دراسة مخبرية لتحسين كفاءة فاصل الرمل من خلال تحليل تأثير ضغط المدخل وخصائص المائع

الاسم: محمود محمد الموسى[1] **المشرف: أ.د. محمود حديد[2]**

الملخص:

فاصل الرمل (الهيدروسيكلون) هو جهاز فصل يعتمد على مبدأ الطرد المركزي لفصل الجسيمات الصلبة مثل الرمل والفتات الصخري عن سائل الحفر. يُستخدم على نطاق واسع في صناعات مثل التعدين ومعالجة المياه، وتبرز أهميته في الصناعة النفطية بوصفه عنصراً أساسياً في منظومة تنظيف سائل الحفر، لما له من دور في فصل الجزيئات الصلبة من سائل الحفر والحفاظ عليها ضمن الحدود المسموح بها وبالتالي الحفاظ على مواصفاته التكنولوجيا وتجنب انسداد الأنابيب وتآكل المضخات.

في هذا البحث، تم اعتماد نهج تجريبي مخبري ، بإجراء تجارب مخبرية على جهاز فاصل رمل المصمّم وفق مواصفات API وتمت التجارب على عينة مُحضّرة من الماء وعينة اخرى محضرة من سائل الحفر تحت ظروف تشغيلية متنوعة، عبر تغيير ضغط مدخل الجهاز. حيث أُجريت سلسلة تجارب أولية باستخدام الماء، ثم أُعيدت التجارب باستخدام سائل الحفر ، مع الحفاظ على نفس ظروف التشغيل، وذلك لتقييم سلوك وكفاءة الفصل عند تغير المائع وظروف الضغط.

أظهرت النتائج أن كفاءة الفصل تزداد مع ارتفاع ضغط المدخل، كما تبين أن المائع المستخدم يؤثر بوضوح على كفاءة الأداء، حيث كانت الكفاءة أعلى عند استخدام الماء مقارنة بسائل الحفر.

الكلمات المفتاحية: كفاءة الفصل، فاصل الرمل، الهيدروسيكلون، سائل الحفر، ضغط المدخل.

Laboratory Study on Enhancing the Efficiency of the Desander Through Analysis of Inlet Pressure and Fluid Properties

Abstract:

Desander (hydrocyclone) is a separation device that operates on the centrifugal principle to separate solid particles such as sand and rock cuttings from fluids. It is widely utilized in industries including mining and water treatment, with particular significance in the petroleum industry as a crucial component of drilling mud cleaning systems. Its function involves removing solid particles from the drilling fluid, thereby maintaining its technological specifications and preventing pipe blockages and pump erosion.

This study employed an experimental laboratory approach, conducting tests on a desander unit designed according to API specifications. Experiments were performed on both a water-based sample and a drilling mud sample under varying operational conditions by adjusting the device's inlet pressure. An initial series of tests was conducted using water, followed by repeated experiments with drilling mud under identical operational parameters to evaluate separation behavior and efficiency under different fluid and pressure conditions.

The results demonstrated that separation efficiency increases with higher inlet pressure. Furthermore, the testing fluid significantly influenced performance efficiency, with water demonstrating higher separation efficiency compared to drilling mud.

Keywords: Hydrocyclone, Desander, Drilling Fluid, Solid–Liquid Separation, Inlet Pressure, Efficiency.

1. المقدمة:

يُشكّل الحفاظ على خصائص سائل الحفر تحدياً بالغ الأهمية في صناعة النفط والغاز، حيث تؤدي النسبة المرتفعة للمحتوى الصلب غير المرغوب فيه_ وبشكل خاص الحبيبات الرملية _ إلى تأثيرات تشغيلية خطيرة تتراوح بين انسداد الأنابيب، وتسريع معدلات تآكل المعدات، وارتفاع تكاليف الصيانة بشكل ملحوظ. وتبرز خطورة هذه المشكلة في ظروف حفر البئر أيضاً لما تسببه من مشاكل داخل البئر متمثلة بزيادة الضغط داخل البئر بشكل غير مدروس، مما يستلزم وجود أنظمة تنظيف فعّالة تعمل على إطالة عمر سائل الحفر والحفاظ على خصائصه الريولوجية.

في هذا الإطار، يمثل جهاز الهيدروسيكلون (فاصل الرمل) حلاً هندسياً متقدماً بفضل تصميمه البسيط، وخلوه من الأجزاء المتحركة، وتكلفة صيانته المنخفضة، وقدرته على فصل الجسيمات الدقيقة التي يتراوح قطرها بين 40–175 ميكرومتر قدر الإمكان وضبطها ضمن الحدود المسموح بها والتي ينصح بألا تتجاوز 5% وزناً . ويعتمد مبدأ عمل هذا الجهاز على الاستفادة من قوى الطرد المركزي الناتجة عن الحركة الدوامية للمائع داخل جسم الفاصل، حيث تُدفع الجسيمات الأكثر كثافة نحو الجدار الداخلي لتسقط بعد ذلك عبر الفتحة السفلية، بينما يخرج المائع المعالج عبر الفتحة العلوية.

على الرغم من هذه المزايا الواضحة، تواجه التصميمات التقليدية للهيدروسيكلون تحديات متعددة تتعلق بالشكل الهندسي وكفاءة الفصل، خاصة عند التعامل مع التراكيز العالية للجسيمات الصلبة.

وقد كشفت الدراسات الحديثة عن تأثير العوامل التصميمية والمؤشرات التشغيلية على أداء الجهاز، حيث أظهرت دراسة Wang تأثير طول الجزء المخروطي على كفاءة الفصل حيث ان الجزء الاسطواني مهمته استقبال المائع المحمل بالحبيبات الصلبة بينما للجزء المخروطي دور بارز في عملية الفصل وكلما كان الجزء المخروطي اطول

كانت كفاءة الفصل أفضل[1] ، بينما اقترح Ghodrat أشكالاً مخروطية غير تقليدية (مقعرة ومحدبة) وتفوق التصميم المحدب على التصميم التقليدي من حيث كفاءة الفصل وتوزع الضغط [2] ، وأضاف Liu حجرة حلزونية عند مدخل الفاصل عملت على توزيع الحبيبات الصلبة وزيادة كفاءة فصل الحبيبات الخشنة [3] ، في حين صمم Feng Li فاصلاً بمدخل مزدوج وزاوية دخول مختلفة وبين أثر هذه التعديلات زيادة القوة الطاردة المركزية والتي تنعكس بشكل مباشر على كفاءة الفصل[4] ، و Cui أكد على أهمية قطر فتحة خروج الجزيئات الصلبة (الفتحة السفلية للفاصل) ومن خلال دراسته تبين أن القطر المثالي لفتحة الخروج السفلية تتراوح من 0.24D إلى 0.36D حيث D قطر الجزء الاسطواني للفاصل.[5]

من ناحية أخرى، ركزت أبحاث أخرى على المؤشرات التشغيلية، حيث توصل Mokni إلى أن ارتفاع درجة حرارة سائل التغذية يقلل اللزوجة ويزيد من كفاءة الفصل[6] ، بينما أكدت دراسة Senfter على تأثير خصائص المواد المصنعة لجدران الفاصل في كفاءة الفصل، حيث أظهرت النتائج أن الفواصل المصنعة من الزجاج تمتاز بكفاءة فصل عالية مقارنة بالفواصل التقليدية[7] كما بينت دراسة Zhang أن تحويل المقطع الدائري للقسم الاسطواني إلى مقطع ذي شكل بيضوي (إهليلجي) يمكن أن يخفض فقدان الضغط بنسبة 10–30% مع تحقيق زيادة طفيفة في الكفاءة[8] .

على الرغم من هذا الزخم البحثي الملحوظ، تبقى هناك حاجة ماسة لإجراء تقييم مخبري شامل لتأثير المتغيرات التشغيلية الرئيسية _ وعلى رأسها ضغط المدخل وخصائص المائع _ في ظل ظروف تحاكي البيئات التشغيلية الحقيقية. حيث إن معظم الدراسات السابقة ركزت على تحسين التصميم الهندسي دون دراسة شاملة للتفاعل المعقد بين هذه المتغيرات التشغيلية وكفاءة الفصل.

انطلاقاً من هذه الفجوة البحثية، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تقييم عملي مخبري متكامل لعملية فصل الرمل عن سائل الحفر باستخدام جهاز فاصل الرمل، مع التركيز على تأثير متغيرين رئيسيين هما: ضغط المدخل، وخصائص المائع، مع تثبيت العوامل التصميمية الأخرى. كما تسعى الدراسة إلى تحديد النطاق الأمثل لضغط التشغيل الذي يحقق أعلى كفاءة فصل، مع تحليل تأثير الخصائص الفيزيائية للمائع على أداء الجهاز. وتمثل هذه الدراسة إضافة نوعية للمعرفة العلمية من خلال تقديم بيانات تجريبية دقيقة يمكن أن تساعد المهندسين والعاملين في مجال هندسة الحفر على تحسين أداء أنظمة تنظيف سائل الحفر، وبالتالي خفض تكاليف التشغيل وزيادة الكفاءة الإنتاجية في حقول النفط والغاز.

2. التصميم الهندسي لجهاز فاصل الرمل:

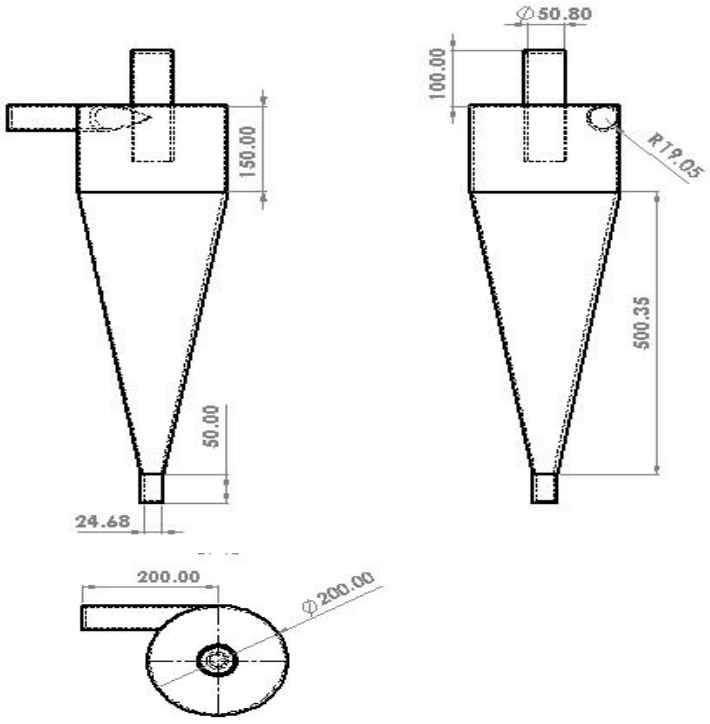
تم العمل على جهاز فاصل الرمل الموجود في مخبر كلية الهندسة البترولية في الجامعة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا والمُصمم وفق مقاييس حقلية تتناسب مع واقع التشغيل في مواقع الحفر، وذلك بغرض إجراء تجارب مخبرية تخدم في تقييم كفاءة فصل الرمل عن سائل الحفر.

1.2.المكونات الرئيسية للجهاز:

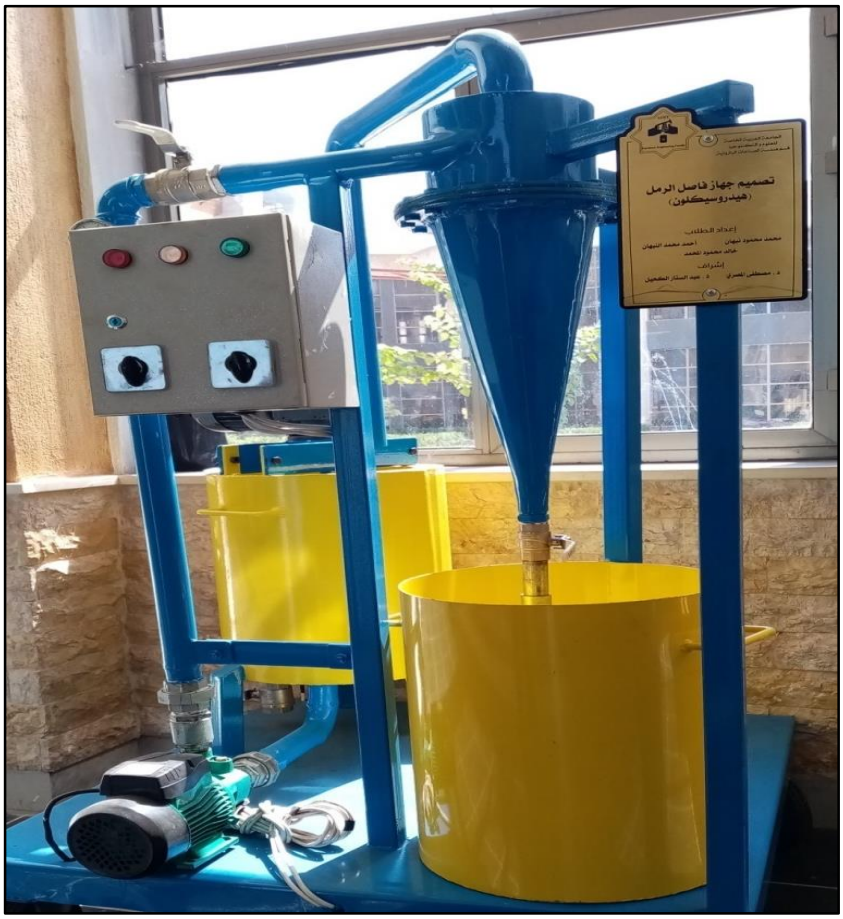
يعرض الشكل (1) رسماً تخطيطياً للجهاز، في حين تُظهر الصورة في الشكل (2) الجهاز الفعلي داخل مخبر الحفر في الجامعة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا.

الجدول (1): البارامترات التصميمية لفاصل الرمل.

البارامترات التصميمية	الابعاد (mm)
قطر الجزء الاسطواني	200
قطر فتحة المدخل	38.1
قطر فتحة المخرج العلوي	50.8
قطر فتحة المخرج السفلي	24.68
طول المخرج العلوي ضمن جسم الفاصل	100
طول الجزء الاسطواني	150
طول الجزء المخروطي	500



الشكل (1) يبين رسم تخطيطي لجهاز فاصل الرمل



الشكل (2) يبين جهاز فاصل الرمل ومكوناته الرئيسية

نميز من الشكل السابق المكونات الأساسية لفاصل الرمل هي على التالي:

1.1.2.منظومة تحضير سائل الحفر:

- خزان التحضير: خزان أسطواني سعة 50 لتر.

- الخلاط: محرك دورانه 80 دورة/دقيقة، مزوّد بشفرتين (علوية وسفلية) لخلط السائل بكفاءة.
- مضخة سائل الحفر (الاستطاعة: 0.75 Kw –الضغط: 4 bar).

2.1.2. خزان استقبال الرمل:

خزان مخصص لاستقبال الحبيبات الصلبة أسفل القسم المخروطي.

3.1.2.التوصيلات:

أنابيب وخراطيم مقاومة للضغط العالي، لتأمين حركة سائل الحفر عبر المنظومة.

4.1.2. الملحقات الأخرى الموجودة على جهاز فاصل الرمل:

صمامات على مدخل السائل والمخرج السفلي للسائل ومقياس ضغط على خط الدخول.

3. منهجية القياس والتجربة:

1.3. قياس نسبة الرمل:

تم استخدام جهاز Sand Content Kit لقياس نسبة الجسيمات الصلبة المتبقية، وذلك وفق الخطوات التالية:

1. رج العينة جيداً.
2. مزج 50 مل من العينة مع ماء نقي حتى 100 مل.
3. ترشيح المزيج عبر منخل (Mesh 200).
4. غسل الرمل بالماء النقي وترسيبه في أنبوب مدرج.
5. قراءة النسبة مباشرة وتسجيلها.

الشكل (3) يبين جهاز قياس نسبة الرمل

وتكون عليه القراءة المأخوذة على جهاز Sand Content Kit تمثل نسبة الرمال مع السائل النظيف الخارج من فتحة الخروج العلوية.

وبتطبيق العلاقة (1-1) نحصل على كفاءة الفصل كنسبة مئوية التي يبديها جهاز فاصل الرمل (الهيدروسيكلون).[9]

$$E = \frac{N - N_{\circ}}{N} \times 100 \qquad (1-1)$$

حيث:

N–نسبة الجزيئات الصلبة في السائل قبل عملية الفصل.

$N_{\circ}$–نسبة الجزيئات الصلبة في السائل بعد عملية الفصل.

5- منهجية العمل التجريبي:

5-1 باستخدام الماء:

تم تحضير 30 لتراً من الماء يحتوي على رمل بنسبة 15% وزناً، وأجريت أربع تجارب مستقلة على الجهاز باستخدام الماء كسائل حامل للحبيبات الرملية، وبأربعة ضغوط تشغيل مختلفة، وقد تم ملاحظة ان زيادة الضغط على مدخل الفاصل تؤدي الى زيادة القوة الطاردة المركزية وبالتالي زيادة كفاءة الفصل ومن الملاحظ ان كفاءة الفصل مرتفعة نسبياً عند استخدم الماء. وكانت القراءات على جهاز Sand Content Kitموضحة في الجدول (2):

الجدول (2): كفاءة الفصل باستخدام الماء (نسبة الرمل 15% وزناً).

ضغط المدخل bar	نسبة الرمل في السائل المعالج %	كفاءة الفصل %
4	3	80
4.8	2.5	83.4
5.4	2	86.7
6	1	93.4

5-2 باستخدام سائل حفر:

تم تكرار التجارب ذاتها باستخدام سائل حفر لزوجته (15 cp)، وثم أضافة رمل بنسبة 15 % وزناً، وبأربع تجارب مستقلة وعند أربع قيم للضغط تم دراسة تأثير زيادة الضغط على كفاءة الفصل ،وكانت القراءات على جهاز Sand Content Kit موضحة في الجدول (3):

الجدول (3): كفاءة الفصل باستخدام سائل الحفر (نسبة الرمل 15% وزناً).

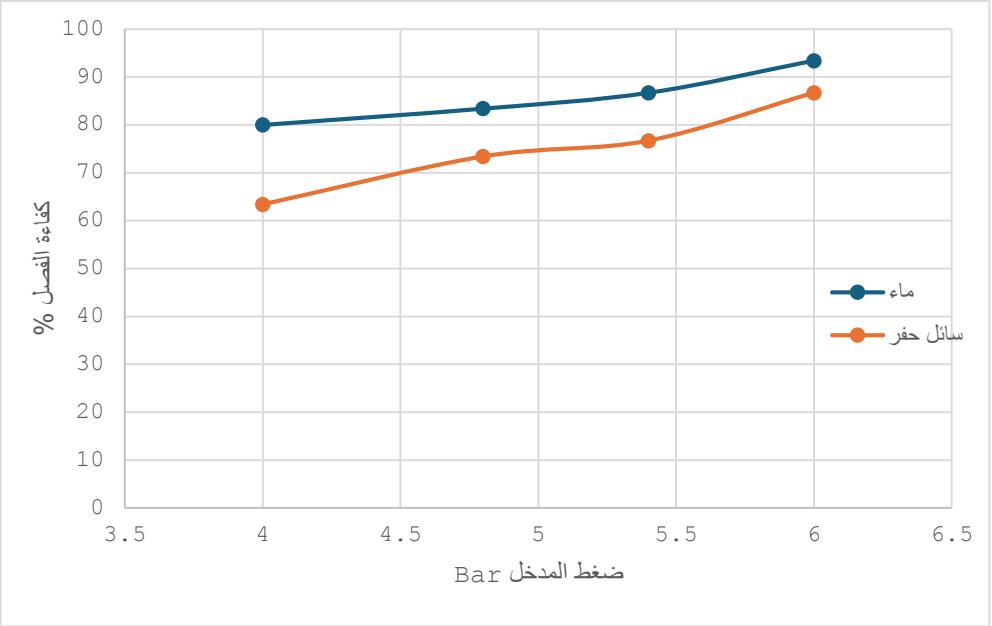
ضغط المدخل bar	نسبة الرمل في السائل المعالج %	كفاءة الفصل %
4	5.5	63.4
4.8	4	73.4
5.4	3.5	76.7
6	2	86.7

تم التأكيد من خلال هذه الدراسة على تأثير لنوع المائع المستخدم على كفاءة فاصل الرمل (الهيدروسيكلون)، حيث أظهرت المقارنة بين الماء وسائل الحفر المحضر مخبرياً (بلزوجة 15 cp) اختلافاً جوهرياً في كفاءة الفصل. فكما هو مبين في الشكل (4) مقارنة بين تأثير المائعين (ماء_ سائل حفر) على كفاءة الفصل حيث سجلت كفاءة فصل الرمل عند استخدام الماء كفاءة عالية تراوحت بين 80% إلى 93.4% تحت ضغوط تشغيلية متدرجة (4 – 6 bar)، انخفضت هذه الكفاءة بشكل ملحوظ عند استخدام سائل الحفر لتبلغ 63.4% إلى 86.7% تحت نفس الظروف التشغيلية.

يفسر هذا التفاوت إلى الخصائص الريولوجية للمائعين، إذ تُعد اللزوجة العامل المهيمن على كفاءة الفاصل حيث تؤدي زيادة لزوجة سائل الحفر إلى إعاقة الحركة النسبية للجسيمات الصلبة،

مما يقلل من فعالية القوة الطاردة المركزية في فصـــل الحبيبات الرملية كما تســـاهم الزيادة في اللزوجة في رفع مقاومة الجريان الداخلي، محدثةً إعاقة ترسيب الجسيمات نحو المخرج السفلي. هذه النتائج تتماشى مع دراسات سابقة (كدراسة Mokni) التي أكدت العلاقة العكسية بين لزوجة المائع وكفاءة الفصل.[6]

مما يبرز أهمية تحسين خصائص سوائل الحفر أو تعديل معاملات التشغيل لتعويض هذا الأثر السلبي.



الشكل (4): تأثير قيمة ضغط المدخل على كفاءة الفصل

نستنتج إن بقاء 2% من الجسيمات الصلبة (ما يعادل 13.3% من إجمالي الرمل الداخل) في السائل المعالج يعتبر ضمن النطاق المقبول. هذا الاستنتاج يقود إلى أن الهيدروسيكلون ذو القطر 8 أنش، وتحت هذه الظروف الريولوجية، يكون فعالاً في فصل الجسيمات ذات الابعاد 130 ميكرون تقريباً بشكل فعال.

5. نتائج الدراسة

أسفرت التجارب العملية عن عدد من النتائج المهمة التي تعزز من فهم آلية عمل جهاز فاصل الرمل تحت ظروف تشغيلية مختلفة:

1. تأثير الضغط على كفاءة الفصل:

لوحظ بشكل واضح أن رفع ضغط مدخل الجهاز أدى إلى زيادة كفاءة الفصل لكل من الماء وسائل الحفر، و بشكل واضح عند ضغوط أعلى منbar 5 وذاك عند استخدام سائل حفر أما عند استخدام الماء كمائع لحمل الحبيبات الرملية فأن تأثير ارتفاع ضغط المدخل ضئيل جداً أن هذا الارتفاع يقابله انخفاض في زمن بقاء السائل داخل الجهاز، ما قد يُضعف عملية الفصل في بعض الحالات. لذلك، يُوصى بإيجاد توازن بين الضغط وزمن البقاء لضمان أعلى كفاءة ممكنة، كما أن الزيادة الغير مدروسة للضغط قد تؤدي الى زيادة اضطراب الجريان داخل الفاصل وبالتالي ارتداد الجزيئات الصلبة عن الجدران الداخلية للفاصل وخروجها مع تيار السائل النظيف و بالتالي انخفاض في كفاءة الفصل.

2. تأثير نوع المائع:

أظهرت الدراسة أن الماء يُحقق كفاءة فصل أعلى من سائل الحفر عند نفس شروط التشغيل، ويُعزى ذلك إلى انخفاض لزوجة الماء، ما يُسهم في زيادة سرعة الجسيمات النسبية وانفصالها بفعل الطرد المركزي.

3. إمكانية تحسين الأداء عبر التعديلات التصميمية:

يُمكن تحسين كفاءة الجهاز بشكل أكبر من خلال تقليل قطر فتحة الخروج السفلية، مما يزيد من زمن بقاء الجسيمات داخل الفاصل ويُحسن من أداء الجهاز، خصوصاً عند استخدام موائع لزجة، والقطر المثالي لفتحة الخروج السفلية كما وردت في الدراسة التي قدمها Cuiهي أكبر من $0.24D$ وأقل من $0.36D$.[9]

4. الاستفادة من تطبيق هذا العمل صناعياً:

هذه النتائج تُوفر أساساً عملياً قابلاً للتطبيق في مواقع الحفر ، وتُساعد في تحسين كفاءة تشغيل وحدات فصل الرمل بتعديلات بسيطة ومنخفضة التكلفة.

المراجع العلمية

أ – المراجع الأجنبية:

1. Wang and al, 2006 **Numerical Study of Particle-Fluid Flow in Hydrocyclones with Different Body Dimensions**, Minerals Engineering.

2. Ghodrat and al, 2013 **Numerical Analysis of Hydrocyclones with Different Conical Section Designs**, Minerals Engineering.

3 .Liu P.K, and al, 2008 **Enhancement of Hydrocyclone Classification Efficiency for Fine Particles by Introducing a Volute Chamber**, Chemical Engineering & Technology.

4. Li, Feng, and al, 2021 **Purification of Granular Sediments Using a Novel Hydrocyclone**, Powder Technology.

5.Cui, B, and al 2017 **Effects of feed size distribution on separation performance of Hydrocyclones with different vortex finder diameters**, Powder Technology.

6.Mokni, Inés, and al. 2020 **Feed temperature effect on separation performance of industrial hydro cyclone advanced CFD analysis**, Separation Science and Technology.

7.Senfter, T, 2024 **An Empirical Study on the Upcycling of Glass Bottles into Hydrocyclone Separators**, Separations.

8 - Zhang, K, and al 2024 **Performance evaluation and prediction model for novel elliptical cyclone separators**. SSRN Electronic Journal.

ب – المراجع العربية:

9 – أ. د. حديد، محمود – **ميكانيك آلات الحفر والإنتاج (2)** – القسم النظري ، كلية الهندسة الكيميائية و البترولية ، منشورات جامعة حمص 2010-2011.