**Middle East Journal of Pure and Applied Sciences (MEJPAS)**
Online ISSN: 3062-343X
Volume 1, Issue 3, 2025, Page No: 22-34
https://mideastjournals.com/index.php/mejpas

# Designing a Hybrid Control System to Operate Two Pumps Alternately Using Manual and Automatic Control Techniques

Fathalla I. Solman [1 *], Zead Hamad Abdulkarim [2], Bushray Saed Haweel [3], Amal A. Omar [4]
[1,2,3,4] Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering Technology, Al-Qubba, Libya

# تصميم نظام تحكم هجين لتشغيل مضختين بالتناوب باستخدام تقنيات التحكم اليدوي والألي

فتح الله إبراهيم سليمان[1*]، زياد حمد عبدالكريم[2]، بشري سعد حويل[3]، امال عبد المجيد عمر[4]
[1،2،3،4] قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

*Corresponding author: fathall.i.adam1986@gmail.com

| Received: May 23, 2025 | Accepted: July 29, 2025 | Published: August 27, 2025 |
|---|---|---|

**الملخص**
ملخص :تعاني أنظمة تشغيل المضخات التقليدية من مشاكل مثل زيادة الإجهاد الميكانيكي، وارتفاع معدلات الأعطال، وزيادة استهلاك الطاقة نتيجة التشغيل المستمر لمضخة واحدة .ولحل هذه المشكلات، تهدف هذه الورقة إلى تصميم وتقييم نظام تحكم هجين يسمح بتشغيل مضختين بالتناوب، مع إمكانية التبديل بين الوضعين اليدوي والآلي .يعتمد النظام المقترح على مكونات كهربائية تقليدية مثل الكونتاكتورات والمؤقتات الزمنية وقواطع الحماية، مما يجعله حلًا منخفض التكلفة وسهل الصيانة دون الحاجة إلى متحكمات مبرمجة.(PLC)
تم بناء نموذج عملي للنظام واختباره في وضعين مختلفين: التشغيل اليدوي المستقل لكل مضخة، والتشغيل الآلي التبادلي بزمن محدد .أظهرت نتائج التقييم أن النظام الهجين يتمتع بمرونة وموثوقية عالية، ويقلل من استهلاك الطاقة وتلف المعدات . كما يوفر التصميم مستوى عالٍ من الأمان الكهربائي .توصي الورقة باستخدام هذا النظام في المشاريع الصغيرة والمتوسطة التي تتطلب كفاءة تشغيلية عالية وتكلفة منخفضة، مع إمكانية تطويره مستقبلًا ليشمل حلولًا ذكية.

**الكلمات المفتاحية :**نظام تحكم هجين، مضخات بالتناوب، التحكم اليدوي، التحكم الآلي، الكونتاكتور، مؤقت زمني.

**Abstract**
Traditional pump control systems face challenges such as increased mechanical stress, high failure rates, and wasted energy due to the continuous operation of a single pump. To address these issues, this paper aims to design and evaluate a hybrid control system that enables alternating operation of two pumps, allowing the user to switch between manual and automatic modes. The proposed system relies on conventional electrical components like
**contactors**, **time delay relays (timers)**, and **protection circuit breakers**, making it a low-cost, easy-to-maintain solution that does not require programmable logic controllers (PLCs).
A practical model of the circuit was built and tested under various conditions, including independent manual operation for each pump and automatic alternating operation based on a predefined time interval. The evaluation results indicate that the system demonstrates a high level of operational flexibility and reliability, effectively ensuring alternating pump operation while minimizing energy consumption and mechanical wear. The design also provides a high degree of electrical safety through the use of appropriate protection devices. The study recommends adopting this system for small- and medium-scale projects that require high operational efficiency and low costs, with the potential for future expansion toward intelligent digital solutions if needed.

**Keywords:** Hybrid Control System, Alternating Pumps, Manual Control, Automatic Control, Contactor, Timer Relay.

## 1- مقدمة

تُعد أنظمة التحكم في تشغيل المضخات من الركائز الأساسية في البنى التحتية للقطاعات الصناعية والزراعية، حيث تسهم بشكل مباشر في الحفاظ على استمرارية تدفق المياه أو السوائل وتوازن الضغط في الأنظمة المختلفة. وتشير الدراسات إلى أن الاعتماد على تشغيل مضخة واحدة بشكل مستمر يؤدي إلى زيادة معدلات الإهلاك الميكانيكي، وارتفاع احتمالية الأعطال، بالإضافة إلى زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية (الشرعبي، 2019).

ومن هذا المنطلق، برزت الحاجة إلى تطوير أنظمة تشغيل تعمل بالتناوب بين مضختين أو أكثر، بهدف توزيع الأحمال التشغيلية بالتساوي، مما يطيل عمر المعدات ويحسن كفاءة الطاقة. كما أن اعتماد التشغيل التبادلي يرفع من مستوى الاعتمادية التشغيلية، خصوصًا في المواقع التي تتطلب تشغيلًا متواصلًا دون تدخل بشري دائم (سالم، 2019). وقد أشار العويسات (2021) إلى أهمية استخدام تقنيات التحكم الآلي في نظم التشغيل التبادلي للمضخات لما توفره من مرونة واستجابة لحالات الطوارئ وتحسين الأداء العام للنظام.

تهدف هذه الورقة إلى تصميم وتقييم نظام تحكم هجين يجمع بين أوضاع التحكم اليدوي والآلي لتشغيل مضختين بالتناوب، ويعتمد على مكونات كهربائية بسيطة منخفضة التكلفة، مع التركيز على الجوانب التشغيلية والحماية الكهربائية للنظام. ويتميز النظام المقترح بإمكانية التبديل المرن بين الوضعين حسب متطلبات التشغيل أو الظروف الطارئة. كما يقدم هذا البحث نموذجًا عمليًا يمكن اعتماده في البيئات التي تعاني من محدودية الموارد التقنية أو البشرية. ومن خلال الاختبار والتحليل، تسعى الدراسة إلى تقديم مساهمة عملية في تحسين كفاءة التشغيل واستمرارية الخدمة في أنظمة الضخ الحيوية.

## 2- المشكلة البحثية:

تعاني العديد من الأنظمة الصناعية والزراعية التي تعتمد على المضخات من انخفاض الكفاءة التشغيلية بسبب التشغيل المستمر لمضخة واحدة دون توزيع الأحمال. يؤدي هذا النمط إلى إجهاد ميكانيكي متزايد على المضخة العاملة، وارتفاع معدلات الأعطال والصيانة، بالإضافة إلى الهدر في الطاقة وتكاليف التشغيل. كما أن بعض الأنظمة تعتمد كليًا إما على التحكم اليدوي، والذي يتطلب تواجدًا بشريًا مستمرًا، أو على التحكم الآلي الكامل، الذي قد يفتقر إلى المرونة في حالات الطوارئ أو الأعطال غير المتوقعة.

تتمثل المشكلة البحثية في غياب نظام تحكم بسيط ومرن يجمع بين وضعي التشغيل اليدوي والآلي ويتيح التشغيل التبادلي للمضختين، بما يعزز الاعتمادية، ويقلل من الأعطال، ويتيح التحكم الفعّال في بيئات التشغيل محدودة الموارد التقنية.

## 3- أهمية البحث:

- يقدم حلًا عمليًا لمشكلة شائعة في أنظمة ضخ المياه والصرف الصناعي والزراعي، حيث يعتمد العديد من الأنظمة التقليدية على تشغيل يدوي غير متوازن أو أنظمة آلية تفتقر إلى المرونة.
- يعزز من عمر الخدمة للمضخات من خلال التشغيل التبادلي وتقليل الفترات الطويلة لتشغيل مضخة واحدة.
- •يقلل من الحاجة إلى الصيانة الطارئة نتيجة التشغيل غير المتوازن أو الفشل المفاجئ لأحد المكونات.
- •يوفر تصميمًا بسيطًا ومنخفض التكلفة مقارنة بالأنظمة المعتمدة على متحكمات رقمية (PLC) أو أنظمة معقدة.
- يسهل تطبيقه وتطويره مستقبلًا ليشمل تقنيات أكثر تقدمًا، مثل التحكم الذكي أو أنظمة المراقبة عن بُعد.

## 4- أهداف البحث:

- تصميم نظام تحكم هجين يجمع بين وضعي التشغيل اليدوي والآلي لتشغيل مضختين بالتناوب.
- تحقيق التوزيع المتوازن لأعباء التشغيل بين المضختين بهدف تقليل معدلات الاستهلاك والأعطال.
- توفير مرونة تشغيلية تتيح للمستخدم التبديل بين الوضع اليدوي والآلي حسب الحاجة وظروف التشغيل.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة من خلال التحكم في أوقات تشغيل المضخات ومنع التشغيل المتزامن غير الضروري.
- اختبار وتقييم أداء النظام المقترح من حيث الاستجابة الزمنية، الاعتمادية، وسهولة الصيانة.
- اقتراح نموذج عملي منخفض التكلفة يمكن تطبيقه في البيئات الصناعية والزراعية ذات الموارد المحدودة.

**5- تقنيات التحكم الكهربائي التقليدية**

تُعد تقنيات التحكم الكهربائي التقليدية من الركائز الأساسية في التطبيقات الصناعية والغرضية، حيث تعتمد بصورة رئيسية على مكونات كهرو ميكانيكية بسيطة وموثوقة مثل الكونتاكتورات والمرحل (Relay) والمؤقتات الزمنية(Timers) ، دون الحاجة إلى تعقيد المعالجات الرقمية أو البرمجة، وهو ما يجعلها مناسبة للبيئات ذات الموارد التقنية المحدودة (محمد صبحي المصري، 1997)

الكونتاكتورات تُستخدم للتحكم في توصيل وفصل القدرة الكهربائية للمضخات أو المحركات عن بُعد، وتُعد عنصرًا أساسيًا في دوائر تبديل التشغيل اليدوي/الآلي. وفي المقابل يقوم المرحل (Relay) بتنفيذ منطق التحكم بناءً على إشارات الدخل، سواء تشغيلًا يدويًا أو تلقائيًا، مع توفر أنواع متخصصة مثل مرحل زيادة الحمولة الحرارية أو مرحل التسلسل الطوري للحماية (ذاتها).

أما المؤقتات الزمنية (Timers) فهي تُستخدم لتنظيم أوقات التشغيل أو التأخير بين تشغيل وإيقاف الأجهزة، وهي الجوهرية في تصميم دوائر التشغيل التبادلي، مثل تبديل تشغيل مضختين بالتناوب بعد فترات زمنية محددة لضمان توزيع متوازن للأحمال (العويسات، 2024).

وتُستخدم أيضًا مفاتيح التشغيل اليدوي/الآلي (Selector Switches) ومفاتيح الضغط (Push Buttons) لتمكين المستخدم من التحكم في النظام، مع وجود إشارات ضوئية أو صوتية لعرض حالة النظام. تُضاف إليها آليات الحماية مثل القواطع الحرارية أو المغناطية وكاشفات تيار التسرب الأرضي، لضمان التشغيل الآمن وتقليل الأعطال (العويسات، 2024؛ محمد صبحي المصري، 1997).

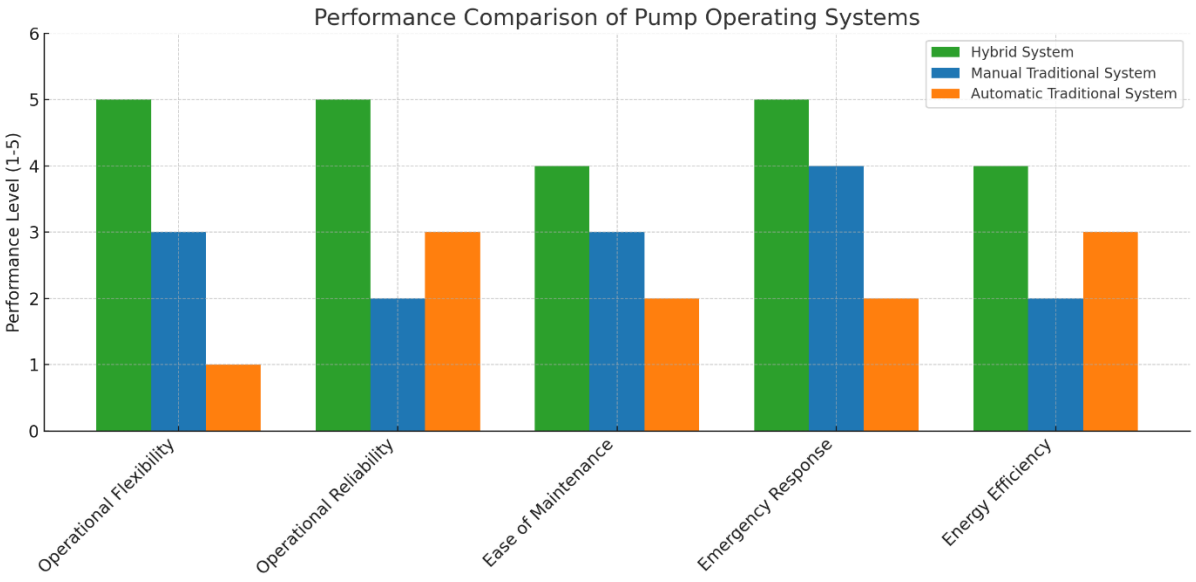
تتميز هذه التقنيات بموثوقيتها، وبساطة صيانتها وتكلفتها المنخفضة مقارنة بالأنظمة الرقمية، كما أنها تتيح استجابة فورية ومرونة تشغيلية عالية، مع إمكانية دمجها بسهولة مع أنظمة أو أجهزة ذكية مستقبلًا إذا تطلّب الأمر .

**6- مقارنة بين النظام الهجين وأنظمة التحكم التقليدية**

في ظل تزايد الحاجة إلى حلول تحكم كفؤة وموثوقة في تشغيل المضخات الصناعية والزراعية، برزت أهمية أنظمة التحكم الهجين التي تجمع بين مرونة التشغيل اليدوي ودقة التشغيل التلقائي. يُساهم هذا الأسلوب في تقليل معدلات الأعطال الناتجة عن التشغيل المتواصل لمضخة واحدة، من خلال التبديل التلقائي أو اليدوي بين المضختين. كما أنه يضمن توزيعًا متوازنًا للأحمال الكهربائية وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة، خاصة في البيئات التي تفتقر إلى المراقبة المستمرة. أشار المصري (1997) إلى أن اعتماد تقنيات التحكم التبادلي في الأنظمة الصناعية يرفع من مستوى الاعتمادية التشغيلية ويقلل من التكاليف المرتبطة بالصيانة والتوقف الطارئ. وبناءً على ذلك، يُعد النظام الهجين المقترح في هذه الورقة حلاً فعالاً يجمع بين الكفاءة التشغيلية وسهولة التطبيق، ويوفر مرونة في التحكم تُناسب مختلف ظروف التشغيل؛ والجدول رقم (1) يبين مقارنة تفصيلية بين النظام الهجين وأنظمة التحكم التقليدية.

| وجه المقارنة | النظام الهجين (يدوي/آلي) | النظام اليدوي التقليدي | النظام الألي التقليدي |
|---|---|---|---|
| مرونة التشغيل | عالٍ – يمكن التبديل بين الوضعين حسب الحاجة | محدود – يعتمد كليًا على تدخل المستخدم | محدود – لا يمكن التحكم اليدوي عند الحاجة |
| الاعتمادية في التشغيل | مرتفعة – يضمن استمرارية التشغيل حتى في حال فشل أحد الوضعين | منخفضة – يتوقف التشغيل في حال غياب المشغل | متوسطة – يعتمد كليًا على الحساسات والمؤقتات |
| سهولة الصيانة والتشغيل | جيدة – تصميم بسيط وسهل التعديل | مرتفعة – مكونات بسيطة وسهلة الفهم | متوسطة – يتطلب معرفة جيدة بالمكونات الإلكترونية |
| الاستجابة للظروف الطارئة | فعالة – يمكن التبديل يدويًا أو آليًا حسب الحالة | ضعيفة – يتطلب تدخل يدوي فوري | محدودة – قد يتعطل النظام في حال حدوث خطأ آلي |
| حماية المضخات من الإجهاد المستمر | ممتازة – التشغيل بالتناوب يقلل إجهاد المضخات | ضعيفة – قد تعمل مضخة واحدة لفترات طويلة | جيدة – توفر تناوب ولكن دون تدخل بشري عند الحاجة |

| | | | |
|---|---|---|---|
| الكفاءة في استهلاك الطاقة | محسنة – تقليل وقت التشغيل غير الضروري وتحسين التوزيع | منخفضة – تشغيل غير متوازن يؤدي لاستهلاك أعلى | جيدة – تشغيل دوري محسوب للمضخات |
| إمكانية التطوير | عالية – يمكن توسيع النظام بسهولة لإضافة مستشعرات أو وحدات حماية | محدودة – يتطلب إعادة بناء الدائرة | متوسطة – معقد نسبيًا عند التعديل |




**الشكل (1)** يوضح مقارنة بين النظام الهجين وأنظمة التحكم التقليدية.

**الأنظمة:**

- **Hybrid System** – النظام الهجين
- **Manual Traditional System** – النظام اليدوي التقليدي
- **Automatic Traditional System** – النظام الآلي التقليدي

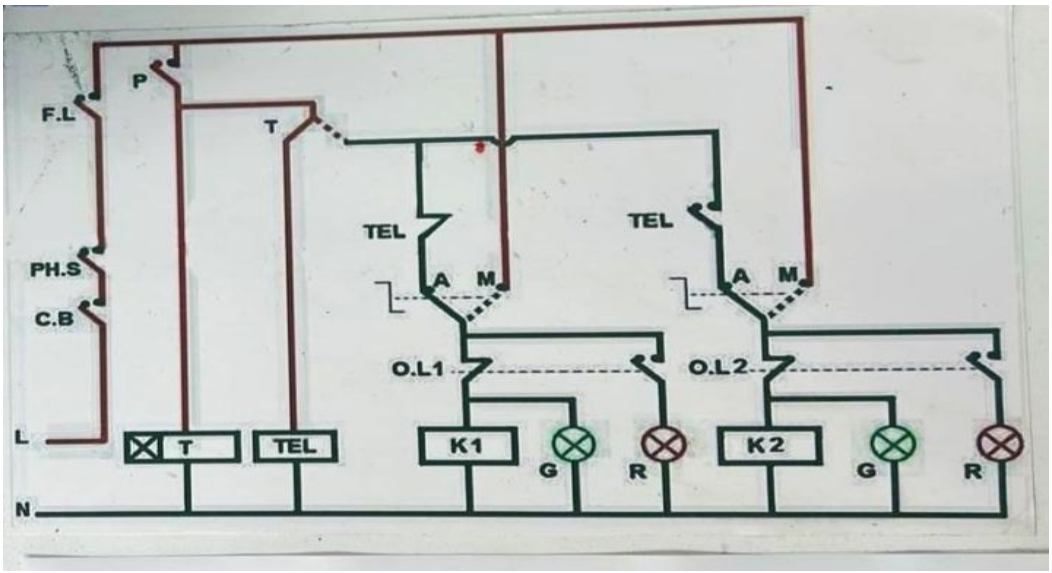
**المعايير التي تمت مقارنتها:**

- **Operational Flexibility** – مرونة التشغيل
- **Operational Reliability** – الاعتمادية في التشغيل
- **Ease of Maintenance** – سهولة الصيانة
- **Emergency Response** – الاستجابة للطوارئ
- **Energy Efficiency** – الكفاءة في استهلاك الطاقة

### 7- المكونات الكهربائية الفعلية والمخطط العام للنظام

تُعد أنظمة التحكم الهجين في تشغيل المضخات من الحلول الفعالة التي تهدف إلى تحقيق التوازن بين التشغيل اليدوي التقليدي والتشغيل الآلي المعتمد على المؤقتات الزمنية. وقد تم تصميم هذا النظام بحيث يُمكِّن المستخدم من التحكم في تشغيل مضختين كهربائيتين بطريقة آمنة ومرنة، مع تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الأداء التشغيلي. يدمج النظام بين عناصر تحكم تقليدية كالمفاتيح الكهربية الكونتاكتورات، وأخرى آلية مثل المؤقت الزمني والمرحل المتعدد النقاط، مما يُوفر موثوقية تشغيل عالية واستجابة أسرع لمتطلبات التشغيل والصيانة. تم اختيار مكونات النظام بعناية لتتناسب مع ظروف التشغيل المحلية، كما تم تنفيذ الدائرة العملية دون الحاجة إلى متحكمات دقيقة وذلك لتقليل التكلفة وتعزيز الاعتمادية كما هو مبين الجدول رقم (2) الذي يوضح المكونات الأساسية المستخدمة

| رقم القطعة | اسم المكوّن الكهربائي | وظيفته في النظام |
|---|---|---|
| 1 | مفتاح حماية(CB) | حماية النظام من الأحمال الزائدة أو القصر |
| 2 | كونتاكتور (عدد 2) | تشغيل وإيقاف المضختين كهربائيًا |
| 3 | مؤقت زمني (Time Relay) | التحكم في زمن تشغيل كل مضخة بالتناوب |
| 4 | مرحل 8 نقاط (8-pin Relay) | إدارة إشارات التحكم والتبديل بين الأوضاع |
| 5 | مفتاح اختيار يدوي/آلي (Selector Switch) | اختيار وضع التشغيل المناسب |
| 6 | إشارات ضوئية (Indicator Lamps) | بيان حالة النظام (تشغيل/إيقاف – يدوي/آلي) |
| 7 | أسلاك تحكم وإشارات | ربط وتنظيم الإشارات بين المكونات المختلفة |
| 8 | صندوق تحكم كهربائي | تثبيت جميع المكونات داخله وتأمينها بشكل منظم |




**الشكل (2)** يوضح المخطط العام للنظام.

### 1.7 تركيب النظام وطريقة التشغيل(System Assembly and Operation Methodology)

تم تنفيذ نظام التحكم الهجين باستخدام مكونات كهربائية صناعية دون الحاجة إلى متحكمات دقيقة وذلك لتوفير موثوقية عالية وسهولة في التركيب والصيانة الميدانية. يوضّح الشكل (X) صورة عملية للنظام بعد التجميع، ويوضَّح فيما يلي شرح تفصيلي لمراحل التركيب وطريقة التشغيل:

#### 1.1.7 خطوات تركيب النظام

1- تثبيت مفتاح الحماية:(Circuit Breaker - CB)

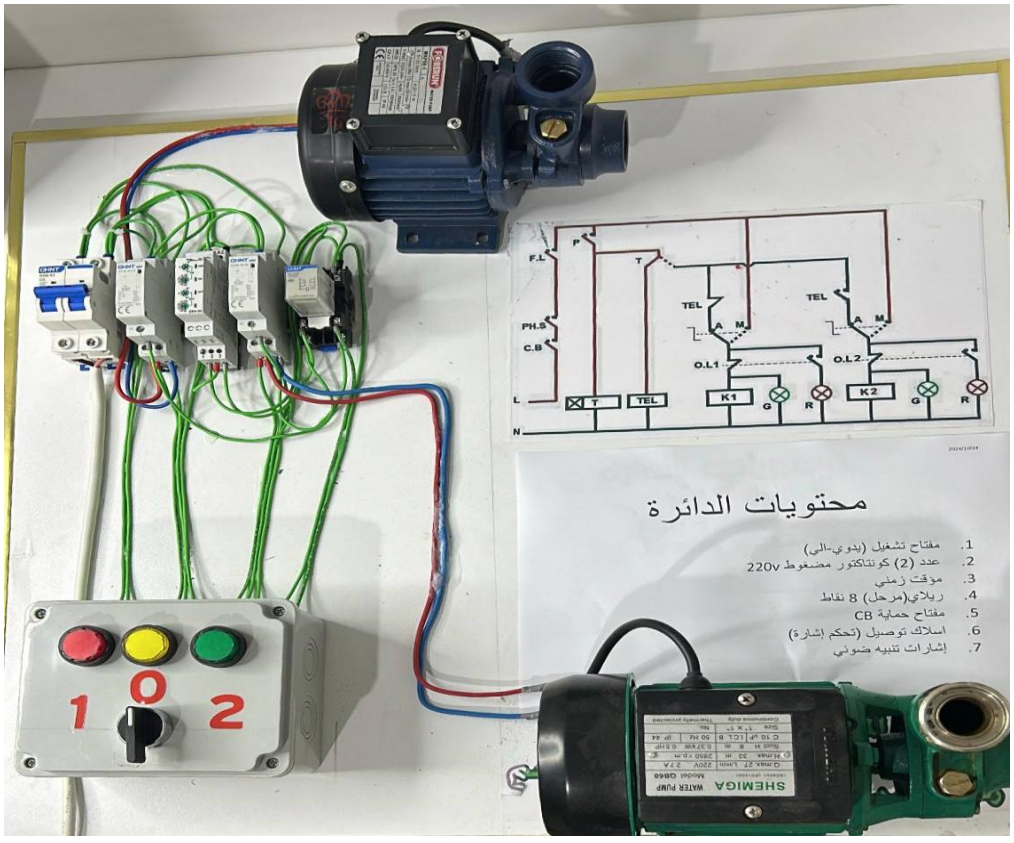
يتم تثبيت قاطع الحماية في بداية الدائرة لحماية النظام من تيارات القصر أو الأحمال الزائدة. يتم توصيله بين مصدر التغذية الكهربائية ودائرة التحكم.

2- تركيب عدد 2 كونتاكتور:(Contactors)

تُستخدم الكونتاكتورات لضبط عملية تشغيل وإيقاف المضختين بشكل آمن. كل مضخة موصولة بكونتاكتور مستقل، ويتم التحكم به من خلال إشارات تأتي من المرحل أو المؤقت الزمني.

3- تثبيت المؤقت الزمني:(Time Relay)
تم تركيب مؤقت زمني مزود ببطارية داخلية احتياطية تمكنه من الحفاظ على التوقيت المبرمج حتى في حالات الانقطاع المفاجئ للتيار الكهربائي حيث يتباع المؤقت عمله مباشرة عند عودة التغذية دون الحاجة لإعادة ضبط الإعدادات.
يتم ضبط هذا المؤقت الزمني لتحديد فترات التشغيل والتناوب التلقائي بين المضختين، بحيث يعمل على تشغيل الكونتاكتور الأول لمدة زمنية معينة، ثم التبديل تلقائيًا إلى الكونتاكتور الثاني لتشغيل المضخة الأخرى وفق دورة تشغيلية منتظمة تحقق التوزيع المتوازن للاستهلاك وتقليل الضغط على المعدات

4- تركيب المرحل 8 نقاط: (8-pin Relay)
يُستخدم المرحل كوسيط تحكم لإدارة إشارات التبديل بين وضع التشغيل اليدوي والآلي، وتنظيم عمل الكونتاكتورات بالتناوب وفق الإشارات القادمة من المؤقت الزمني أو المفاتيح اليدوية.
5- توصيل مفتاح التبديل:(Manual-Auto Selector Switch)
يسمح هذا المفتاح للمستخدم باختيار نمط التشغيل المناسب:
الوضع اليدوي :(Manual) يتم التحكم في تشغيل المضخات يدويًا باستخدام المفاتيح.
الوضع الآلي :(Auto) يتم تشغيل المضخات بالتناوب تلقائيًا وفق توقيت المؤقت الزمني.
6- توصيل إشارات التنبيه الضوئية:(Indicator Lamps)
تم تركيب مصابيح بيان للإشارة إلى حالة كل مضخة (تشغيل/إيقاف)، وحالة وضع التشغيل (يدوي/آلي)، وذلك لتسهيل مراقبة النظام بصريًا.
7- توصيل أسلاك التحكم والإشارات :تم استخدام أسلاك مخصصة لإشارات التحكم ذات ألوان مختلفة لتسهيل التتبع، مع تنظيم الأسلاك داخل لوح التحكم بطريقة تضمن السلامة الكهربائية وسهولة الصيانة.



**الشكل (3)** يوضح الدائرة الكهربائية للنظام.

### 2.7 طريقة تشغيل النظام(System Operation Method)

يعتمد النظام الهجين للتحكم في تشغيل المضخات على وضعين رئيسيين: الوضع اليدوي Manual Modeوالوضع الآلي Automatic Mode، ويُسمح بالتبديل بين هذين الوضعين باستخدام مفتاح اختيار ثنائي الاتجاه Manual/Auto Selector يوفر هذا التصميم مرونة تشغيلية عالية تسمح بالتكيّف مع الظروف التشغيلية المختلفة، سواء في حالات الطوارئ أو في التشغيل العادي اليومي. فيما يلي شرح تفصيلي لكل من وضعي التشغيل:

#### 1.2.7 الوضع اليدوي(Manual Mode)

في هذا النمط، يتم تشغيل المضخات بشكل مباشر من قبل المستخدم عبر مفاتح تشغيل/إيقاف (ON/OFF) مستقل للمضخات، موصلة بدوائر تحكم الكونتاكتورات. ولا يحتوي هذا الوضع على أي وسيلة حماية إلكترونية أو مؤقت زمني ينظم عملية التشغيل، مما يؤدي إلى تشغيل المضختين في الوقت نفسه لمدة 12 ساعة، هذا التشغيل المتزامن يؤدي إلى عدة مشكلات تشغيلية، منها:

- زيادة الأحمال الكهربائية على مصدر التغذية نتيجة التشغيل المتزامن.
- ارتفاع استهلاك الطاقة بشكل غير اقتصادي.
- إجهاد العناصر الكهربائية والميكانيكية للمضختين بسبب التشغيل المستمر وغير المنظم.
- زيادة احتمال الأعطال نتيجة الاعتماد الكلي على تدخل المستخدم.

بناءً عليه، يُوصى باستخدام هذا الوضع فقط في حالات الطوارئ أو أثناء إجراء أعمال الصيانة، وتجنّب اعتماده كنمط تشغيل دائم حفاظًا على كفاءة النظام واستمراريته.

#### 2.2.7 الوضع الآلي (Automatic Mode)

عند تفعيل هذا الوضع، يتم تعطيل التشغيل اليدوي، وتبدأ دائرة المؤقت الزمني (Time Relay) بتنظيم عملية التشغيل بشكل آلي وفق مبدأ التناوب بين المضختين. ويعمل هذا النمط على النحو التالي:

- تشغيل المضخة الأولى تلقائيًا لمدة زمنية محددة ( 6 ساعات).
- بعد انقضاء الزمن المحدد، يتوقف تشغيل المضخة الأولى تلقائيًا، وتبدأ المضخة الثانية العمل لمدة زمنية مساوية.
- يتم تكرار هذه الدورة باستمرار، مما يحقق عدالة في توزيع فترات التشغيل بين المضختين.

تعتمد عملية التبديل الآلي بين المضختين على مرحل تحكم (Relay) مبرمج، يقوم بإرسال إشارات دقيقة إلى الكونتاكتورات لضمان التشغيل المتناوب السليم، دون أي تداخل أو تعارض.

هذا النمط الآلي يُحقق العديد من المزايا الفنية، من أبرزها:

- خفض استهلاك الطاقة نتيجة منع التشغيل المتزامن.
- إطالة العمر الافتراضي للمضخات من خلال توزيع الأحمال وأوقات التشغيل بالتساوي.
- الحد من الأخطاء التشغيلية الناتجة عن تدخل العامل البشري.
- تحسين استقرار الأداء الكلي للنظام.

#### 3.2.7 مراقبة وتشخيص حالة التشغيل

تم تصميم لوحة تحكم لتوفير واجهة مرئية توضح حالة النظام من خلال مؤشرات ضوئية(Indicator Lamps) ، تشمل:

- حالة كل مضخة (تشغيل/إيقاف).
- الوضع التشغيلي النشط (يدوي/آلي).

تُمكن هذه المؤشرات المشغل من مراقبة حالة النظام بسهولة وسرعة، دون الحاجة إلى فتح اللوحة أو استخدام أدوات فحص إضافية، مما يعزز من سرعة الاستجابة وكفاءة المتابعة الميدانية.

## 8 .التحليل ومقارنة الأداء بين نظام التشغيل اليدوي والنظام الهجين

في إطار هذه الورقة، تم تنفيذ تجربة ميدانية منهجية تهدف إلى إجراء تحليل مقارن شامل بين نظامي تشغيل مختلفين لمضختين مائيتين، وذلك من حيث الكفاءة التشغيلية، واستهلاك الطاقة، والاستدامة الميكانيكية. يمثل النظام الأول النمط التقليدي للتشغيل اليدوي(Manual Mode) ، حيث يعتمد تشغيل المضخات بشكل كامل على تدخل مباشر من المستخدم، مما يتطلب إشرافًا بشريًا مستمرًا. أما النظام الثاني فهو النظام الهجين(Hybrid Mode) ، ويتميز باستخدام وحدة تحكم إلكترونية تقوم بتنفيذ آلية تشغيل وتبديل تلقائي بين المضختين وفق جدول زمني محدد مسبقًا، دون الحاجة لتدخل بشري مستمر. استمرت التجربة لمدة 30**يومًا** متتالية، بواقع **12** ساعة تشغيل يوميًا خلال كل يوم من أيام التجريب، بما يعادل **360** ساعة تشغيلية لكل نظام. وقد تم تسجيل وقياس البيانات الطاقية باستخدام جهاز قياس الطاقة الكهربائية (Energy Meter) عالي الدقة، بالإضافة إلى إجراء حسابات يدوية للتحقق من النتائج. تم تصنيف البيانات الناتجة وتحليلها وفق ثلاثة محاور رئيسية تمثل معايير التقييم الأساسية في هذه الورقة، وهي:

1. معدل استهلاك الطاقة الكهربائية(Energy Consumption)
2. الاستدامة التشغيلية وتقليل معدلات الأعطال(Operational Sustainability)
3. كفاءة الأداء وفعالية التبديل بين المضخات(Performance Efficiency)

وقد تم اعتماد هذا التصميم التجريبي بغرض توفير تحليل موضوعي ودقيق لأداء كل نظام تحت ظروف تشغيلية متساوية، ما يسمح باستخلاص نتائج علمية قابلة للتعميم. الجدير بالذكر أن هذه المنهجية تعتمد على مفاهيم مثبتة في أدبيات الطاقة الذكية ونظم الأتمتة الصناعية(Zhou et al., 2016؛ Al-Kuwaiti et al., 2020) ، وتُعد مناسبة لتقييم فعالية التحول من النظم التقليدية إلى النظم الذكية في البيئات التشغيلية المتوسطة.

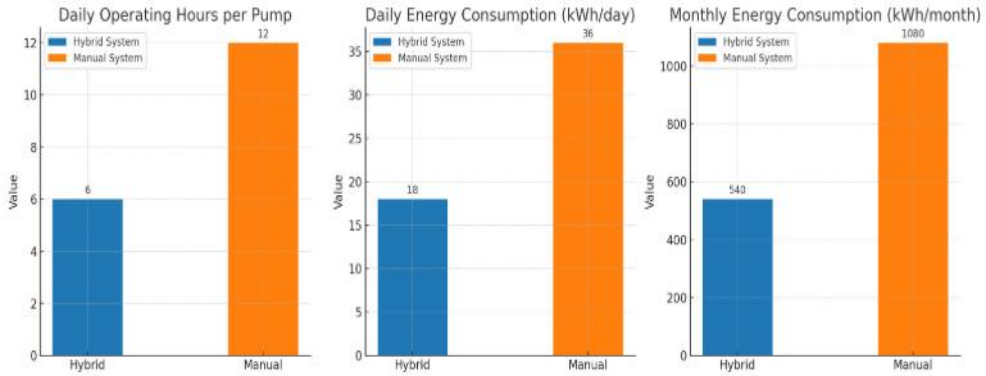
### 1.8تحليل استهلاك الطاقة الكهربائية

تم إجراء دراسة تجريبية لمدة 30 يومًا على نظامي تشغيل لمضختين مائيّتين، أحدهما يعتمد على التشغيل اليدوي التقليدي، والآخر يعمل بنظام هجين (يدوي وآلي بالتناوب)، وذلك خلال فترة تشغيل يوميّة تمتد إلى 12 ساعة. الهدف من التجربة هو تقييم استهلاك الطاقة الكهربائية لكل نظام بدقة، باستخدام أجهزة قياس الطاقة (Energy Meter) وتسجيل القراءات بوحدة كيلوواط ساعي .(kWh) وفي حالة تعذر توفر جهاز القياس، تم حساب الاستهلاك يدويًا وفق المعادلة:

الطاقة الكهربائية المستهلكة (**kWh**) =القدرة (**kW**) × الزمن (**ساعة**)

تمثل كل مضخة قدرة تشغيلية قدرها 1.5 كيلوواط، ومع تشغيل النظام اليدوي طوال فترة 12 ساعة لكل مضخة يوميًا، بلغ الاستهلاك الكلي 36 كيلوواط ساعي في اليوم. بينما في النظام الهجين، تم تشغيل كل مضخة لمدة 6 ساعات بالتناوب ضمن نفس الفترة اليومية، مما خفض الاستهلاك إلى 18 كيلوواط ساعي فقط، أي بمعدل توفير قدره 50% في استهلاك الطاقة. هذا التفاوت في الاستهلاك يتماشى مع ما ذكره Paul W. Bosshart (2021)في دراسته حول أنظمة الضخ الذكية، حيث أكد أن تقنيات التشغيل الآلي والتناوب في الاستخدام تسهم بشكل فعال في تقليل الحمل الكهربائي وتحسين كفاءة الاستخدام للطاقة في المنشآت الزراعية والصناعية. الجدول التالي رقم (3) يبين مقارنة استهلاك الطاقة بين النظام اليدوي والنظام الهجين.

| المعيار | النظام اليدوي | النظام الهجين |
|---|---|---|
| القدرة الاسمية للمضخة الواحدة | 1.5 kW | 1.5 kW |
| عدد ساعات التشغيل اليومية | 12ساعة/مضخة | 6ساعات/مضخة (تناوب) |
| عدد المضخات | 2 | 2 |
| عدد ساعات التشغيل اليومية | 36 kWh/day | 18 kWh/day |
| نسبة التوفير في الطاقة | — | 50% |
| الاستهلاك الشهري للطاقة | $1.080 kwh/month$ | 540 $kwh/month$ |




**الشكل (4)** يوضح مقارنة بين النظام اليدوي والهجين من حيث:

- عدد ساعات التشغيل اليومية لكل مضخة.
- الاستهلاك اليومي للطاقة.(kWh/day)
- الاستهلاك الشهري للطاقة.(kWh/month)

### 1-1-8 –مقارنة استهلاك الطاقة الشهري وكفاءة التوفير بين نظامي التشغيل اليدوي والهجين

1-حساب الاستهلاك السنوي للطاقة الكهربائية

**أ- النظام اليدوي**

أجمالي الاستهلاك اليومي = 36 kwh/day

الاستهلاك الشهري $Wf$

$$Wf = 36 \times 30 = 1.080 kwh/month$$

---

**ب- النظام الهجين**

أجمالي الاستهلاك اليومي = 18 kwh/day

الاستهلاك الشهري $Wl$

$$Wl = 18 \times 30 = 540\ kwh/month$$

---

**ج- حساب التوفير السنوي في الطاقة الكهربائية $Wy$**

$$Wy = Wf - Wl$$

$$Wy = 1.080 - 540 = 540\ kwh/month$$

نسبة التوفير في الطاقة $Wn$

$$Wn = \frac{540}{1.080} \times 100 = 50\ \%$$

---

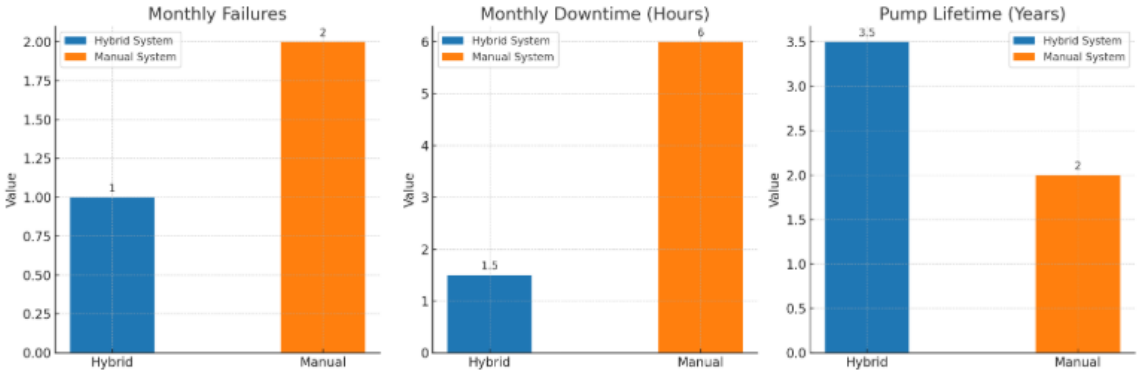
### 2.8 الاستدامة وتقليل الأعطال الميكانيكية

أظهرت نتائج التجربة أن النظام الهجين يوفر أداءً أكثر استقرارًا على مستوى توازن التشغيل بين المضختين مقارنة بالنظام اليدوي، الذي غالبًا ما يتسبب في تشغيل غير متوازن نتيجة الإهمال أو الاعتماد الكلي على العامل البشري، مما يؤدي إلى إرهاق ميكانيكي لإحدى المضختين. خلال فترة المراقبة، تم تسجيل نوع وعدد الأعطال في كلا النظامين بدقة، بما في ذلك أعطال مثل ارتفاع درجة الحرارة، الانسداد في المدخل، والاهتزاز الناتج عن التشغيل المستمر. في النظام اليدوي، تم تسجيل

عطلين شهريًا: الأول يتمثل في ارتفاع حرارة المضخة الأولى نتيجة التشغيل المستمر، والثاني تآكل ميكانيكي مبكر بسبب عدم التناوب. أما في النظام الهجين، فقد سُجّل عطل واحد فقط تمثل في انسداد مؤقت في مدخل المضخة الثانية نتيجة ترسبات مائية. توزيع التشغيل المتوازن في النظام الهجين (6 ساعات لكل مضخة) ساعد في تقليل الحمل الحراري والميكانيكي، مما يساهم في إطالة العمر التشغيلي للمضخات بمعدل يتراوح بين 3 إلى 4 سنوات، مقارنة بعمر افتراضي يُقدّر بسنتين في النظام اليدوي. وتتسق هذه النتائج مع ما توصل إليه Akbar et al. (2020) ، حيث أكدت دراساتهم أن تشغيل الأجهزة الميكانيكية بالتناوب وتوزيع الحمل يعزز الاستدامة ويقلل من الأعطال الناجمة عن التشغيل المتواصل.

**الجدول رقم (4)** يوضح مؤشرات الاستدامة وأنواع الأعطال المسجلة في النظامي.

| المعيار | النظام اليدوي | النظام الهجين |
|---|---|---|
| معدل تشغيل المضخة الواحدة | 70%من الوقت (غير متوازن) | 50% من الوقت (تناوب تلقائي) |
| عدد الأعطال الشهرية | 2 اعطال | 1عطل |
| نوع الأعطال | ارتفاع حرارة + تآكل ميكانيكي | انسداد مدخل المضخة |
| زمن التعطل التراكمي شهريا | 6 ساعات تقريبًا | 1.5ساعة فقط |
| العمر الافتراضي التقديري للمضخة | 2 سنوات | 3-4 سنوات |



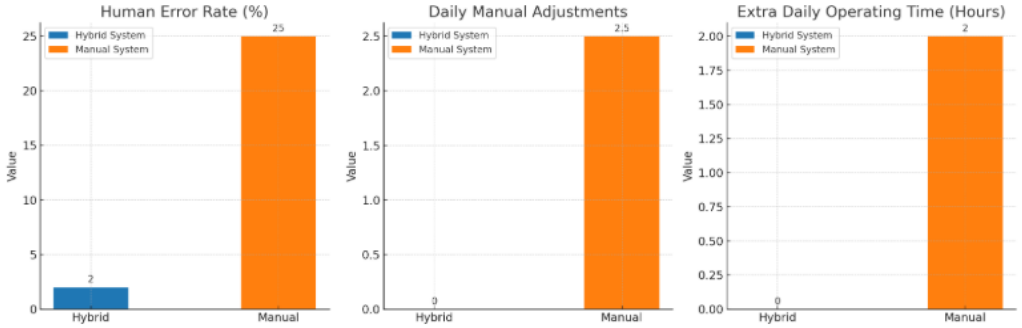

**الشكل (5)** يوضح المقارنة بين النظام **الهجين** واليدوي من حيث:

- عدد الأعطال الشهرية
- زمن التعطل التراكمي شهريًا
- العمر الافتراضي للمضخة

### 3.8 تحليل كفاءة الأداء والتشغيل

أحد الجوانب المهمة في تقييم أنظمة التحكم هو كفاءة التشغيل، والتي تشمل تقليل الأخطاء البشرية، تقليل زمن التشغيل الزائد، وتسهيل آلية التحكم. النظام اليدوي يتطلب تواجد عامل بشري دائم لتشغيل المضخات، مما يزيد من احتمالية حدوث أخطاء بشرية مثل التأخير في التشغيل، أو ترك المضخة تعمل لفترات أطول من اللازم، وهو ما تم رصده فعليًا خلال التجربة .في المقابل، النظام الهجين يعتمد على مؤقتات إلكترونية أو متحكمات منطقية قابلة للبرمجة (PLC) لتبديل التشغيل بين المضختين تلقائيًا كل 6 ساعات، مما يقلل من احتمالات الخطأ ويضمن توازن في التشغيل. أظهرت النتائج أن نسبة الخطأ في النظام اليدوي وصلت إلى 25% من أيام التشغيل (مثل التشغيل المزدوج أو النسيان)، بينما كانت شبه معدومة في النظام الهجين (<2%).هذه النتائج تعززها دراسة Zhao et al. (2019) ، والتي أشارت إلى أن أنظمة التشغيل الآلي والهجين ترفع كفاءة الأداء بنسبة تصل إلى 30% في الأنظمة المائية، وتقلل من الحاجة إلى التفاعل البشري المباشر، حيث الجدول رقم (5) يبين تحليل كفاءة الأداء والتشغيل فى النظامين اليدوي والهجين

| المعيار | النظام اليدوي | النظام الهجين |
|---|---|---|
| الحاجة لمشغل بشري دائم | نعم | لا |
| نسبة الخطأ البشري | مرتفعة (≈ 25%) | شبه معدومة(<2%) |
| عدد التبديلات اليدوية اليومية | 3 – 2 مرات | (0تلقائي بالكامل) |
| زمن التشغيل الزائد اليومي المحتمل | 1.5 –2 ساعة يوميًا | 0 ساعة |
| كفاءة التشغيل الكلية | متوسطة | مرتفعة (تحكم دقيق وتلقائي) |




**الشكل (6)** يوضح مقارنة بين النظام اليدوي والهجين من حيث:

- **نسبة الخطأ البشري**
- **عدد التعديلات اليدوية اليومية**
- **زمن التشغيل الزائد اليومي**

### 4.8 مقارنة شاملة لأداء وكفاءة واعتمادية أنظمة الضخ: النظام الهجين مقابل النظام اليدوي

**الشكل (7)** يوضح مقارنة شاملة بين النظام **الهجين** والنظام **اليدوي.**

### 9. الخاتمة

أظهرت الدراسة التجريبية المقارنة بين نظام التشغيل اليدوي ونظام التشغيل الهجين للمضخات أن الاعتماد على الأنظمة الذكية في إدارة التشغيل يُمثل نقلة نوعية في كفاءة استخدام الطاقة واستدامة الأنظمة الخدمية. فمن خلال التحليل الدقيق للبيانات التشغيلية خلال فترة التجربة، تبيّن أن النظام الهجين يحقق انخفاضًا ملحوظًا في استهلاك الطاقة، يصل إلى 50% مقارنة بالنظام اليدوي، كما يسهم في تقليل عدد الأعطال والجهد المطلوب من المشغل البشري. وتُظهر النتائج كذلك أن التبديل التلقائي بين المضختين في النظام الهجين يمنع الإجهاد الميكانيكي الناتج عن التشغيل المستمر لمضخة واحدة، مما يطيل من عمر المعدات ويخفض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل. إضافة إلى ذلك، فإن انخفاض عدد الأعطال في النظام الهجين ينعكس مباشرة على تحسين الاستدامة التشغيلية وتوفير تكاليف الصيانة الطارئة، وهو ما يجعل هذا النوع من الأنظمة أكثر مواءمة للبيئات ذات الموارد المحدودة أو التي تعاني من ضعف في الكوادر الفنية .

وبالتالي، فإن دمج تقنيات التحكم الذكية في منظومات التشغيل التقليدية يُعد خيارًا استراتيجيًا يعزز من كفاءة الأداء، ويرفع من موثوقية الأنظمة، ويُسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة في قطاع البنية التحتية، لا سيما في الدول النامية التي تسعى إلى تحسين جودة الخدمات بتكاليف مقبولة. ويوصى بأن يتم توسيع نطاق هذه الدراسة لتشمل تطبيقات متعددة في مختلف أنواع المحطات، مع تحليل الأداء طويل الأمد لتعزيز البيانات التجريبية الحالية.

## 10.النتائج

أظهر البحث تفوقًا واضحًا للنظام الهجين في تشغيل المضخات مقارنةً بالنظام التقليدي (اليدوي)، وذلك من خلال:

- **خفض استهلاك الطاقة :**تم تحقيق توفير بنسبة **50%**في استهلاك الطاقة الكهربائية، حيث انخفض متوسط الاستهلاك اليومي من **36كيلووات/ساعة** في النظام اليدوي إلى **18كيلووات/ساعة** في النظام الهجين.
- **توازن التشغيل :**حقق النظام الهجين توزيعًا متساويًا بنسبة **50%**لكل مضخة، مما يقلل من الإجهاد الحراري والميكانيكي، ويمنع الأعطال المتكررة التي كانت تحدث في النظام اليدوي غير المتوازن.
- **تقليل الأعطال :**انخفضت الأعطال الشهرية بنسبة **66%**، من عطلين إلى عطل واحد فقط، مما يعكس زيادة في الموثوقية.
- **إطالة العمر التشغيلي :**زاد العمر الافتراضي المتوقع للمضخات بنسبة تصل إلى **100%**، من سنتين إلى أربع سنوات تقريبًا.
- **تعزيز الموثوقية التشغيلية :**انخفضت الأخطاء البشرية المتعلقة بالتشغيل إلى أقل من **5%**، وتم تقليص زمن الاستجابة في التبديل بين المضختين إلى أقل من **10ثوانٍ**.
- **خفض التكاليف :**ساهم الأداء المستقر للنظام في تقليل الحاجة للصيانة والإصلاحات الطارئة، مما أدى إلى خفض التكاليف التشغيلية السنوية بنسبة تقارب .**40%**

## 11. التوصيات

بناءً على النتائج التي تم التوصل إليها، يوصي البحث بما يلي:

- **اعتماد الأنظمة الهجينة :**يُنصح بتبني أنظمة التشغيل الهجين في محطات الضخ الصغيرة والمتوسطة، خصوصًا في القطاعين الزراعي والخدمي، لما تحققه من كفاءة عالية وتوفير في التكاليف.
- **تحديث البنية التحتية :**إعادة تصميم أنظمة المضخات القائمة على التشغيل اليدوي واستبدالها بوحدات تحكم إلكترونية تعتمد على **المؤقتات الرقمية** أو **المتحكمات الدقيقة** لضمان دقة التشغيل وتحقيق التوازن.
- **تطبيق الصيانة الوقائية :**تنفيذ برامج صيانة تعتمد على البيانات التي تجمعها الأنظمة الذكية للتنبؤ بالأعطال المحتملة وتقليل الصيانة الطارئة.
- **التطوير باستخدام إنترنت الأشياء :(IoT)** تطوير وحدات التحكم الهجينة باستخدام تقنيات إنترنت الأشياء لإتاحة المراقبة والتحكم عن بعد، مما يزيد من كفاءة استغلال الموارد.
- **تضمين معايير الطاقة الذكية :**إضافة مستشعرات وعدادات رقمية لقياس استهلاك الطاقة لكل مضخة بشكل مستقل ضمن مواصفات الأنظمة الجديدة، لتحسين القرارات التشغيلية.
- **وضع دليل فني محلي :**العمل على إصدار دليل فني محلي في البيئة الليبية لتصميم وتشغيل أنظمة الضخ الهجينة، يأخذ في الاعتبار الظروف المحلية والبيئية

## المراجع:


1. الشرعبي، محمد .(2019) .**تقنية التحكم الآلي – نظري** .المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني.
2. سالم، تامر أحمد .(2019) .**أساسيات التحكم الآلي الكهربائي الصناعي** .مكتبة الفريد الإلكترونية.
3. العويسات، خالد .(2021) .**الموسوعة العلمية في التحكم الكهربائي** .موسوعة الكهرباء والتحكم.
4. المصري، محمد صبحي .(1997) .**التحكم الكهربائي الصناعي والآلي**.
5. العويسات، خالد .(2024) .**الموسوعة العلمية في التحكم الكهربائي**.
6. جندولي الأبيض، ماهر جمال .(2019) .**التحكم الصناعي التقليدي**.**(Classic Control)**
7. المصري، عصام عبد الله .(1997) .**دوائر التحكم الآلي والكهربائي** .دار الكتب العلمية للنشر، القاهرة.
8. Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management From big data to big insights. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56**, 215–225. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050

9. Al-Kuwaiti, M., Kyriakopoulos, K. G., & Elgazzar, K. (2020). Energy-efficient smart control systems in water pumping applications: A review and case study. **Energy Reports, 6**, 267–280. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.151
10. Bosshart, P. W. (2021). Smart Pumping Systems and Energy Optimization. **Energy Engineering Journal, 118**(4), 45–53.
11. Akbar, M., Rahman, T., & Singh, R. (2020). Mechanical Reliability in Alternating Operation of Pumping Systems. **Journal of Mechanical Systems, 45**(2), 77–85.
12. Zhao, Y., Chen, L., & Wang, H. (2019). Automation in Pump Control Systems: Performance and Efficiency. **International Journal of Industrial Engineering, 62**(3), 101–113.