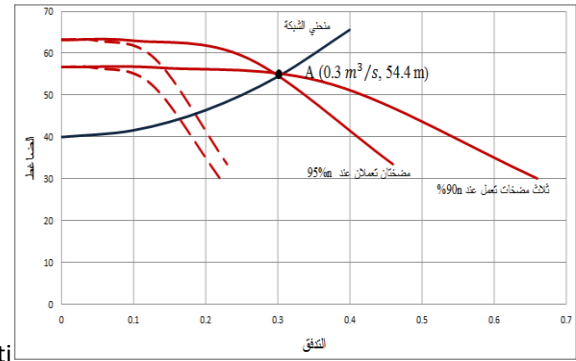
$$1080 \times 6.4 = 6912 \text{ m}^3 / d$$

استهلاك الطاقة خلال اليوم لمجموعة الضخ:

$$= 3 \times 68.5 \times 6.4 = 1315.2 \text{ kwh}$$

نلاحظ أن استهلاك الطاقة في النمط الأول يكون أقل بمقدار

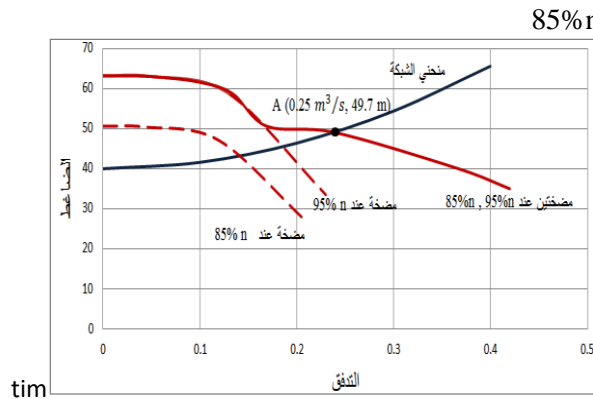
30.08 kw ويمكن توضيح النمطين في الشكل (17)



الشكل (17) المنحني المميز لثلاث مضخات متماثلة موصولة على التفرع تعمل عند 90% من السرعة الاسمية والمنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع تعملان عند 95% من السرعة الاسمية، نقطة التشغيل للحالتين.

وأيضاً يمكن ضخ كمية مياه بمعدل $6930 \text{ m}^3/d$ عند عدد ساعات تشغيل 7.7 hours (نقطة التشغيل A) بنمطي تشغيل:

- النمط الأول: تشغيل مضختين عند السرعة (95%n، 85%n)



الشكل (18) المنحني المميز لمضختين متماثلتين موصولتين على التفرع تعملان عند 85%، 95% من السرعة الاسمية، نقطة تشغيل المضختين معاً

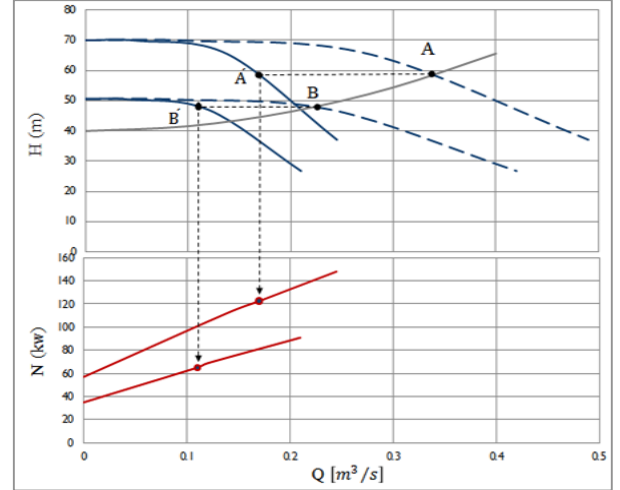
- النمط الثاني: تشغيل ثلاث مضخات عند 85% n

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

العامل الأول: إن نظام امداد المستهلكين بالمياه هو نظام متقطع يعتمد على التخزين وليس نظام امداد مستمر وعليه يمكن الضخ لتعبئة خزان تغذية المستهلكين خارج الاوقات المحددة لإمداد المياه في المنطقة وبالتالي لا يؤثر تخفيض السرعة وزيادة المدة الزمنية اللازمة للضخ على جودة الضخ. العامل الثاني: تخفيض سرعة عمل المضخات وما ترافق من زيادة المدة الزمنية اللازمة لضخ كمية المياه المستجرة من الابار (التي تعتبر عامل ثابت خلال فترة الدراسة 7000 متر مكعب في اليوم) أدى لتخفيض في الطاقة المستهلكة وذلك مقارنة بحالة استخدام مضخات ثابتة السرعة (تعمل عند السرعة الاسمية) بما يعادل نسبة توفير نحو 18% ويمكن توضيح ذلك بيانياً ورياضياً.

بيانياً:

يبين الشكل (21) أن منحنى الاستطاعة لمضخة تعمل عند 85% من السرعة الاسمية أخفض من منحنى الاستطاعة لمضخة تعمل عند السرعة الاسمية.



الشكل (21) منحنى الاستطاعة لمضختين متماثلتين تعملان عند السرعة الاسمية ومضختي متماثلتين تعملان عند 85% من السرعة الاسمية رياضياً: يمكن المقارنة بين نمطي التشغيل الموضحين في الشكل (21):

النمط الأول: نمط تشغيل مضختين تعملان عند السرعة الاسمية لمدة زمنية 5.7 hours.

قرقبيه، الأعوج

النمط الثاني: نمط تشغيل مضختين تعملان عند 85% من السرعة الاسمية لمدة زمنية 8.8 hours. النمط الأول:

الجدول (7) بارامترات نقطة التشغيل (A)

H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
58.5	1224	0.34

الجدول (8) بارامترات نقطة عمل كل من المضختين (A')

η [%]	H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
79.9	58.5	612	0.17

الاستطاعة الهيدروليكية التي تقدمها كل مضخة:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

$$1000 \times 9.81 \times 0.17 \times 58.5 = 97560.45 \text{ w}$$

$$= 97.6 \text{ kw}$$

الاستطاعة المستهلكة اللازمة لتشغيل كل مضخة:

$$P_2 = P_1 / \eta$$

$$= 97.6 / 0.797 = 122.4 \text{ kw}$$

عدد الساعات اللازمة للتشغيل:

$$7000 / 1224 = 5.7 \text{ hours}$$

استهلاك الطاقة خلال اليوم لمجموعة الضخ:

$$= 2 \times 122.4 \times 5.7 = 1395.4 \text{ kwh}$$

النمط الثاني:

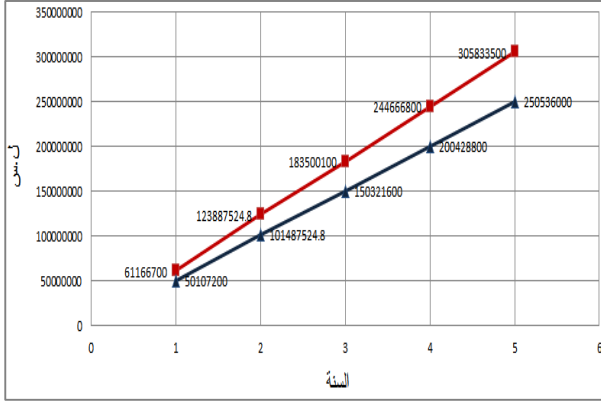
الجدول (9) بارامترات نقطة التشغيل (B)

H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
47.5	792	0.22

الجدول (10) بارامترات نقطة عمل كل من المضختين (B')

η [%]	H [m]	Q [$\frac{m^3}{h}$]	Q [$\frac{m^3}{s}$]
79	47.5	396	0.11

قرقبيه، الأعوج



الشكل (22) التكلفة التشغيلية التراكمية (الخط البياني) — التكلفة التشغيلية عند استخدام مضختين ثابتتي السرعة، والخط البياني — التكلفة التشغيلية عند استخدام مضختين متغيرتي السرعة

زمن الاسترداد Payback Time:

بعد دراسة الوفورات في التكاليف التشغيلية المترتبة على استخدام أسلوب تعديل السرعة لابد من دراسة زمن الاسترداد لتحديد ما إذا كانت هذه الوفورات تبرر الكلفة الأولية لشراء أجهزة تعديل التردد.

تختلف أسعار تلك الأجهزة من شركة مصنعة لأخرى إذ يعتمد السعر على الجودة وأسلوب التحكم، ويعتمد بالطبع على استطاعة المحرك المركبة عليه، يُقدر سعر الجهاز المستخدم في الحالة المدروسة (استطاعته 132 kw) بنحو 11200000 ل.س (في مدة إجراء البحث).

يمكن حساب زمن الاسترداد للجهازين لمناقشة حالتي المقارنة بتطبيق العلاقة التالية:

$$\text{زمن الاسترداد} = \frac{\text{سعر الجهاز} \div \text{المبلغ الممكن توفيره سنوياً}}{\text{Time} = (11200000 \times 2) / (30408 \times 365) \text{ Payback} = 2 \text{ years}}$$

وعليه يكون زمن الاسترداد نحو عامين، وهي مدة مقبولة نسبياً تبعاً لنوعية الجهاز المستخدم ومتوسط عمره.

ملاحظة: هناك عدد كبير لاحتمالات أنماط التشغيل إلا أنها مرفوضة هيدروليكيّاً (بالنسبة للشبكة المدروسة) كالنمط الموضح في الشكل (23)، حيث تبين أنه عند وصل ثلاث مضخات متماثلة على التفرع وتشغيلها عند السرعة

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات
الاستطاعة الهيدروليكية التي تقدمها كل مضخة:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \\ 1000 \times 9.81 \times 0.11 \times 47.5 = 51257.25 \text{ w} \\ = 51.3 \text{ kw}$$

الاستطاعة المستهلكة اللازمة لتشغيل كل مضخة:

$$P_2 = P_1 / \eta \\ = 51.3 / 0.79 = 64.9 \text{ kw}$$

عدد الساعات اللازمة للتشغيل:

$$7000 / 792 = 8.8 \text{ hours}$$

استهلاك الطاقة خلال اليوم لمجموعة الضخ:

$$= 2 \times 64.9 \times 8.8 = 1142 \text{ kwh}$$

وعليه يكون الوفّر في الاستهلاك الطاقوي الممكن الحصول عليه عند استخدام منظومة تعديل سرعة نحو 18%.

الانخفاض في استهلاك الطاقة عند استخدام منظومة تعديل سرعة المضخات يترتب عليه بشكل أساسي انخفاض في تكاليف التشغيل للضخ، ويمكن توضيح ذلك بالجدول (11).

الجدول (11) التكلفة التشغيلية للمنظمتين (على اعتبار أن سعر الكيلو واط الساعي في المحطة يعادل 120 ل.س)

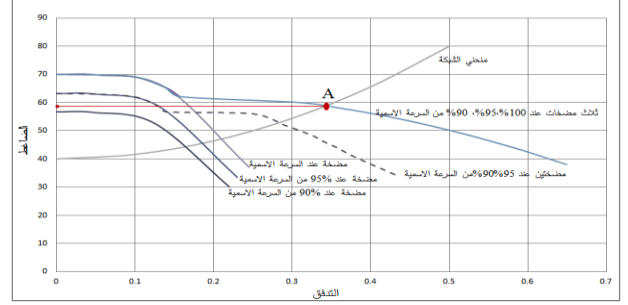
نمط التشغيل	عدد ساعات التشغيل hours	الطاقة المستهلكة kwh	التكلفة التشغيلية للضخ يومياً [ل.س]
النمط الأول	5.7	1395.4	167448
النمط الثاني	8.8	1142	137040

نلاحظ أنه يمكن الحصول على وفّر اقتصادي يعادل 30408 ل.س يومياً و 11098920 ل.س سنوياً.

يمكن توضيح التكلفة التشغيلية بيانياً بالشكل (22) حيث نلاحظ أن الخط البياني المعبر عن التكلفة التشغيلية عند استخدام مضخات عند السرعة الاسمية أعلى من الخط البياني المعبر عن التكلفة التشغيلية عند استخدام مضخات ذات سرعة مخفضة.

دراسة أداء محطات ضخ المياه مع تغيير سرعة المضخات

100%، 95%، 90% من السرعة الاسمية يكون ضاغط نقطة التشغيل A أكبر من الضاغط الأعظمي للمضخة التي تعمل عند 90% من السرعة الاسمية أي يمكن تأمين بارامترات النقطة A من تشغيل مضختين إحداهما عند السرعة الاسمية والأخرى عند 95% من السرعة الاسمية ولا حاجة لتشغيل المضخة الثالثة (هدر للطاقة).



الشكل (23) تشغيل ثلاث مضخات متماثلة عند 90%، 95%، 100% من السرعة الاسمية، A نقطة التشغيل

النتائج:

(1) أسلوب التشغيل المناسب للمضخات لكل منظومة ضخ لا يمكن تحديده مسبقاً، ولكنه يتطلب دراسة متعمقة للخيارات المختلفة المتاحة.

(2) من الضروري اتباع منهجية تحكم (كاستخدام مضخات متغيرة السرعة) لإدارة تشغيل المضخات وضمان العمل عند نقطة الكفاءة العظمى Best Efficiency Point (BEF) عند حدوث تغيرات في الظروف التشغيلية للمحطة لترشيد استهلاك الطاقة.

(3) ينخفض مجال السرعة المسموح به لتشغيل المضخات على شبكة ما بزيادة الضاغط السناتيكي فيها إذ لا يمكن تخفيض سرعة عمل المضخات في حالتنا المدروسة عن 80% من السرعة الاسمية.

(4) التخفيض الكبير في سرعة المضخة يمكن أن يؤدي لانخفاض في كفاءة عملها وهذا يزيد من استهلاك الطاقة.

(5) أجهزة تعديل السرعة ذات فعالية اقتصادية أكبر في محطات الضخ الصغيرة ومتوسطة الحجم، بسبب تناسب تكلفة

قرقبيه، الأعوج

الجهاز مع حجم المحرك واستطاعته ومن ثم التأثير في التكلفة الاستثمارية وزمن الاسترداد.

(6) يمكن تحقيق وفر في الطاقة المستهلكة في المنشآت التي يتم فيها تثبيت محركات متغيرة السرعة بنسبة تعتمد على الظروف التشغيلية للمنشأة، وكانت النسبة تعادل 18% في حالتنا المدروسة.

التوصيات:

(1) يوصي البحث بتعميم استخدام أجهزة تعديل السرعة في محطات الضخ القائمة، لما لها من أثر في تخفيض تكاليف الضخ وترشيد استهلاك الطاقة.

(2) يوصي البحث بدراسة الأثر الفني لاستخدام أجهزة تعديل سرعة المضخات كأثرها في الحد من مشكلة المطرقة المائية (بحسبان أنه يمكن استخدامها للانخفاض أو الارتفاع التدريجي بالسرعة).

(3) استخدام أدوات الذكاء الصناعي والخوارزميات الجينية لإجراء دراسات أوسع وأدق في مجال إدارة نظم الضخ التي تستخدم المضخات متغيرة السرعة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

and Vicente S. Fuertes-Miquel. (2021). Use of Fixed and Variable Speed Pumps in Water Distribution Networks with Different Control Strategies. Mdpi, Water Journal.

[5] Cimorelli, Luigi . Covelli, Carmine. Molino Bruno. And, Pianese, Domenico. (2020). Optimal Regulation of Pumping Station in Water distribution Networks using Constant and Variable speed Pumps: a technical and economical comparison. Mdpi, Energies Journal.

[6] Department of Energy. (2012). Energy Tips: MOTOR SYSTEMS. Washington. U.S.

[7] I, Zyubin. S, Pankratov. A, Petrov and D, Babikova. (2020).

The Use of Variable Frequency Devices of Centrifugal Pumps at the Pumping Station. IOP Publishing /Hydraulics

References

[1] أبو حامد، فريد. خلوف، علي. قداح، عاصم. والأحمد، حكمت. (2013-2014). آلات الجريان. دمشق. سوريا. مطبعة جامعة دمشق.

[2] A, Marchi. A, R, Simpson. and, N, Ertugrul. (2012). Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. Drinking Water Engineering and Sciences Journal.

[3] Briceño, Christian. Iglesias, Pedro and Martinez Javier. (2019). Influence of the Pump Control System in the Selection of the Number of Fixed Speed and Variable Speed Drive Pumps in Water Pumping Stations. Mdpi. Proceedings Journal.

[4] Christian X. Briceño-León. Pedro L. Iglesias-Rey. F, Javier Martinez-Solano .Daniel Mora-Melia

الجدول (12) الأنماط التشغيلية المدروسة

الطاقة المستهلكة kwh	التصريف المائي اليومي m^3/d	عدد ساعات التشغيل hours	مضخة 3			مضخة 2			مضخة 1			نمط التشغيل	رقم النمط التشغيلي
			η %	H m	Q m^3/h	η %	H m	Q m^3/h	η %	H m	Q m^3/h		
1553.7 9	6879.6	4.9	79	65.5	468	79	65.5	468	79	65.5	468	3 pumps 100% n	1
1396.5	6976.8	5.7	-	-	-	79.7	58.5	612	79.7	58.5	612	2 pumps 100% n	2
1428.9	6946.5	5.5	79	59.6	421	79	59.6	421	79	59.6	421	3 pumps 95% n	3
1285.1 2	6912	6.4	-	-	-	79.7	54.4	540	79.7	54.4	540	2 pumps 95% n	4
1315.2	6912	6.4	78	54.4	360	78	54.4	360	78	54.4	360	3 pumps 90% n	5
1207.6 8	6926.4	7.4	-	-	-	79.7	51	468	79.7	51	468	2 pumps 90% n	6
1300.5 3	6930	7.7	72	49.7	300	72	49.7	300	72	49.7	300	3 pumps 85% n	7
1142	6969.6	8.8	-	-	-	79	47.5	396	79	47.5	396	2 pumps 85% n	8
1144.6 6	6860.7	12.1	-	-	-	73	44	288	73	44	288	2 pumps 80% n	9
1492..8	6912	4.8	74	62	360	79.7	62	540	79.7	62	540	2 pumps 100% n + 1 pump 95% n	10
1476.9	6998.4	5.4	79.7	59.7	576	75	59.7	360	75	59.7	360	2 pumps 95% n + 1 pump 100% n	11
1446.5 2	6890.9	5.8	79.7	56.5	648	67	56.5	270	67	56.5	270	2 pumps 90% n + 1 pump 100% n	12
1324.2	6912	6	-	-	-	79.7	56	504	79.7	56	504	1 pump 100% n + 1 pump 95% n	13
1314.5 4	6994.8	6.7	-	-	-	75	53.5	360	79	53.5	360	1 pump 100% n + 1 pump 90% n	14
1241.3 1	6955.2	6.9	-	-	-	79	52	432	79.7	52	432	1 pump 95% n + 1 pump 90% n	15
1224.3	6930	7.7	-	-	-	71	49.7	288	79.7	49.7	288	1 pump 95% n + 1 pump 85% n	16
1191.12	6955.2	8.4	-	-	-	74	48.6	324	79.7	48.6	324	1 pump 90% n + 1 pump 85% n	17