

EEESC

الشركة المصرية لكفاءة الطاقة والاستدامة
مركز المعلومات والمعرفة

دليل الهندسة التطبيقية لتحسين كفاءة أنظمة الضخ الصناعية

التشغيل قرب نقطة الكفاءة القصوى

وتحسين المنظومة ضمن نطاق التشغيل المفضل

Best Efficiency Point (BEP) • Preferred Operating Region (POR)

A Practical Engineering Guide for Improving Industrial Pumping Systems Efficiency

Operating Near BEP and Optimizing the System within the Preferred Operating Region

«ليس كل فقد فرصة توفير... ابحث عن الفرص المؤهلة»

إعداد وتأليف: د. أحمد كمال عسل

دليل الهندسة التطبيقية لتحسين كفاءة أنظمة الضخ الصناعية

التشغيل قرب نقطة الكفاءة القصوى (BEP) وتحسين المنظومة ضمن نطاق التشغيل المفضل (POR)

A Practical Engineering Guide for Improving Industrial Pumping Systems Efficiency

Operating Near BEP and Optimizing the System within the Preferred Operating Region (POR)

الشعار المهني

«ليس كل فقد فرصة توفير... ابحث عن الفرص المؤهلة»

إعداد وتأليف
م. أحمد كمال عسل

Energy Efficiency & Sustainability Expert

CEM | CEA | LEED Credentialed | FEMP Specialist

خبرة مهنية في تقييم أنظمة الطاقة والضخ الصناعي، وخبير طاقة معتمد من RCREEE منذ 2020 وفق بيانات المؤلف.

الجهة الراعية والناشرة

مركز المعلومات والمعرفة بالشركة المصرية لكفاءة الطاقة والاستدامة - EEESC

الإصدار المهني الموسع - 2026

نطاق الكتاب | Book Scope

المحور	ما الذي يغطيه؟
Hydraulics	Pump/System curves, duty point, static/friction head, losses
Efficiency	Pump, motor, VFD and wire-to-water efficiency
Reliability	BEP/POR/AOR, NPSH, cavitation, vibration
Energy	Specific energy, control losses, annual energy and cost
Optimization	VFD, trim, reselection, parallel staging, piping
Verification	Qualified opportunities, M&V, digital monitoring

الفئات المستهدفة: مهندسو الطاقة والمرافق، الصيانة والميكانيكا، التشغيل، الاستشاريون، مديرو المصانع، وطلبة الهندسة المهتمون بالأنظمة الصناعية.

هذا الكتاب مرجع هندسي تطبيقي يهدف إلى دعم التشخيص، وجمع القياسات، وتحليل أداء أنظمة الضخ، وتأهيل فرص تحسين الكفاءة والطاقة. وهو لا يحل محل التصميم التفصيلي، أو تعليمات الشركة المصنعة، أو متطلبات السلامة، أو المعايير الوطنية الملزمة بالموقع.

تم تحديث المنهجية بحيث لا تُعامل نقطة الكفاءة القصوى BEP كنقطة تشغيل إلزامية حرفيًا؛ بل يُستهدف التشغيل قريبًا منها وداخل نطاق التشغيل المفضل POR قدر الإمكان، مع احترام نطاق التشغيل المسموح AOR ومتطلبات NPSH والاعتمادية والعملية الإنتاجية.

تنبيه هندسي

أي نسبة توفير تُذكر في دراسة الحالة تخص افتراضات تلك الحالة فقط. لا يجوز تعميمها على نظام آخر قبل القياس، وبناء منحنيات الأداء، والتحقق من القيود التشغيلية، وتأهيل الإجراء، ثم القياس والتحقق بعد التنفيذ.

حقوق النشر © 2026. مركز المعلومات والمعرفة بالشركة المصرية لكفاءة الطاقة والاستدامة (EEESC). جميع الحقوق محفوظة.

Technical references and standards were checked against official ISO, ANSI/Hydraulic Institute and U.S. Department of Energy sources in October 2026.

Professional Boundaries | حدود الاستخدام المهني

داخل نطاق الكتاب	يتطلب مرجعًا/تصميمًا متخصصًا إضافيًا
Energy assessment and field diagnostics	Detailed mechanical design and stress analysis
Pump/system curve reconstruction	OEM-certified pump selection for final procurement
BEP/POR/AOR and NPSH screening	Hazardous-service compliance and statutory safety
Energy/cost opportunity qualification	Process guarantees and production guarantees
M&V planning concepts	Contractual savings certification by independent party

قاعدة السلامة

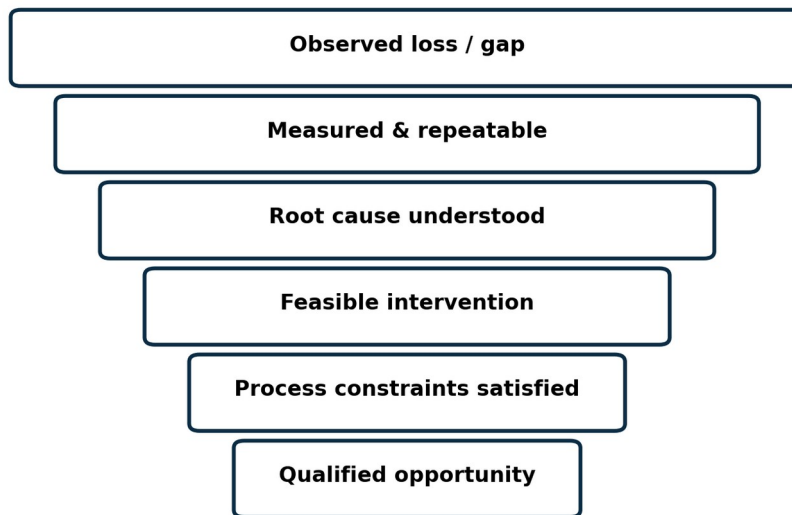
لا يتم تغيير سرعة أو صمام أو setpoint في نظام حرج بناءً على الحساب فقط. أي تعديل تشغيلي يحتاج موافقة التشغيل والسلامة ومراجعة حدود المصنع الأصلي.

تعمل أنظمة الضخ في قلب الصناعات التي تعتمد على المياه، السوائل الحرارية، الكيماويات، خدمات التبريد، التغذية، الصرف، والعمليات الإنتاجية. ولذلك فإن ضعف اختيار الطلمبة أو تغير منحنى النظام أو التشغيل المستمر بعيداً عن منطقة الأداء المفضلة قد يظهر في صورة زيادة كهرباء، اهتزازات، أعطال أختام ومحامل، تجويف، أو ضعف في موثوقية العملية.

الفكرة الأساسية لهذا الكتاب هي أن كفاءة الطلمبة لا تُقرأ منفردة. النظام الكامل هو وحدة التحليل: مصدر الطاقة، المحرك، وسيلة التحكم، الطلمبة، المواسير، الصمامات، الخزانات، الرفع الاستاتيكي، الفواقد الاحتكاكية، وطبيعة الطلب التشغيلي. وهذا يتوافق مع ISO/ASME 14414:2019 الذي يتناول تقييم الطاقة على مستوى نظام الضخ من مدخلات الطاقة إلى العمل المفيد الناتج [1].

كما يعتمد الكتاب مبدأ أن الفقد الملاحظ ليس بالضرورة فرصة توفير مؤهلة. يجب إثبات الفجوة بالقياس، وفهم سببها، وتحديد إجراء قابل للتنفيذ، والتحقق من استمرار تحقيق الضغط والتدفق والجودة والسلامة، ثم وضع خطة قياس وتحقيق للوفر قبل اعتماد القيمة المالية.

From Loss to Qualified Saving Opportunity



Not every loss is a saving opportunity — qualify the opportunity before claiming savings.

شكل: من الفقد المرصود إلى فرصة توفير مؤهلة | From Loss to Qualified Saving Opportunity

فهرس المحتويات
Table of Contents

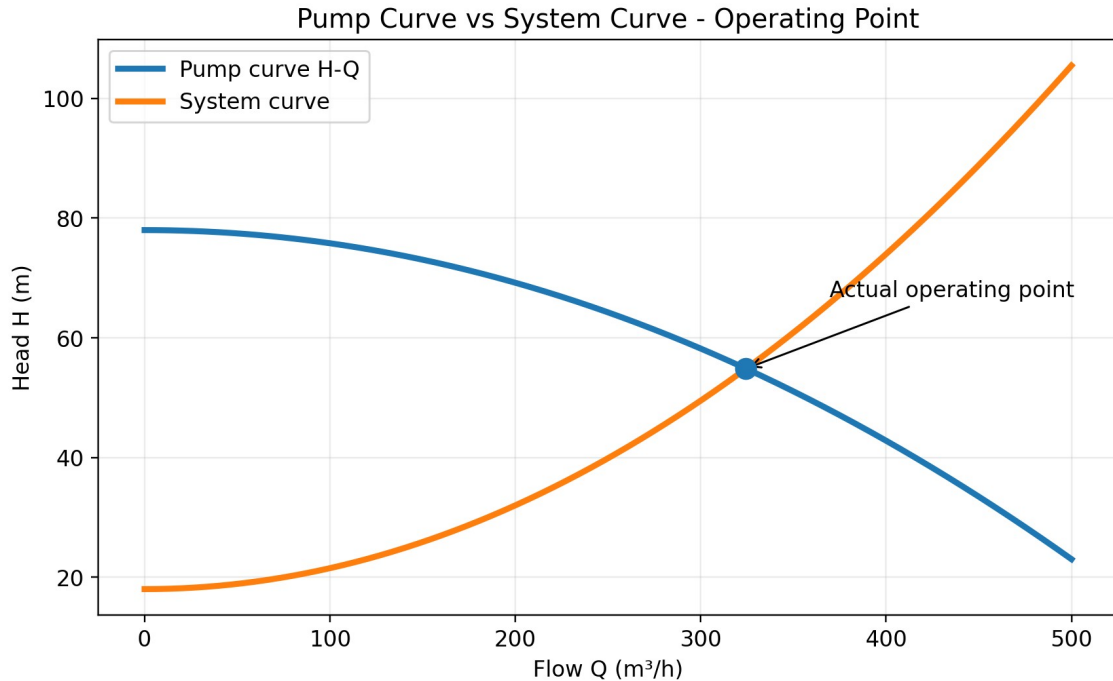
المحتوى	الصفحة
المقدمة التنفيذية ورؤية EEESC	4
الفصل الأول: الأساسيات الفيزيائية وهيدروليكا أنظمة الضخ	6
الفصل الثاني: منهجية التقييم الهندسي والقياسات والمعايير	9
الفصل الثالث: AOR و POR و BEP والتشخيص العميق والاعتمادية	12
الفصل الرابع: استراتيجيات التحكم والتحسين الهندسي	15
الفصل الخامس: دراسة حالة تطبيقية مصرية - نظام مياه تبريد	19
الفصل السادس: التوأمة الرقمية والصيانة التنبؤية	22
الفصل السابع: النماذج الميدانية وقوائم الفحص	24
الفصل الثامن: الملحق الفنية والمعادلات السريعة	26
الخاتمة والتوصيات الاستراتيجية	28
المراجع العلمية والمعايير	29

كيف تستخدم هذا المرجع؟ | How to Use This Guide

إذا كان سؤالك...	ابداً من
لماذا ترتفع قدرة الطلمبة؟	الفصل الأول + الرابع
هل التشغيل بعيد عن BEP خطر؟	الفصل الثالث
هل VFD سيوفر فعلاً؟	الفصل الرابع + منحنى النظام
كيف أحسب الوفورات؟	الفصل الثاني + الخامس
ما القياسات التي أحتاجها؟	الفصل الثاني + السابع
كيف أحول التقييم إلى نظام رقمي؟	الفصل السادس

خلاصة الفصل

يؤسس هذا الفصل العلاقة بين التدفق والرفع والفواقد والقدرة والكفاءة، ويشرح أن نقطة التشغيل تنتج من تقاطع منحنى الطلمبة مع منحنى النظام، لا من الطلمبة وحدها.



شكل: منحنى الطلمبة ومنحنى النظام ونقطة التشغيل | Pump and System Curves

1.1 حدود النظام ومعنى الرفع الكلي | System Boundary and Total Head

يجب قبل أي حساب تحديد حدود النظام: من نقطة السحب إلى نقطة التصريف، وما إذا كانت القدرة المقاسة عند مدخل VFD أو عند المحرك أو عند عمود الطلمبة. اختلاف الحدود يغير تعريف الكفاءة والفقد، ولذلك يجب توثيقها على المخطط الأحادي أو P&ID.

$$H_{\text{total}} = H_{\text{static}} + H_{\text{friction}} + \Delta(P/\rho g) + \Delta(V^2/2g)$$

في النظم المفتوحة يمكن تبسيط العلاقة بحسب فروق المناسيب والضغط والسرعة، لكن يجب عدم إسقاط أي مكون مؤثر دون مبرر هندسي.

يتغير الفقد الاحتكاكي في معظم شبكات المواسير تقريبًا مع مربع التدفق، بينما يبقى الرفع الاستاتيكي مستقلًا عن التدفق. لذلك يمكن تمثيل منحنى النظام بصيغة مبسطة:

$$H_{\text{system}} = H_{\text{static}} + K Q^2$$

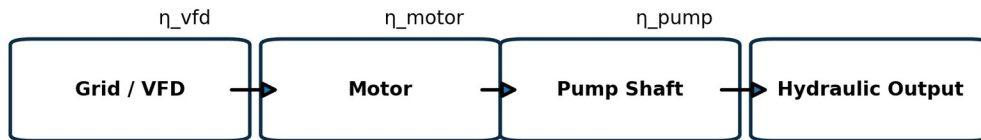
1.2 القدرة الهيدروليكية والكهربائية | Hydraulic and Electrical Power

$$P_{\text{hyd}} (\text{kW}) = Q(\text{m}^3/\text{h}) \times H(\text{m}) \times SG / 367$$

$$P_{\text{elec}} = P_{\text{hyd}} / (\eta_{\text{pump}} \times \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{vfd}})$$

العامل 367 تقريب عملي للمياه ووحدة m^3/h و m . أما في الحسابات العامة فيمكن استخدام $P = \rho g Q H$ بوحدة SI. ويجب استخدام الوزن النوعي أو الكثافة الفعلية للسوائل غير المائية.

Energy Conversion Chain and Efficiency Boundaries



$$P_{hyd} = Q \times H \times SG / 367 \quad | \quad P_{elec} = P_{hyd} / (\eta_{pump} \times \eta_{motor} \times \eta_{vfd})$$

شكل: سلسلة تحويل القدرة وحدود الكفاءة | Energy Conversion Chain

1.3 الكفاءة من الشبكة إلى الماء Wire-to-Water

$$\eta_{wtw} = P_{hyd} / P_{elec}$$

هذا المؤشر مفيد في التقييم الحقلية لأنه لا يحتاج إلى فصل كفاءة الطلمبة والمحرك إذا كانت القدرة الكهربائية والتدفق والرفع مقاسة مباشرة. لكنه لا يحدد وحده سبب الفجوة؛ فقد يكون السبب في الطلمبة أو المحرك أو VFD أو منحنى النظام.

1.4 الاستهلاك النوعي للضخ Specific Pumping Energy

$$\text{Specific Energy} = \text{kWh} / \text{m}^3 \approx \text{kW} / (\text{m}^3/\text{h})$$

يسمح هذا المؤشر بمقارنة التشغيل عبر فترات مختلفة بشرط ثبات حدود النظام وعدم اختلاف الرفع المطلوب أو خصائص السائل اختلافاً جوهرياً. عند تغير الرفع يجب التطبيع أو استخدام الكفاءة من الشبكة إلى الماء.

1.5 الفواقد الاحتكاكية والموضعية Friction and Minor Losses

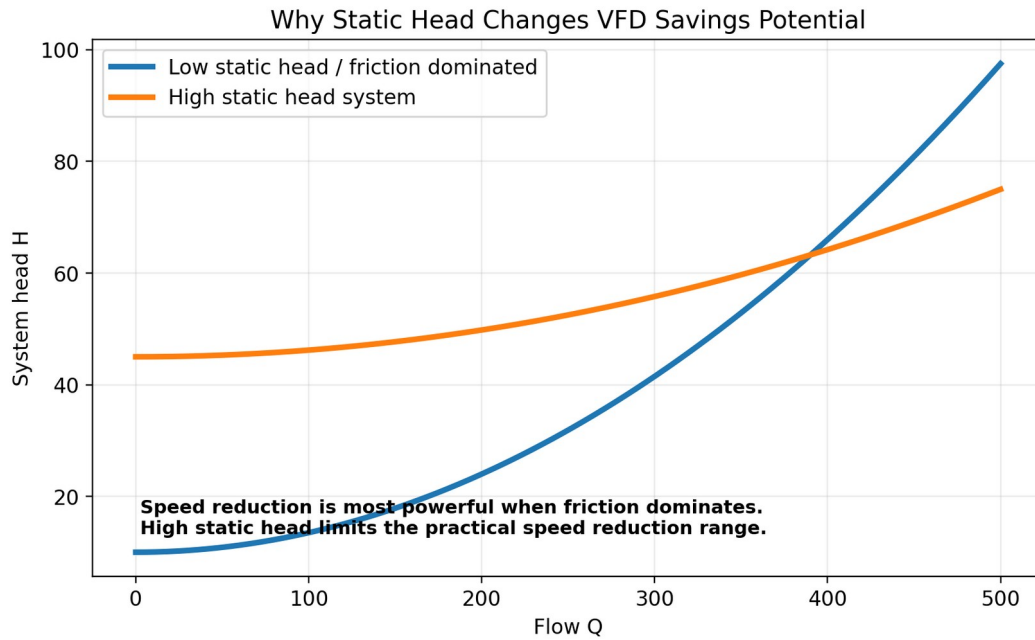
عند الحاجة إلى نموذج تفصيلي لمنحنى النظام، تُحسب فواقد المواسير المستقيمة بمعادلة Darcy-Weisbach ويضاف إليها فاقد الأكواع والصمامات والمخارج والمداخل على صورة معاملات K. الخطأ في تقدير هذه الفواقد قد يقود إلى اختيار طلمبة oversized أو تحديد Head غير واقعي.

$$h_f = f (L/D) (V^2/2g) \quad | \quad h_{minor} = \sum K (V^2/2g)$$

ينبغي استخدام اللزوجة و Reynolds number وخشونة المواسير عند تحديد معامل الاحتكاك f. أما في مرحلة المسح السريع فيمكن إعادة بناء منحنى النظام من قياسات متعددة للتدفق والضغط إذا تعذر الحصول على تفاصيل الشبكة كاملة.

1.6 النظام ذو الرفع الاستاتيكي مقابل النظام الاحتكاكي Static-Head vs Friction-Dominated Systems

نوع منحنى النظام يحدد مدى فاعلية التحكم بالسرعة. في الأنظمة ذات الرفع الاستاتيكي المنخفض، ينخفض الـ Head المطلوب بوضوح مع التدفق فتكون السرعة المتغيرة قوية الأثر. أما إذا كان الرفع الاستاتيكي كبيراً، فلن يسمح النظام بخفض السرعة إلى نفس الدرجة دون فقد الخدمة المطلوبة.



شكل: تأثير الرفع الاستاتيكي على إمكانات خفض السرعة | Static Head and VFD Savings Potential

1.7 قراءة منحنيات الشركة المصنعة | Reading OEM Performance Curves

المنحنى الاحترافي للطلبة لا يقتصر على H-Q؛ بل يشمل الكفاءة، القدرة المطلوبة، NPSHR/NPSH3، أقطار المروحة وسرعات مختلفة، وحدود التشغيل. أي مقارنة بين "الحالي" و"المرجعي" يجب أن تستخدم منحنى OEM مطابقاً للقطر والسرعة والسائل قدر الإمكان، ثم تُراجع بالقياسات الميدانية.

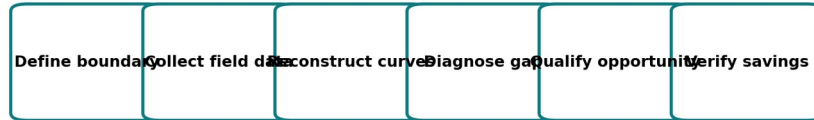
1.8 الفحص الكهربائي للمحرك والمنظومة | Motor and Electrical Checks

يجب قياس kW الحقيقي ثلاثي الأوجه، وليس الاعتماد على التيار وحده. تشمل المراجعة جهد الأطوار، عدم الاتزان، معامل القدرة، التحميل النسبي للمحرك، وكفاءة المحرك المتوقعة عند الحمل الفعلي. إذا كان VFD موجوداً، توثق كفاءته وترددته وسرعته وحالة bypass إن وجدت.

خلاصة الفصل

يرتب هذا الفصل العمل من تحديد الهدف والحدود إلى القياس الميداني، إعادة بناء منحنيات الأداء، تشخيص الفجوة، وتأهيل الفرصة ثم قياس والتحقق من النتيجة.

EEESC Pump-System Assessment Logic



Measured loss → engineering cause → feasible action → constraints satisfied → M&V → Qualified saving opportunity

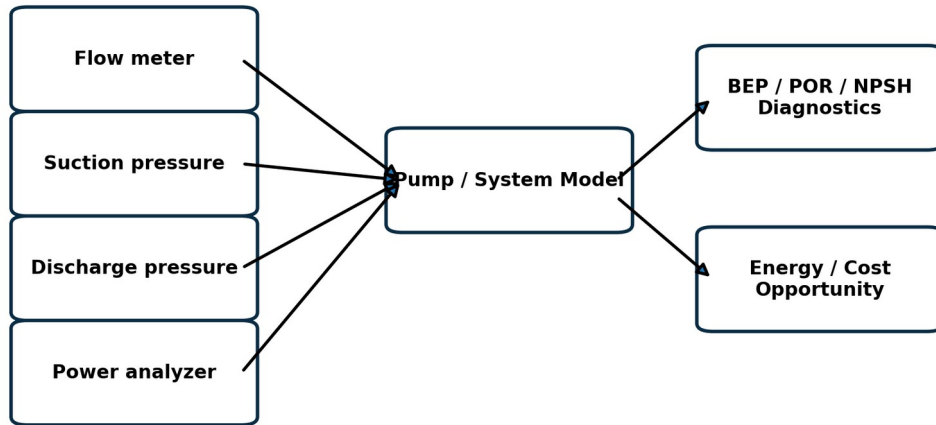
شكل: منهجية EEESC لتقييم نظام الضخ | Assessment Workflow

2.1 المراجع المعتمدة في المنهجية | Reference Framework

المرجع	دوره في الكتاب
ISO/ASME 14414:2019	تقييم الطاقة لنظام الضخ كاملاً؛ تحديد الاستهلاك وفرص التحسين [1]
ANSI/HI 9.6.3-2024	تعريف نطاق التشغيل المفضل POR والمسموح AOR وتأثير الابتعاد عن BEP [2]
ANSI/HI 9.6.1-2024	إرشادات هامش NPSH للظروف الديناميكية [3]
ISO 50002-3:2025	إرشاد لتدقيق الطاقة في العمليات الصناعية باستخدام إطار ISO 50002-1 [4]
ISO 50001:2018	إدارة الطاقة والتحسين المستمر للأداء؛ الإصدار الحالي مؤكد في 2024 [5]
DOE Pump Systems / MEASUR	أدوات وممارسات لتقييم وتحسين نظم الضخ الصناعية [6][7]
Hydraulic Institute PSAP	مسار مهني متخصص لتقييم أنظمة الضخ، ولا يُستخدم في الكتاب كادعاء اعتماد للمؤلف [8]

2.2 القياسات الحقلية الدنيا | Minimum Field Measurements

Minimum Field Measurement Architecture



شكل: بنية القياسات الدنيا المطلوبة | Minimum Field Measurement Architecture

المتغير	وسيلة القياس	القيمة التحليلية
التدفق Q	Ultrasonic / magnetic / process meter	تثبيت نقطة التشغيل والعمل الهيدروليكي
ضغط السحب والتصريف	Pressure transducers / gauges	حساب الرفع الكلي ومخاطر السحب
القدرة الكهربائية	phase power analyzer-3	القدرة الحقيقية kW وليس التيار وحده
السرعة	Tachometer / VFD feedback	تطبيق Affinity Laws والتحقق من setpoint
درجة حرارة السائل	Temperature sensor	الكثافة وضغط البخار ومخاطر NPSH
الاهتزاز	Vibration analyzer	قربنة على التشغيل خارج المنطقة المفضلة أو مشاكل ميكانيكية

2.3 من الفجوة إلى فرصة مؤهلة | Qualifying Savings Opportunities

يمكن أن يظهر الفرق بين القدرة الحالية والقدرة المرجعية كفجوة، لكن جزءًا منها قد يكون ناتجًا عن متطلبات العملية أو الرفع الاستاتيكي أو حدود NPSH أو قيود موثوقية. لذلك لا تعتمد EEESC الوفر إلا بعد مرور الإجراء المقترح عبر بوابات: القياس، السبب، الجدوى الفنية، القيود، ثم M&V.

قاعدة مهمة

الفقد الطبيعي داخل حدود التصميم ليس هدرًا تلقائيًا، والانخفاض الرياضي في القدرة ليس وفرًا إذا أدى إلى فقد تدفق أو ضغط أو جودة أو اعتمادية.

2.4 جودة البيانات وعدم اليقين | Data Quality and Uncertainty

تقييم نظام الضخ يعتمد على تزامن القياسات. يجب أن يمثل التدفق والضغط والقدرة نفس الحالة التشغيلية، وأن تكون أجهزة القياس ضمن نطاق مناسب ومُعَايرة أو موثقة الدقة. عند تغير الحمل بسرعة، يفضل التسجيل الزمني المتزامن بدل أخذ قراءات منفصلة متباعدة.

طريقة المعالجة	مثال	مصدر عدم اليقين
توثيق الدقة والمعايرة	Flow meter $\pm 1-2\%$	جهاز القياس
متوسط زمني وحالة مستقرة	تذبذب صمام التحكم	استقرار العملية
تصحيح head حسب الارتفاع	اختلاف ارتفاع نقاط الضغط	المناسيب
استخدام SG/p وخواص السائل الفعلية	سوائل ساخنة أو لزجة	الكثافة/الحرارة
مطابقة الاسم/القطر/السرعة قبل	قطر مروحة أو سرعة مختلفة	منحنى OEM

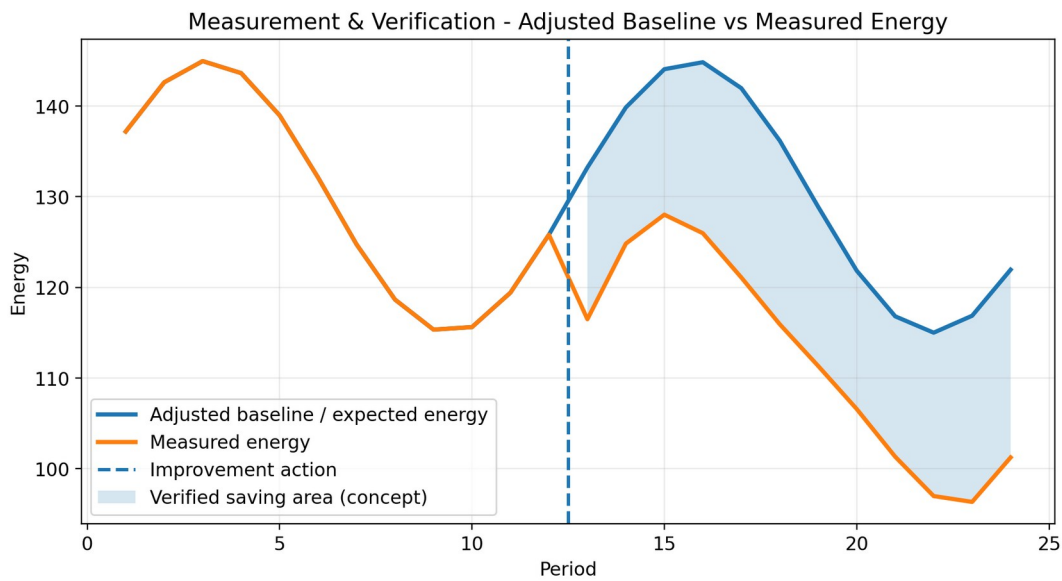
		المقارنة
--	--	----------

2.5 مستويات التقييم المقترحة | Suggested Assessment Levels

المستوى	النطاق	المخرجات
Screening	بيانات اسمية + قياسات سريعة	قائمة مرشحين وتحذيرات؛ لا وفورات معتمدة
Engineering Assessment	Q,H,KW + منحنيات OEM + ساعات تشغيل	نقطة تشغيل، كفاءة، فجوة، سيناريوهات
Investment-Grade	تسجيل زمني، تكلفة، قيود، خطة M&V	مشروع مؤهل، CAPEX/OPEX، مخاطر، خطة تحقق

2.6 القياس والتحقق M&V | Measurement & Verification

بعد تنفيذ الإجراء لا يُحسب الوفّر بطرح فاتورتين فقط. يجب تعديل خط الأساس بما يناسب تغير ساعات التشغيل أو التدفق أو الرفع أو الإنتاج عندما تكون هذه المتغيرات مؤثرة. ثم تقارن الطاقة المتوقعة في ظروف ما بعد التنفيذ بالطاقة المقاسة.



شكل: مفهوم خط الأساس المعدل والوفّر المتحقق | Adjusted Baseline and Verified Saving

$$\text{Verified Saving} = \text{Adjusted Baseline Energy} - \text{Measured Post-Action Energy}$$

2.7 الاقتصاد ودورة الحياة | Economics and Life-Cycle View

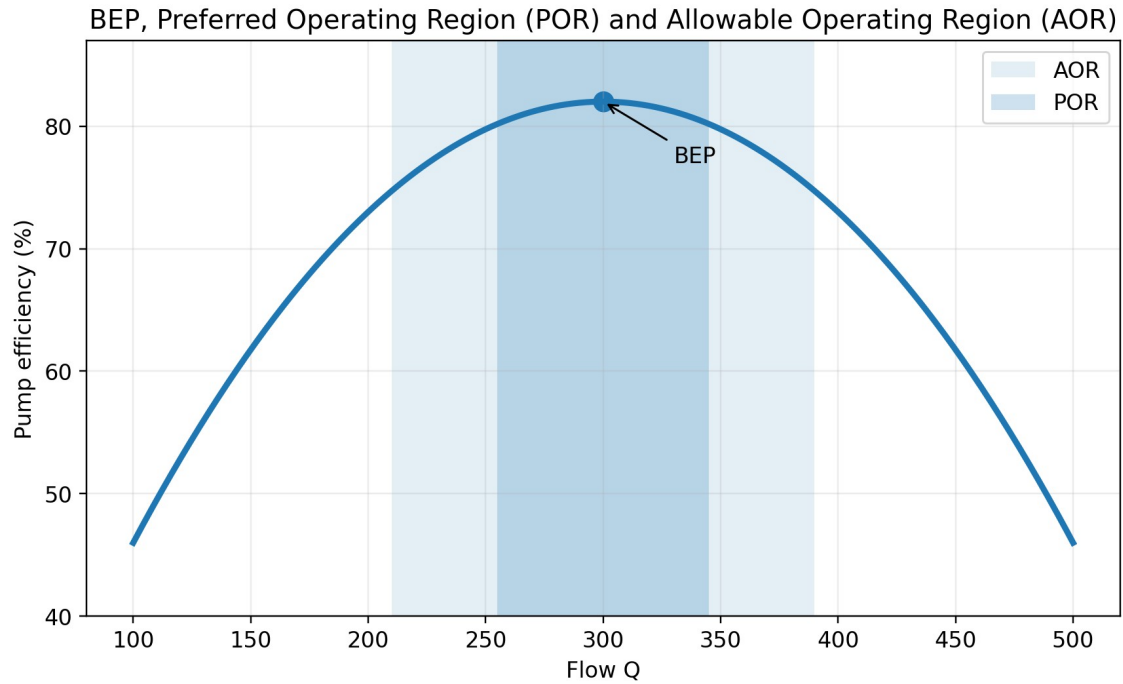
أفضل خيار ليس بالضرورة الأقل CAPEX. يجب حساب تكلفة الطاقة السنوية، الصيانة، قطع الغيار، توقف الإنتاج، وتكلفة الأعطال إلى جانب الاستثمار. في الأنظمة كثيرة الساعات قد يكون خفض Head المطلوب أو إعادة اختيار الطلمبة أكثر جدوى من حل تحكم جزئي.

الفصل الثالث | AOR و POR و BEP والتشخيص العميق والاعتمادية

BEP, POR, AOR & Reliability Diagnostics

خلاصة الفصل

يوضح هذا الفصل الفرق بين أفضل نقطة كفاءة وبين نطاق التشغيل المفضل والنطاق المسموح، ويربط التشغيل خارج هذه المناطق بالضوضاء والاهتزاز والحرارة والتجفيف وقصر عمر المكونات.



شكل: BEP ونطاق POR و AOR | BEP, POR and AOR

3.1 ما هي BEP؟ | Best Efficiency Point

تُعرّف BEP بأنها نقطة التدفق والرفع التي تصل عندها كفاءة الطلمبة إلى أقصى قيمة عند سرعة وقطر مروحة محددين. لكنها ليست وحدها معيار التشغيل الآمن أو الأمثل. وفق ANSI/HI 9.6.3-2024 يجب فهم POR كمجموعة حول BEP لا تندهور فيها الكفاءة والاعتمادية بشكل جوهري، بينما AOR أوسع ويمكن أن تكون فيه الخدمة مقبولة مع انخفاض نسبي في العمر أو الأداء [2].

تصحيح منهجي

الهدف ليس إجبار كل طلمبة على نقطة BEP حرفيًا؛ الهدف هو اختيار وتشغيل النظام بحيث تقع نقطة التشغيل المستقرة داخل POR قدر الإمكان، وتبقى داخل AOR وفق تعليمات المصنع ومتطلبات التطبيق.

3.2 التشغيل عند التدفق المنخفض | Low-Flow Operation

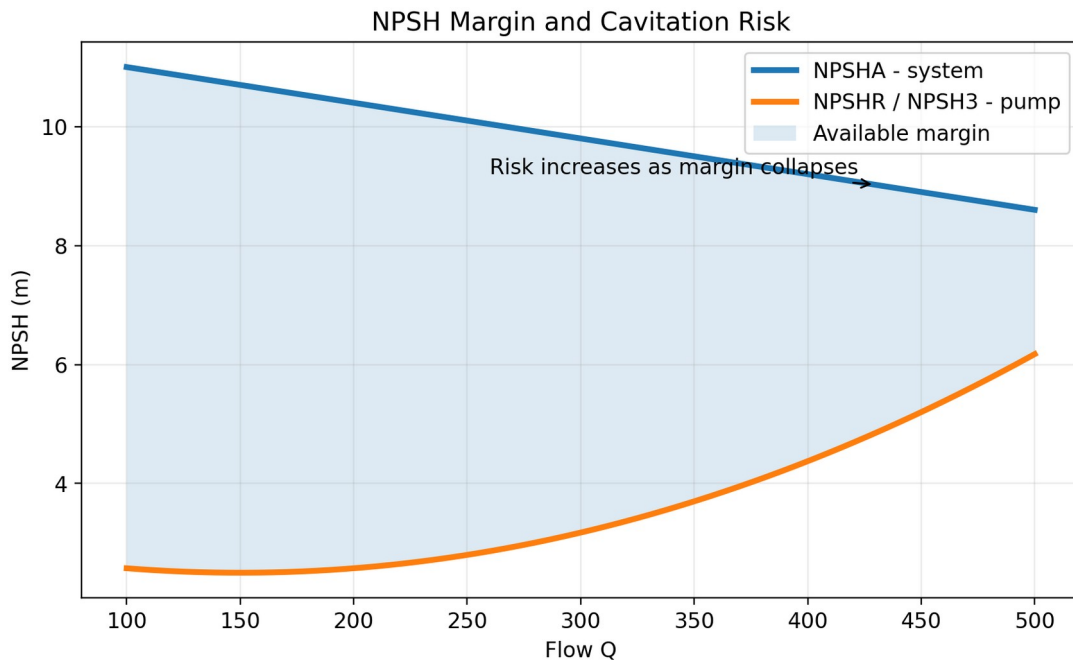
- زيادة إعادة الدوران الداخلي والانفصال الهيدروليكي داخل المروحة.
- ارتفاع الأحمال الشعاعية والاهتزاز والضوضاء في بعض التصميمات.
- ارتفاع الحرارة في حالات التدفق شديد الانخفاض، خصوصًا عند التشغيل قرب الغلق.
- احتمال زيادة تآكل الأختام والمحامل نتيجة ظروف هيدروليكية غير مستقرة.

3.3 التشغيل عند التدفق العالي | Run-out / High-Flow Operation

- ارتفاع القدرة المطلوبة من المحرك في بعض المنحنيات واحتمال تجاوز القدرة الاسمية.
- تراجع هامش NPSH واحتمال بدء التجفيف.

- زيادة السرعات في المواسير والفواقد وقد تتدهور موثوقية السحب.
- زيادة الحساسية لطروف النظام ولتغير مستوى الخزان أو الضغط.

NPSH 3.4 والتجويف | NPSH and Cavitation



شكل: فكرة هامش NPSH ومخاطر التجويف | NPSH Margin and Cavitation Risk

يوضح ANSI/HI 9.6.1-2024 أن NPSHA خاص بالنظام، بينما NPSHR/NPSH3 خاص بالطلبة ويحدده المصنع. هامش الأمان المطلوب لا يُحدد بنسبة واحدة لكل التطبيقات؛ بل يعتمد على نوع الطلبة والسائل والسوق والتشغيل، ولذلك يجب الرجوع إلى الإرشاد المناسب وتوصيات المصنع [3].

$$NPSHA = (P_{\text{surface,abs}} - P_{\text{vapor}}) / (\rho g) + Z_{\text{static}} - h_{f,\text{suction}} + \text{velocity terms}$$

عند انخفاض NPSHA أو ارتفاع NPSHR مع زيادة التدفق تقل المسافة بين المنحنيين، وتزداد مخاطر التجويف وفقد الرفع والضوضاء والتآكل. يجب قياس ضغط السحب ودرجة حرارة السائل والتحقق من الخزان والمناسيب والفواقد.

3.5 مصفوفة الأعراض والتشخيص | Symptoms-to-Diagnosis Matrix

الإجراء التشخيصي	السبب المحتمل	العرض
قارن Q مع OEM curve، أفحص الاهتزاز والمحاذاة	تشغيل يسار / POR / recirculation / misalignment	اهتزاز عالٍ عند تدفق منخفض
احسب NPSHA، راجع حرارة السائل وضغط السحب	Cavitation محتمل	صوت حصي / crackling
راجع system curve و VFD أو trim	Oversizing / control mismatch	ضغط زائد مع خنق صمام
قارن kW مع منحنى القدرة والمحرك	Run-out / high power	تيار مرتفع عند تدفق كبير
اختبار wire-to-water وفحص المروحة والخلوصات	انخفاض كفاءة pump/motor	طاقة مرتفعة مع Q,H صحيحين

3.6 الأحمال الشعاعية والحد الأدنى المستمر | Radial Loads and Minimum Continuous Flow

عند الابتعاد يسار BEP قد تتزايد الأحمال الهيدروليكية غير المتوازنة على المروحة والعمود، وتزداد حساسية الأختام والمحامل. لذلك يجب التمييز بين الحد الأدنى الحراري، والحد الأدنى الهيدروليكي المستقر، وحدود المصنع، وعدم اختزال "minimum flow" في رقم ثابت لجميع الطلبة.

3.7 ارتفاع الحرارة عند التدفق الشديد الانخفاض | Temperature Rise at Very Low Flow

عندما تُستهلك قدرة كبيرة ولا يخرج تدفق كافي، تتحول نسبة أكبر من الطاقة إلى حرارة داخل جسم الطلبة والسائل. في الخدمات الساخنة أو السوائل القابلة للتبخر قد يصبح ذلك خطرًا إضافيًا، ولذلك يُراجع minimum continuous flow و recirculation line إن وُجدت.

3.8 مواسير السحب والمحاذاة | Suction Piping and Alignment

- تجنب جيوب الهواء ونقاط السحب غير المغمورة أو الدوامات عند الخزانات.
- راجع طول الاستقامة قبل السحب والأكواع القريبة واتجاهها بالنسبة لطللمبات end-suction.
- تأكد أن المواسير لا تفرض أحمال فوهات أو إجهادات محاذاة غير مقبولة على الطلمبة.
- افحص strainers/filters المتسخة التي قد تخفض NPSHA أثناء التشغيل.
- وثق مستوى الخزان الأدنى وليس المتوسط فقط عند تقييم أسوأ حالة سحب.

3.9 الاهتزاز والمراقبة الشرطية | Vibration and Condition Monitoring

Hydraulic Institute يشير إلى ANSI/HI 9.6.4 لقياسات الاهتزاز وقيم القبول، وإلى إرشادات المراقبة الشرطية ذات الصلة. في التطبيق العملي تُقرأ الاهتزازات مع Q و H والسرعة وNPSH، لأن نفس نمط الاهتزاز قد ينتج عن سبب ميكانيكي أو هيدروليكي مختلف [10].

3.10 تشخيص سريع حسب موضع التشغيل | Operating-Region Quick Diagnosis

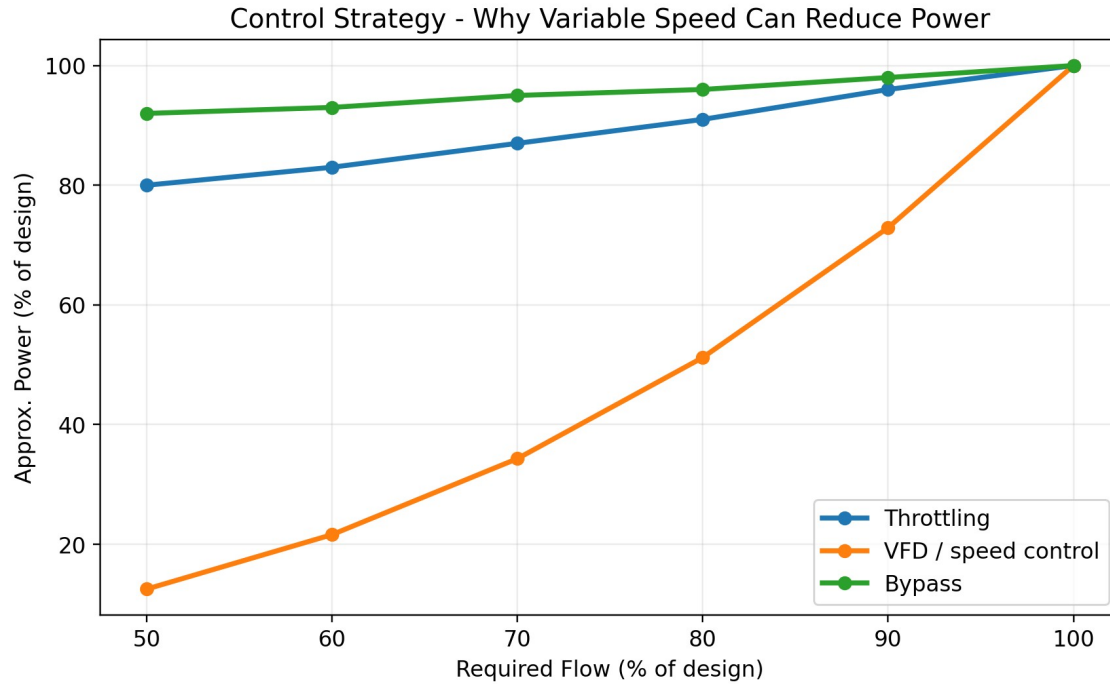
الموضع	علامات محتملة	أولوية الفحص
يسار POR	Low flow, recirculation, radial load	Minimum flow, valve position, pump sizing
داخل POR	أفضل توازن كفاءة/اعتمادية	Maintain and monitor
يمين POR	High flow, motor load, NPSH pressure	NPSHA, motor kW, system resistance
خارج AOR	ارتفاع مخاطر الاعتمادية	Immediate engineering review
قرب shutoff	Heat rise / very low flow	Minimum continuous flow protection
قرب run-out	Power/NPSH limits	Motor and suction-system limits

ملخص تشخيصي

إذا كانت المشكلة تظهر فقط عند نقطة تشغيل محددة، فابدأ بالهيدروليكا. إذا استمرت عند نفس Q و H مع زيادة kW، فانتقل إلى كفاءة الطلمبة/المحرك والحالة الميكانيكية.

خلاصة الفصل

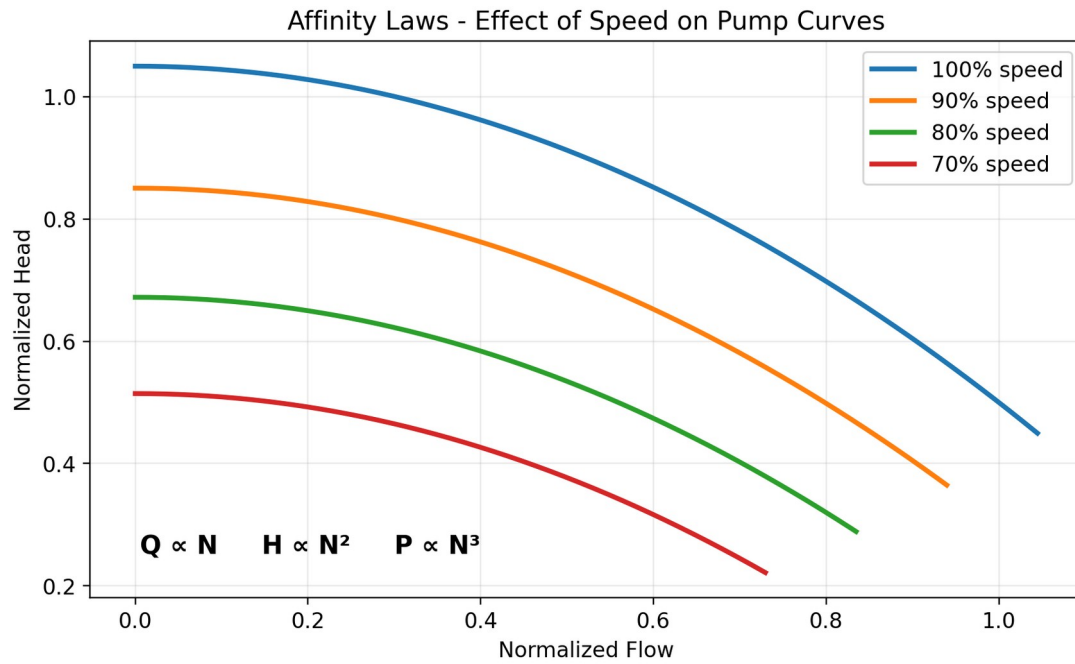
يعالج الفصل الفرق بين التحكم في الطلب باستخدام الخنق أو bypass أو السرعة المتغيرة، ومتى يفيد VFD، ومتى تكون إعادة اختيار الطلمبة أو قص المروحة أو تحسين المواسير أكثر منطقية.



شكل: مقارنة مبسطة لطرق التحكم مع تغير التدفق | Control Strategy Comparison

4.1 التحكم متغير السرعة VFD | Variable Speed Control

عند الأنظمة التي يغلب عليها فقد الاحتكاكي ويتغير الطلب على التدفق، يمكن خفض السرعة أن يقلل التدفق والرفع والقدرة وفق قوانين التشابه ضمن حدود صلاحيتها. ومع ذلك، الأنظمة ذات الرفع الاستاتيكي الكبير لا تتبع علاقة القدرة التكعيبية بنفس الدرجة، لذلك يجب استخدام منحني النظام الفعلي.



شكل: قوانين التشابه وتأثير تغير السرعة | Affinity Laws

$$Q_2/Q_1 = N_2/N_1 \quad | \quad H_2/H_1 = (N_2/N_1)^2 \quad | \quad P_2/P_1 \approx (N_2/N_1)^3$$

4.2 قص المروحة وإعادة الاختيار | Impeller Trimming & Reselection

إذا كان الحمل ثابتًا نسبيًا والطللمبة oversized بشكل مزمن، فقد يكون قص المروحة أو إعادة اختيار الطلمبة أكثر كفاءة من تشغيل VFD دائمًا عند سرعة منخفضة جدًا. يجب استخدام منحنيات الشركة المصنعة وحدود القطر المسموح وعدم التعامل مع قوانين التشابه كبديل عن منحنيات الأداء الدقيقة.

4.3 تشغيل الطلمبات على التوازي | Parallel Pumping

في الأنظمة متعددة الطلمبات، لا يكفي جمع معدلات التدفق الاسمية. عند تشغيل طلمبتين على التوازي يتغير منحنى النظام ونقطة تشغيل كل طلمبة. التسلسل الذكي قد يحافظ على كل وحدة أقرب إلى POR بدل تشغيل عدة وحدات عند أحمال منخفضة.

4.4 المواسير والصمامات | Piping and Valves

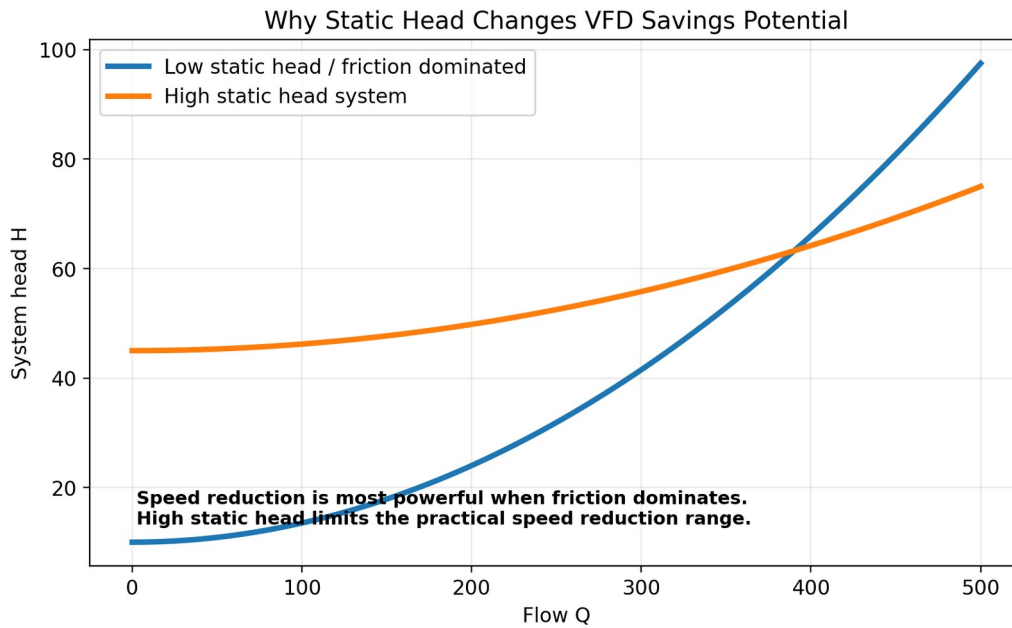
- تجنب السرعات غير الضرورية في خطوط السحب والطرء.
- فحص صمامات الخنق التي تعمل دائمًا بخسارة ضغط كبيرة.
- مراجعة الأكواع القريبة من السحب، عدم انتظام الجريان، ودخول الهواء.
- دراسة تكبير القطر اقتصاديًا عندما تكون الفواقد الاحتكاكية عالية وساعات التشغيل طويلة.

4.5 مقارنة خيارات التحسين | Optimization Decision Matrix

الإجراء	الحالة الأنسب	القيمة	قيود يجب فحصها
VFD	طلب متغير، فواقد احتكاكية مؤثرة	توفير جيد + تحكم	توافق المحرك، harmonics، minimum speed/NPSH
Impeller trim	حمل شبه ثابت وطللمبة oversized	حل دائم منخفض التعقيد	حدود الشركة المصنعة
Pump reselection	عدم تطابق جذري بين الطلمبة والنظام	كفاءة واعتمادية أعلى	CAPEX وتوقف التنفيذ
Pipe resizing	فواقد شبكية كبيرة	خفض head المطلوب	تكلفة مدنية/ميكانيكية
Parallel sequencing	أكثر من طلمبة وحمل متغير	إبقاء الوحدات قرب POR	منطق تحكم وحساسات موثوقة

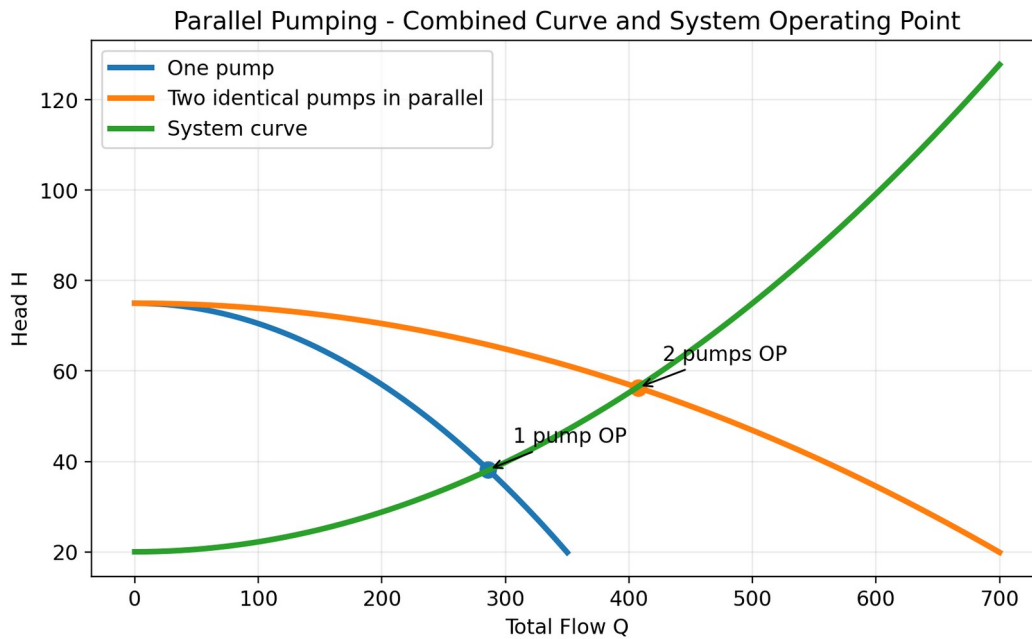
4.6 أثر الرفع الاستاتيكي على قرار VFD | Static Head and VFD Decision

إذا كان H_{static} يستهلك معظم الرفع المطلوب، فإن خفض السرعة بسرعة كبيرة قد يجعل منحنى الطلمبة غير قادر على تجاوز الرفع الاستاتيكي، لذلك يكون مدى التحكم المفيد أضيق. يجب رسم منحنى النظام الفعلي قبل اعتماد نسب توفير مبنية على $P \propto N^3$.



شكل: لماذا يغير الرفع الاستاتيكي وفورات VFD | Static Head vs VFD Potential

4.7 الطلمبات على التوازي والتسلسل الذكي | Parallel Pump Sequencing



شكل: نقطة التشغيل مع طلمبة واحدة وطلمتين على التوازي | Parallel Pump Operating Points

تشغيل طلمبة إضافية لا يضاعف التدفق لأن نقطة التقاطع مع منحنى النظام تتحرك. يجب حساب نقطة تشغيل كل وحدة وكفاءتها بعد التوازي، ثم اختيار staging يحافظ على أقل عدد ممكن من الطلمبات داخل POR مع تحقيق الطلب.

4.8 محركات عالية الكفاءة وجودة القدرة | Motors, Drives and Power Quality

استبدال المحرك وحده لا يعالج mismatch هيدروليكي. ومع ذلك، عند الحاجة إلى استبدال محرك قديم أو oversized، تُراجع كفاءة المحرك عند الحمل الفعلي والتوافق مع VFD ودرجة العزل والتبريد. كما يجب فحص harmonics والتأريض والكابلات في تطبيقات السرعة المتغيرة.

Investment Prioritization | 4.9 ترتيب أولويات الاستثمار

المعيار	وزن مقترح	السؤال
Energy impact	30%	كم kWh/yr يمكن خفضها بعد تأهيل القيود؟
Reliability impact	20%	هل الإجراء يقلل cavitation/vibration/failures؟
CAPEX / Payback	20%	ما فترة الاسترداد وحساسية التعريفة؟
Process risk	15%	هل توجد مخاطر جودة/ضغط/إنتاج؟
Ease of implementation	15%	هل يحتاج توقف طويل أو تعديل شبكة كبير؟

Quick Intervention Selector | 4.10 فحص سريع لاختيار الإجراء

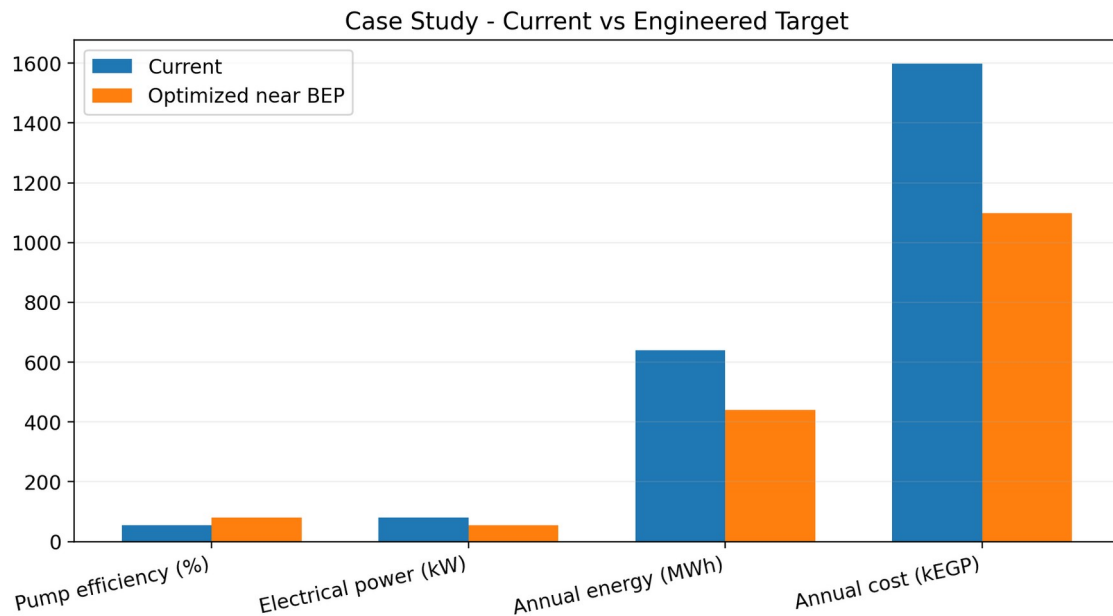
الملاحظة الميدانية	المرشح الأول	ما الذي يؤكد القرار؟
Valve throttled + variable demand	VFD / control reset	System curve + speed range
Constant duty + oversized pump	Trim / reselection	OEM curve and required margin
High friction loss	Pipe/valve optimization	Measured ΔP by section
Multiple pumps at low load	Sequencing	Parallel operating points
Poor NPSH	Suction-system correction	NPSHA worst-case calculation
High kW at correct duty	Pump/motor restoration	Wire-to-water efficiency test

قرار الاستثمار

ابدأ بإجراء منخفض المخاطر وقابل للقياس إذا كان تأثيره واضحًا. الحل الأكثر تقنية ليس دائمًا الحل الأفضل اقتصاديًا أو تشغيليًا.

خلاصة الفصل

توضح الحالة كيفية تحويل القياسات إلى قدرة وكثافة طاقة وفرصة تحسين مشروطة. الأرقام تعليمية ومبنية على افتراض بقاء Q و H المطلوبين ثابتين مع تحسن كفاءة الطلمبة.



شكل: مقارنة الحالة الحالية بالهدف الهندسي | Current vs Engineered Target

5.1 البيانات الحقلية والافتراضات | Measured Data & Assumptions

البند	القيمة	الملاحظة
التدفق Q	300 m³/h	مطلوب للعملية
الرفع الكلي H	50 m	مطلوب للنظام
SG	1.00	ماء
كفاءة الطلمبة الحالية	55%	تشغيل بعيد نسبياً عن أفضل الكفاءة
كفاءة الطلمبة المستهدفة	80%	هدف هندسي قرب منطقة الكفاءة العالية
كفاءة المحرك	93%	ثابتة في المثال
ساعات التشغيل	8,000 h/year	تشغيل سنوي
تعريف الطاقة	2.50 EGP/kWh	افتراض اقتصادي قابل للتعديل

5.2 الحسابات | Calculations

$$P_{hyd} = 300 \times 50 / 367 = 40.87 \text{ kW}$$

$$P_{elec,current} = 40.87 / (0.55 \times 0.93) = 79.91 \text{ kW}$$

$$P_{elec,target} = 40.87 / (0.80 \times 0.93) = 54.94 \text{ kW}$$

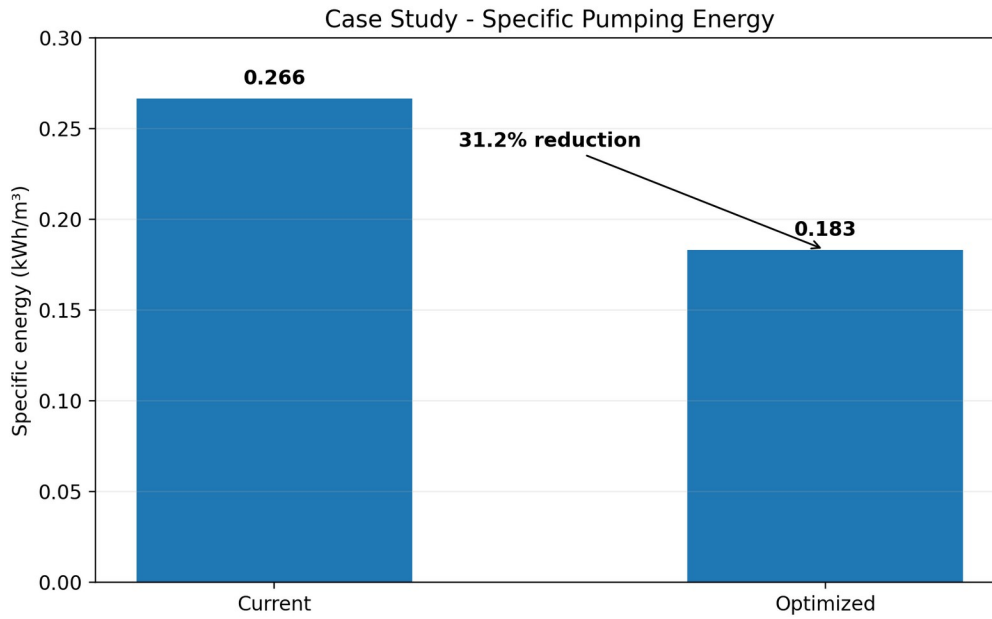
$$\Delta P = 24.97 \text{ kW} \rightarrow 31.25\% \text{ reduction in electrical input}$$

تحسن كفاءة الطلمبة من 55% إلى 80% يمثل زيادة قدرها 25 نقطة مئوية، أو تحسناً نسبياً يقارب 45.5%. يجب عدم كتابة "25%" دون توضيح المقصود.

5.3 الطاقة والتكلفة السنوية | Annual Energy & Cost

المؤشر	الحالي	الهدف	الأثر
القدرة الكهربائية	79.91 kW	54.94 kW	-24.97 kW

الطاقة السنوية	MWh 639.25	MWh 439.48	MWh 199.77 وفر
التكلفة السنوية	EGP 1,598,121	EGP 1,098,708	EGP 499,413 وفر
الاستهلاك النوعي	kWh/m ³ 0.266	kWh/m ³ 0.183	31.25%-



شكل: الطاقة النوعية للضخ في الحالة الدراسية | Specific Pumping Energy

حدود الاستنتاج

الخفض 31.25% في هذه الحالة ناتج عن افتراض تحسن كفاءة الطلمبة مع ثبات التدفق والرفع وكفاءة المحرك لا يُعمم على منشآت أخرى، ولا يُعتمد كوفر محقق قبل قياس ما بعد التنفيذ ومراجعة خط الأساس.

5.4 تحليل الحساسية لكفاءة الطلمبة | Sensitivity to Pump Efficiency

η_{pump}	kW input	MWh/year	Cost (M EGP/year)
55%	79.91	639.2	1.598
60%	73.25	586.0	1.465
65%	67.61	540.9	1.352
70%	62.78	502.3	1.256
75%	58.60	468.8	1.172
80%	54.94	439.5	1.099

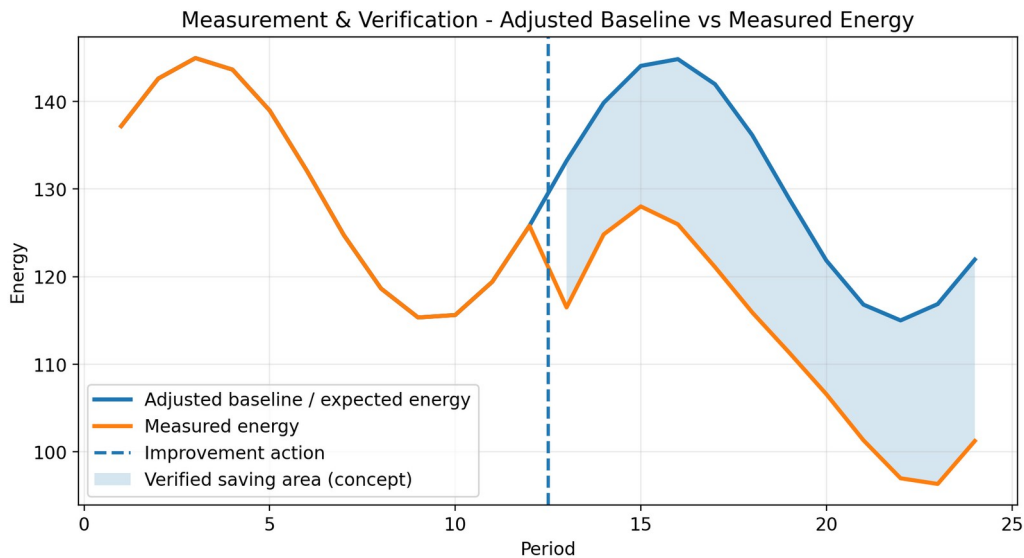
هذا الجدول يوضح أن قيمة التوفير ليست رقمًا ثنائيًا قبل/بعد فقط؛ بل تتدرج مع مستوى الكفاءة الحقيقي القابل للتحقيق ميدانيًا. لذلك يجب استخدام منحني OEM والقياسات بدل افتراض قفزة مباشرة إلى 80%.

5.5 تأهيل الفرصة في دراسة الحالة | Opportunity Qualification

قبل اعتماد الهدف 80% يجب إثبات أن طلمبة مناسبة أو تعديلًا هندسيًا قادر على تحقيق $H=50\text{ m}$ و $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$ داخل POR، مع NPSH margin مقبول وقدرة محرك مناسبة. قد يتبين أن الإجراء الأفضل هو إعادة اختيار الطلمبة، أو trim، أو VFD، أو خفض فواقد الشبكة بدل "رفع كفاءة الطلمبة" كإجراء مستقل.

بوابة التأهيل	التحقق المطلوب في الحالة
Hydraulic duty	$H=50\text{ m}$ و $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$ موثقان كطلب حقيقي للعملية
OEM feasibility	منحني طلمبة/مروحة يحقق duty قرب POR
NPSH	NPSHA به هامش مناسب على أسوأ حالة
Motor/VFD	القدرة والتيار والسرعة ضمن الحدود
Process	لا تأثير سلبي على تبريد العملية أو التحكم
M&V	قياس kW, Q, H قبل/بعد مع ساعات تشغيل موثقة

Case M&V Plan | 5.6 خطة القياس والتحقق للحالة



شكل: خطة التحقق بعد التنفيذ | Post-Action M&V Concept

يُقاس التدفق والضغط والقدرة في حالات تشغيل مماثلة قبل وبعد الإجراء. إذا تغير Q أو H ، لا يجوز استخدام فرق kW الخام وحده؛ بل يُعدل خط الأساس أو يُستخدم نموذج هيدروليكي/تشغيلي يعكس الخدمة الفعلية المطلوبة.

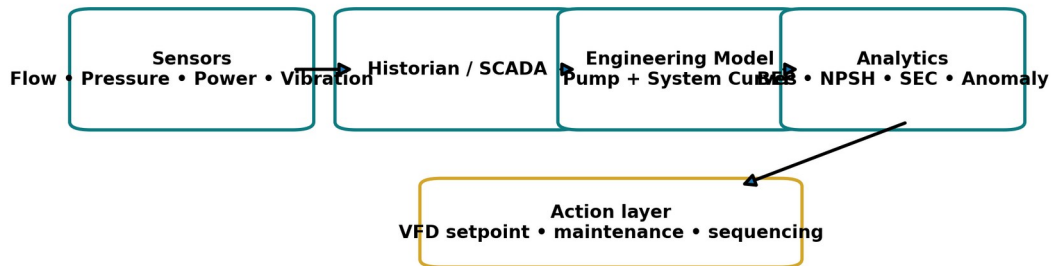
5.7 ما قدمته الدراسة وما لم تثبت | What the Case Demonstrates - and What It Does Not

الدراسة تثبت منطق الحساب وتُظهر كيف يؤثر تحسن η_{pump} على القدرة عند ثبات الخدمة. لكنها لا تثبت أن كل موقع يحقق 31.25%، ولا أن الوصول إلى 80% ممكن بالمعدات القائمة. قيمة الكتاب هي تحويل الرقم إلى سؤال هندسي قابل للتحقق وليس تحويل الفرضية إلى وعد توفير.

خلاصة الفصل

ينقل هذا الفصل التقييم من حملة قياس مؤقتة إلى نظام متابعة مستمر يدمج التدفق والضغط والقدرة والاهتزاز وحالة الصمامات مع نموذج هندسي للطلبة والشبكة.

Digital Twin / Continuous Performance Monitoring Architecture



شكل: معمارية التوأمة الرقمية والمراقبة المستمرة | Digital Twin Architecture

6.1 من القياس الدوري إلى المراقبة المستمرة | Continuous Monitoring

يمكن ربط عدادات التدفق والضغط ومحلل القدرة و VFD/PLC وعدادات الاهتزاز مع Historian أو SCADA. تُحسب مؤشرات الأداء على فترات قصيرة ويُقارن الأداء الفعلي بخريطة الطلبة والنظام؛ ما يسمح باكتشاف الانحراف قبل تحوله إلى عطل أو تكلفة كبيرة.

6.2 مؤشرات لوحة المتابعة | Recommended Dashboard KPIs

KPI	الغرض
Operating flow / head	تحديد نقطة التشغيل
Distance from BEP / POR status	هل التشغيل داخل المنطقة المفضلة؟
Wire-to-water efficiency	كفاءة النظام من الشبكة للماء
Specific energy kWh/m ³	اتجاه استهلاك الطاقة النوعي
NPSH margin indicator	مخاطر السحب والتجويف
Vibration / bearing temperature	الصحة الميكانيكية
Valve position / VFD speed	فهم أسلوب التحكم
Qualified saving opportunity	إشارة قابلة للتحويل إلى مشروع

6.3 الصيانة التنبؤية ليست بديلاً للهيدروليكا | Predictive Maintenance vs Hydraulic Diagnosis

ارتفاع الاهتزاز قد يكون نتيجة عدم محاذاة ميكانيكية، لكنه قد يكون أيضاً نتيجة تشغيل هيدروليكي بعيد عن POR أو تجويف. لذلك يجب دمج بيانات الحالة الميكانيكية مع نقطة التشغيل الفعلية بدل فصل الصيانة عن هندسة النظام.

6.4 منطق الإنذارات الذكية | Smart Alarm Logic

الإشارة	الشرط المركب	الإجراء
Hydraulic deviation	Q/H خارج الخريطة المتوقعة مع kW مرتفع	تحقق من الصمامات ومنحنى النظام
Cavitation risk	ضغط سحب منخفض + ضوضاء/اهتزاز + Q عالٍ	راجع NPSHA ودرجة الحرارة وstrainer
Efficiency drift	kWh/m ³ يرتفع تدريجياً عند duty مماثل	افحص تآكل المروحة والخلوصات
Control loss	VFD speed ثابت وصمام الخنق يغلق	إعادة ضبط control philosophy
Mechanical anomaly	اهتزاز/حرارة ترتفع دون تغير	مسار صيانة ميكانيكية

6.5 جودة البيانات والأمن التشغيلي | OT | Data Quality and OT Governance

التوأمة الرقمية لا تصبح موثوقة بمجرد وجود حساسات. يجب إدارة timestamps، وحدات القياس، bad-quality flags، calibration metadata، وحدود الوصول read-only عند الدمج مع SCADA/PLC، مع مراجعة فرق التشغيل والصيانة لتجنب أي تعديل آلي غير معتمد على setpoints الحرجة.

6.6 قائمة جاهزية التحول الرقمي | Digital Readiness Checklist

البند	Minimum requirement
Flow and pressure tags	Calibrated, timestamped and mapped to the same pump
Electrical power	Real kW / energy, not current-only estimate
Speed / VFD	Frequency or rpm plus control mode
Equipment state	Run/stop and pump sequence status
Historian	Sufficient retention for trends and events
Maintenance log	Work orders/events with timestamps
Data quality	Bad-value flags and unit dictionary
Cybersecurity	Approved read-only analytics access where possible

6.7 تردد البيانات المقترح | Suggested Data Frequency

الغرض	الفاصل الزمني المعتاد
Monthly energy management	min - daily aggregation 15
Operating-point analytics	min 1-5
Transient/control troubleshooting	seconds to sub-minute as needed
Vibration condition monitoring	per condition-monitoring strategy
M&V reporting	interval consistent with baseline/model

EEESC الفصل السابع | النماذج الميدانية وقوائم الفحص لـ

Field Forms & Checklists

خلاصة الفصل

يوفر هذا الفصل قوالب مباشرة للاستخدام أثناء المسح الأولي والقياس التفصيلي وتأهيل فرص التحسين، بما يضمن عدم ضياع بيانات أساسية قبل بناء الاستنتاج.

7.1 استمارة تعريف نظام الضخ | Pump-System Identification Form

البند	القيمة / الإدخال	ملاحظات
Plant / Area		
Pump Tag / Service		
Pump Type / OEM / Model		
Rated Q / H / Speed		
Motor kW / Efficiency		
Control Method	Throttle / Bypass / VFD / On-Off	
Operating Hours		
Process Requirement	= Q = H	
Fluid / SG / Temperature		
?Available OEM Curve	Yes / No	

7.2 قائمة القياسات الميدانية | Field Measurement Checklist

Measurement	Done	Unit	Field note
Flow Q	☐	m³/h	Stable / variable
Suction pressure	☐	bar(g)/bar(a)	Gauge location documented
Discharge pressure	☐	bar(g)	Gauge elevation documented
Electrical kW	☐	kW	phase true power-3
VFD frequency / rpm	☐	Hz / rpm	Record control mode
Fluid temperature	☐	C°	For vapor pressure / density
Valve positions	☐	status / %	Suction + discharge + bypass
Vibration	☐	mm/s or spectrum	Optional for detailed diagnosis

7.3 سجل فرصة التحسين المؤهلة | Qualified Opportunity Register

الحقل	التوثيق
Observed gap	
Evidence / measurements	
Root cause	
Proposed action	
Process constraints	
Expected kW reduction	
Annual hours	
Expected kWh saving	
CAPEX / OPEX	
M&V method	
Decision	Qualified / Needs study / Reject

EEESC Pump-System Assessment Logic



Measured loss → engineering cause → feasible action → constraints satisfied → M&V → Qualified saving opportunity

شكل: تسلسل تأهيل الفرصة من البيانات إلى التحقق | Opportunity Qualification Workflow

7.4 قائمة فحص مسح سريع - 20 دقيقة | Minute Walk-Through Screening-20

Check	Observation
☐	صمام الطرد مخنوق بشكل دائم؟
☐	Bypass مفتوح أثناء التشغيل العادي؟
☐	أكثر من طلمبة تعمل مع طلب منخفض؟
☐	VFD عند سرعة منخفضة جدًا أغلب الوقت؟
☐	فرق ضغط غير ضروري عبر filter/valve؟
☐	صوت cavitation أو اهتزاز واضح؟
☐	لا توجد بيانات flow أو pressure موثقة؟
☐	الطلمبة أكبر بكثير من duty الفعلي؟
☐	المحرك منخفض الحمل معظم الوقت؟
☐	OEM curve غير متاحة أو غير مطابقة لل impeller الحالي؟

إذا ظهرت عدة إشارات من القائمة لا تعني وجود وفر مؤكد، لكنها ترفع أولوية النظام للقياس التفصيلي وفق ISO/ASME 14414 ومنهجية التأهيل الموضحة في هذا الكتاب.

7.5 هيكل تقرير التقييم النهائي | Suggested Final Assessment Report

#	Section	Minimum content
1	Executive summary	Duty, current kW, main diagnosis, qualified opportunities
2	System boundary	P&ID / schematic, included equipment, measurement points
3	Data quality	Instrument accuracy, timestamps, operating conditions
4	Hydraulic analysis	Pump/system curves, BEP/POR/AOR, NPSH
5	Electrical analysis	kW, motor loading, VFD, power quality as relevant
6	Opportunities	Action, energy, cost, reliability, constraints
7	M&V plan	Baseline, variables, meters, post-action period
8	Action register	Owner, priority, CAPEX, due date, status

الفصل الثامن | الملحق الفني والمعادلات السريعة Technical Appendices & Quick Equations

خلاصة الفصل

مرجع سريع للمعادلات والوحدات والمصطلحات التي يحتاجها مهندس الموقع أثناء التقييم والحساب الأولي.

8.1 معادلات سريعة | Quick Formula Sheet

المؤشر	المعادلة
Hydraulic power	$P_{hyd}(kW) = Q(m^3/h) \times H(m) \times SG / 367$
Electrical input	$P_{elec} = P_{hyd} / (\eta_{pump} \times \eta_{motor} \times \eta_{vfd})$
System curve	$H = H_{static} + KQ^2$
Wire-to-water efficiency	$\eta_{wtw} = P_{hyd} / P_{elec}$
Specific energy	$SEC_{pump} = kWh/m^3$
Affinity - flow	$Q_2/Q_1 = N_2/N_1$
Affinity - head	$H_2/H_1 = (N_2/N_1)^2$
Affinity - power	$P_2/P_1 = (N_2/N_1)^3$
Annual energy	$E_{yr} = kW \times \text{operating hours}$
Annual cost	$Cost = E_{yr} \times \text{tariff}$

8.2 تحويلات وحدات مفيدة | Useful Unit Conversions

الوحدة	التحويل
bar 1	kPa ≈ 10.197 m water head at 4°C 100
m³/h 1	L/s 0.2778
L/s 1	m³/h 3.6
hp 1	kW 0.7457
psi 1	kPa 6.8948
ft 1	m 0.3048
gpm (US) 1	m³/h 0.2271
kWh 1	MJ 3.6

8.3 قاموس المصطلحات | Glossary

اختصار	المصطلح	المعنى
BEP	Best Efficiency Point	نقطة أعلى كفاءة للطلمية عند سرعة/قطر محددين
POR	Preferred Operating Region	نطاق مفضل حول BEP يحافظ على الكفاءة والاعتمادية
AOR	Allowable Operating Region	نطاق أوسع مقبول للخدمة بشروط المصنع
NPSHA	Net Positive Suction Head Available	الهامش المتاح من النظام عند السحب
NPSHR / NPSH3	Pump-required suction condition	متطلب تحدده خصائص الطلمية/الاختبار
VFD / VSD	Variable Frequency/Speed Drive	تحكم في السرعة/التردد
OEM	Original Equipment Manufacturer	الشركة المصنعة الأصلية
M&V	Measurement & Verification	القياس والتحقق من الوفورات
PSAP	Pump System Assessment Professional	اعتماد مهني من Hydraulic Institute لتقييم الأنظمة

8.4 ورقة قرار سريعة | Quick Decision Rules

- إذا كان الصمام مخنوقًا والطلب متغيرًا: اختبر VFD بمنحنى النظام، ولا تفترض $P \propto N^3$ مباشرة.
- إذا كان التشغيل ثابتًا والطلمية oversized: قارن trim أو reselection قبل الاستثمار في VFD.

- إذا كان NPSH margin ضعيفًا لا ترفع التدفق أو السرعة قبل معالجة السحب.
- إذا كانت عدة طلبات تعمل بالتوازي: أعد حساب operating points قبل تغيير sequencing.
- إذا كان kWh/m³ مرتفعًا مع duty ثابت: افصل فقد الطلمية عن فقد الشبكة والمحرك.
- إذا كانت البيانات غير متزامنة أو غير موثقة: صنف النتيجة Screening لا Investment-Grade.

8.5 أخطاء شائعة يجب تجنبها | Common Engineering Mistakes

- اعتبار nameplate flow هو التدفق الفعلي دون قياس.
- حساب head من ضغط الطرد فقط وإهمال ضغط السحب والمناسيب.
- استخدام تيار المحرك كبديل مباشر عن kW.
- اعتبار BEP نقطة إلزامية واحدة دون POR/AOR.
- تطبيق قوانين التشابه خارج نطاقها أو مع تغير كبير في static head دون منحنى نظام.
- اعتبار فرق القدرة بالكامل وفرًا مؤهلًا قبل فحص العملية.
- إهمال NPSH عند زيادة السرعة أو التدفق.
- استخدام منحنى OEM غير مطابق لقطر المروحة أو السرعة الحالية.

Pocket Rule

Measure Q + suction pressure + discharge pressure + real kW + speed at the same operating condition. Without these five elements, diagnosis should normally remain preliminary

الخاتمة والتوصيات الاستراتيجية
Conclusions & Strategic Recommendations

تحسين نظام الضخ ليس مشروع طلمبة فقط. القيمة الأكبر تتحقق عندما يُعاد النظر في الطلب نفسه، منحنى النظام، أسلوب التحكم، نقطة التشغيل، الكفاءة الفعلية، وهامش NPSH والاعتمادية في إطار واحد.

- ابدأ بالقياس، لا بلوحة الاسم؛ القدرة والتدفق والرفع الفعلي هي أساس التشخيص.
- استهدف التشغيل داخل POR قدر الإمكان بدل اختزال الأداء في رقم BEP وحده.
- افصل بين الرفع الاستاتيكي والفقد الاحتكاكي قبل اختيار VFD أو تطبيق قوانين التشابه.
- لا تعتبر الخنق أو bypass "هدرًا قابلاً للاسترداد بالكامل" قبل التحقق من متطلبات العملية.
- اربط فرص الطاقة بالاعتمادية؛ انخفاض الاهتزاز والتجفيف وتآكل الأختام جزء من القيمة الاقتصادية.
- استخدم M&V لإثبات الوفرة بعد التنفيذ، ولا تحول التوقع الهندسي إلى "وفر محقق" قبل القياس.
- في الأنظمة الحرجة، انتقل من التدقيق الدوري إلى مراقبة رقمية تربط الطاقة والهيدروليكا والصيانة.

الخلاصة

الهدف النهائي ليس تشغيل الطلمبة بأعلى كفاءة نظرية منفردة، بل تشغيل المنظومة بأقل طاقة ممكنة لتحقيق الخدمة المطلوبة مع الحفاظ على الاعتمادية والسلامة والجودة.

خارطة تنفيذ عملية - 90 يومًا | Day Implementation Roadmap-90

الفترة	العمل	المخرج
0-15 يوم	حصر الأنظمة الحرجة، جمع المنحنيات، walk-through	قائمة أولوية للقياس
15-35 يوم	قياسات Q/H/KW/NPSH screening وتثبيت operating points	Baseline هندسي لكل نظام
35-60 يوم	تأهيل الخيارات: VFD/trim/reselection/piping/sequencing	Opportunity register مع قيود ومخاطر
60-90 يوم	تنفيذ M&V، quick wins، تحديث setpoints والإجراءات	وفر متحقق + خطة المشروعات الأكبر

بعد أول 90 يومًا، يفضل إدراج مؤشرات الضخ الرئيسية ضمن مراجعات أداء الطاقة والصيانة الدورية حتى لا يعود النظام تدريجيًا إلى نفس نقطة التشغيل غير المثلى.

- [1] ISO/ASME 14414:2019 - Pump system energy assessment. ISO official standard page:
<https://www.iso.org/standard/71534.html>
- [2] ANSI/HI 9.6.3-2024 - Rotodynamic Pumps - Guideline for Operating Regions. Hydraulic Institute / ANSI, approved 2024.
- [3] ANSI/HI 9.6.1-2024 - Rotodynamic Pumps - Guideline for NPSH Margin. Hydraulic Institute.
- [4] ISO 50002-3:2025 - Energy audits - Part 3: Guidance for conducting an energy audit using ISO 50002-1 in processes.
<https://www.iso.org/standard/83663.html>
- [5] ISO 50001:2018 - Energy management systems - Requirements with guidance for use; edition confirmed current in 2024.
<https://www.iso.org/standard/69426.html>
- [6] U.S. Department of Energy - Pump Systems resources, tip sheets and assessment tools.
<https://www.energy.gov/cmei/ito/pump-systems>
- [7] U.S. Department of Energy - MEASUR industrial system assessment suite. <https://www.energy.gov/cmei/ito/measur>
- [8] Hydraulic Institute - Pump System Assessment Professional (PSAP) / Pump System Certification resources.
<https://www.pumps.org/pump-system-certifications/>
- [9] Hydraulic Institute Data Tool - definitions for BEP, POR, AOR, NPSHA, NPSHR and affinity rules. <https://datatool.pumps.org/>
- [10] Hydraulic Institute Pump FAQs - references for operating regions, NPSH margin, vibration and condition monitoring guidelines. <https://www.pumps.org/resources/pump-faqs/>

تاريخ مراجعة المراجع الإلكترونية: أكتوبر 2026.

EEESC

الذكاء وراء كل كيلو واط

«ليس كل فقد فرصة توفير... ابحث عن الفرص المؤهلة»

مركز المعلومات والمعرفة بالشركة المصرية لكفاءة الطاقة والاستدامة

Information & Knowledge Center - Egyptian Energy Efficiency & Sustainability Company (EEESC)

معًا نحو صناعة أكثر كفاءة واستدامة.

Together for a More Efficient and Sustainable Industry