

تصميم وتصنيع جهاز اختبار الاهتراء بالبري بالرمل الجاف ASTM G-65 (رمل السيليكا المحضر من الرمل النبكي كمادة كاشطة)

* د.م. ميساء شاش

** د. جلال عبود

*** م. قيس كامل ابراهيم

(تاريخ الإيداع 2022/4/11 . قُبِلَ للنشر في 2022/ 10/19)

□ ملخص □

تم في هذه الدراسة تصميم وتصنيع جهاز لقياس مقاومة الاهتراء بالبري بالرمل الجاف والعجلة المطاطية باستخدام رمل سيليكا مادة كاشطة تم تصنيعها من الرمل النبكي الموجود في الجمهورية العربية السورية وفق المواصفة القياسية ASTM G-65. تم إجراء معايرة لهذا الجهاز باستخدام فولاذ العدة D2 كمادة مرجعية، وإجراء اختبار لتأثير كل من المسافة المقطوعة والحمل المطبق في كل من حجم الاهتراء ومعامل الاهتراء لكل من الفولاذ D2 والفولاذ المقاوم للصدأ PH-17. أظهرت النتائج تقارباً جيداً لقيم الاهتراء للمادة المرجعية D2 التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة مع القيم المرجعية. أظهرت النتائج تأثيراً هاماً لكل من الحمل المطبق والمسافة المقطوعة وسرعة الاحتكاك على خصائص مقاومة الاهتراء للفولاذ D2 و PH-17. يمكن استخدام الجهاز المصمم لهذا الغرض استخداماً فعالاً في قياس خصائص مقاومة الاهتراء للمواد الهندسية.

الكلمات المفتاحية: اهتراء بالبري - ASTM G65 - رمل نبكي - فولاذ العدة - احتكاك - قساوة

* استاذ - قسم هندسة المعدات والآليات - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

** باحث - الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية - دمشق - سورية

*** مساعد باحث - الهيئة العامة للبحوث العلمية - دمشق - سورية / طالب دكتوراه - هندسة المواد التطبيقية - كلية الهندسة التقنية -

جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

DESIGN AND IMPLEMENT OF ASTM G65 ABRASION TEST (BESED ON AL-NABK SILICA SAND AS AN ABRASIVE)

DR. MAYSSAA ALI SHASH *

Dr. Jalal Abboud **

ENG. KAYSSE KAMEL IBRAHIM ***

(Received 11/4/ 2022 . Accepted 19/10/ 2022)

□ ABSTRACT

In this study, a dry sand/rubber wheel abrasion test device was designed and manufactured to measure the wear resistance by using silica sand as an abrasive material, which was manufactured from Al-Nabk sand found in the Syrian Arab Republic according to ASTM G-65 standard. A calibration of this device was carried out using D2 tool steel as a reference material, and a test for the effect of both distance and applied load on the wear volume and wear coefficient of D2 steel and PH-17 stainless steel was carried out. The results showed a good convergence of the wear values of the D2 steel obtained from this study with the reference values. The results showed a significant effect of the applied load and distance and contact speed on the wear resistance properties of D2 and PH-17 steel. The device designed for this purpose can be effectively used to measure the wear-resistance properties of engineering materials.

Keywords: Abrasive Wear – ASTM G65 – Al Nabk Sand – Tool Steel – Friction - Hardness

* professor – equipment and machinery Engineering – faculty of technical engineering- Tartus University - Tartus - Syria

** researcher – the general commission for scientific agricultural researches – Damascus - syria

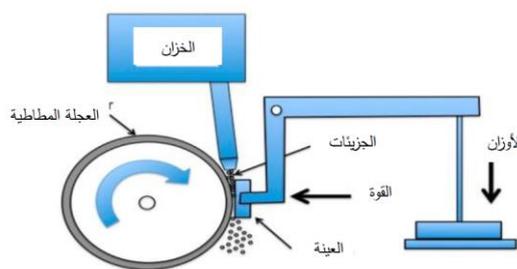
***Assistant researcher – general commission for scientific research - Damascus – Syria / PhD student – appliend materials engineering - Tartus University - Tartus - Syria

1. المقدمة والدراسات المرجعية:

الاهتراء (WEAR) هو عملية يتم فيها إزالة مواد من سطوح العناصر المختلفة، أو التي يتم فيها إحداث قفلة وتشوه خطير في هذه السطوح. من أجل تخفيض الاهتراء، من المهم جداً فهم الآلية التي يظهر بها في كل حالة. هنالك أنواع مختلفة من الاهتراء وكل نوع يتطلب معاملة خاصة لتخفيف الاهتراء أو التخلص منه [1,2].

يظهر اهتراء الحك/البري (ABRASIVE WEAR) عندما يحدث إزالة للمادة من على سطح عنصر من خلال تأثير القص، هذا الأمر يمكن أن يكون إما عملية متحكم بها أثناء تصنيع العنصر الميكانيكي مثل عملية البرادة أو الطحن أو الخراطة، أو تظهر عشوائياً من خلال عمل الآلة، مثل اهتراء أسنان آلة الحفر أثناء الحفر في الصخور، أو اهتراء مضارب الاسمنت الحار في معامل الاسمنت، أو اهتراء مضارب الدرس في الحصادات الدراسة. كما يمكن أن يظهر عند احتكاك (تلامس بالحك) سطحين معاً بوجود شوائب محصورة بين السطحين. عند معاينة السطوح المعرضة لهذا النوع من الاحتكاك تكون الأضرار بين خدوش ناعمة أو تجايف عميقة. إذا كان العنصر مصنوعاً من مادة مطيلية كالفلوذا، يمكن أن تكون آثار الاهتراء ذات شكل هندسي لولبي، شبيهة بنتائج عملية الخراطة. تتجه آثار الاهتراء بالنسبة للمواد ذات القساوة والقصافة العاليتين لأن تكون ذات شكل رقائق ناتجة عن التصدعات القصفة للمواد. يتم قياس مدى مقاومة المعدن للاهتراء بالبري بواسطة عدة طرق منها طريقة الودد- قرص ASTM G99-05، وطريقة الودد على صفيحة حاكة من الكربيدات ASTM G132-96 وطريقة العجلة المعدنية ضمن ملاط من الرمل والسيليكا ASTM B611، والعجلة المطاطية ضمن ملاط من الرمل والسيليكا ASTM G105، واختبار ميلر Miller للاهتراء بالبري ASTM G75. يعد اختبار الاهتراء بالرمل الجاف مع العجلة المطاطية أحد أكثر الاختبارات أهمية في تحديد مقاومة الاهتراء للمواد المعدنية أو البوليميرية إذا كانت بيئة العمل تعرض المعدن إلى مواد قاسية نسبياً.

يبين الشكل (1) الجهاز بشكل تخطيطي، حيث يتم وضع عينة الاختبار المستوية قبالة عجلة مطاطية دوارة ويتم تمرير تيار من الرمل الجاف بينهما وبالتالي يتم اهتراء العينة، يتم وصف الاهتراء على أنه " اهتراء بري بالخدش منخفض الاجهاد" [3]. يستخدم الاختبار على نطاق واسع لتصنيف مواد العناصر الهندسية المعرضة لاهتراء منخفض الحمل أثناء العمل كالأدوات الزراعية، والمزلق، والنظارات في مصانع معالجة الخامات ومعدات البناء وغيرها. هنالك ارتباط وثيق بين نتائج الاختبار ونتائج العمل الميداني للمكونات [4, 5].



الشكل (1): المخطط العام لجهاز قياس الاهتراء بالرمل الجاف والعجلة المطاطية ASTM G-65

كان هاورث HAWORTH أول من استخدم اختبار العجلة المطاطية بشكله الحالي [6]، فقد استخدم المطاط للحفاظ على ضغط التماس أثناء اهتراء العينة بدون ارتداد لأنه لاحظ أن مكابس مضخات الطين مصنوعة من المطاط للحفاظ على الضغط كلما تعرضت البطانة للاهتراء. يتم وضع العينة على الحافة العمودية للعجلة بطول 76.2mm

وعرض 25.4 mm أي ضعف عرض العجلة المطاطية. تحتوي العجلة المطاطية على اخاديد سطحية موزعة على المحيط متعامدة مع الوجوه المسطحة، لتحمل مادة البري أو الملاط من صينية تمر من خلالها. تم تصنيع نسخة مختلفة من تصميم هاوورث وتسويقها من قبل شركة فارجو تولز في ديترويت، الولايات المتحدة الأمريكية [7]، وأدت إلى توحيد كبير. تم اعتماد رمل أوتاوا (OTTAWA SAND) مواد كاشطة قياسية. ومع ذلك ، كان لدى النماذج الأولى عيب فادح: لم يكن الوند المحوري على المستوي الذي يحتوي على قوة الاحتكاك. نتيجة لذلك، تأثرت القوة الناطمية في العينة تأثيراً كبيراً بقوة الاحتكاك المؤثرة أثناء عمل جهاز الاختبار.

استخدم BORIK آلة FARGO التي تم تعديلها لحمل عجلة بقطر 152.4 mm مع حافة مطاطية من النيوبرين بسماكة 12.7 mm، فاصح القطر الكلي للعجلة 177.8 mm، استخدم الملاط مادة كاشطة تم تحريكه بوساطة مجاذيف على العجلة، وأولى اهتماماً خاصاً لسلوك المطاط في الاختبار فقد وجد أن كلاً من قساوة المطاط والخشونة السطحية للطبقة المطاطية مهمتان في تحديد خصائص مقاومة الاهتراء [8-10]. بعد الاستخدام الكبير ظهر سطح المطاط بشكل مصقول محتوياً على اخاديد موازية لاتجاه الانزلاق، تم اجراء خراطة لسطح المطاط فلاحظ أن معدل الاهتراء قد ازداد [10]، أظهر الفحص أن الجسيمات لم تنغمس في المطاط وذلك لأن النسيج المطاطي يمتلك صفة خاصة فيقوم بمسك جسيمات الاهتراء ولا تسمح لها بالتدحرج، ولكن مع الاستمرار في الاستخدام انخفض معدل الاهتراء وذلك بسبب حدوث تغير في طبيعة سطح المطاط، كان عدد الدورات 5000 دورة عند اختبار العجلة المطاطية، صرح BORIK بوجود درجة اختلاف في معدلات الاهتراء للعينة الواحدة تبلغ 6% فقط.

استخدم TUCKER و MILLER [11] ظروفًا مماثلة لظروف الاختبارات القياسية ASTM G65، فقد تمت المعايرة بحيث يكون تدفق الرمل 130 g/min وبحجم حبيبات يتراوح بين 200-300 μm مشيرين إلى أن معدل الاهتراء في هذا النطاق غير حساس للتغيرات في حجم المواد الكاشطة ومعدل التغذية. في سلسلة من الاختبارات على الفولاذ AISI 1020 وجدوا أن معدل الاهتراء يرتبط بمقدار متغيرات الاختبار [11]. في عام 1981 نشر AVERY بحثاً شاملاً يناقش موضوع اختبار الاهتراء بالعجلة المطاطية وناقش الحاجة إلى وجود رقابة صارمة على جميع المتغيرات لضمان وجود تناسق في النتائج. ومع ذلك، استنتج بان معدل التغذية للمواد الكاشطة ليس مهماً بشرط الحفاظ على طبقة متساوية من الرمل على سطح العينة مع زيادة معدل التغذية، لكن تم معارضة هذا الأمر من قبل HUARD وآخرين [12] الذين أظهروا أن معدل الاهتراء يزيد بنسبة 20% عند زيادة معدل التغذية من 100 g/min إلى 350 g/min [7].

درس AVERY أيضاً تأثير قساوة المطاط ووجد أن الاهتراء بالبري يزداد باضطراد مع زيادة قساوة المطاط مع بقاء جميع المتغيرات ثابتة [7]. لوحظت هذه العلاقة المضطربة أيضاً من قبل Borik [8]. يتصلب مطاط النيوبرين (Neoperen Rubber) مع الزمن، لكن من المفترض أن يكون مطاط الكلوروبوتيل أقل عرضة لذلك، بجميع الأحوال كلا النوعين يتلدن مع اجراء الاختبار نتيجة الاحتكاك لذلك يجب تجنب إجراء الاختبار لفترات طويلة. ركز HUARD وآخرون [12] على تأثير المواد الكاشطة فقد قارن سلوك رمل أوتاوا مع ثلاثة أنواع أخرى من الرمال السباتكية (Foundry Sands)- وهي الرمال التي تحتوي على عناصر معدنية سباتكية داخلها- ذات الجسيمات الكروية، فقد كانت هذه الجسيمات كروية أكثر من رمل أوتاوا وأكبر

حجماً، انخفض معدل الاهتراء للفولاذ AISI 1020 مع زيادة حجم المواد الكاشطة، يعزى ذلك إلى انخفاض زاوية الجسيمات. تم نشر مقياس ASTM G65 لأول مرة عام 1980 ومنذ ذلك الوقت تم تنفيذ الكثير من أعمال التوصيف التي تم ذكرها أعلاه، وكان هنالك استخدام واسع النطاق للشروط التي تم توحيدها لاحقاً.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تصميم جهاز اختبار لقياس مقاومة الاهتراء بالبري والذي له أهمية كبيرة في تحديد خصائص المواد الداخلة في تصنيع العناصر الميكانيكية والتي تتعرض لهذا النوع من الاهتراء (3 body type)، ولا يوجد بديل عنه في مختبرات مقاومة المواد، كما تكمن أهمية البحث في تحديد مدى تأثير بعض على خصائص مقاومة الاهتراء لبعض العينات الفولاذية، واعتماد هذا الجهاز مع مادة البري الجديدة والمصنعة محلياً بديلاً عن سيليكاً أوتأوا في اختبار اهتراء البري القياسي.

ويهدف هذا البحث الى دراسة تصنيع ومعايرة جهاز الاهتراء بالبري بالعجلة المطاطية والرمل الجاف ASTM G65 واستخدام السيليكاً المصنعة من الرمل النبكي السوري مادة اختبار ومقارنة النتائج بالقيم القياسية المعتمدة وفق المواصفات الأمريكية، كما يشمل البحث دراسة تأثير مسافة الانزلاق والحمولة المطبقة وسرعة الاحتكاك في عينات من فولاذ العدة D2 والفولاذ المقاوم للصدأ 17-PH على كل من حجم الاهتراء ومعامل الاهتراء، إذ يعدّ هذان النوعان من الفولاذ أحد أنواع الفولاذ القياسية والتي يتم معايرة أي جهاز اهتراء بوساطتها عن طريق مقارنة النتائج بالنتائج القياسية والمذكورة بالمواصفات الأمريكية ASTM G6 .

3. مشكلة البحث:

عدم وجود جهاز للاختبار في الجمهورية العربية السورية، ونظراً للحاجة إليه في توصيف خصائص الاهتراء بالبري بالرمل للمواد المعدنية والبوليميرية، كما أن مادة البري الأساسية المستخدمة في هذا الجهاز هي من نوع كوارتز أوتأوا Ottawa silica sand والذي من الصعب جدا الحصول عليه لذلك سيستخدم الرمل النبكي السوري مادة أساس بديلة في تحضير السيليكاً.

4. مواد وطرائق البحث:

4 - 1 - لمحة عامة :

يشمل اختبار الاهتراء بالبري عدة إجراءات لتحديد مقاومة المواد المعدنية للبري بالخدش من خلال استخدام العجلة المطاطية/الرمل الجاف عناصر اهتراء، أي أن الاهتراء الحاصل هنا هو من نمط ثلاثي الأجسام (3-bodies type)، تؤخذ قراءات هذا الاختبار كفقء في الحجم (mm³) لإجراء محدد من الإجراءات الموضحة بالجدول (1). المواد التي تمتلك أعلى مقاومة للاهتراء بالبري ستمتلك فقءاً أقل في الحجم.

يشمل هذا الاختبار خمسة إجراءات رئيسية مناسبة لدرجات مقاومة اهتراء محددة أو سماكات معينة لعينة

الاختبار،

الإجراء A - وهو إجراء قاسي نسبياً والذي سيصنف المواد تبعاً لمجال مقاومة اهتراء واسع من مقاومة اهتراء

كبيرة جداً إلى منخفضة. هو مفيد خصيصاً لتصنيف المواد ذات مقاومة الاهتراء المتوسطة إلى الكبيرة جداً.

الإجراء B - هو نسخة قصيرة الزمن للإجراء A. يمكن استخدامها للمواد العالية المقاومة للاهتراء بالبري لكنها مخصصة تحديداً لتصنيف المواد المتوسطة إلى قليلة المقاومة للاهتراء بالبري، يجب استخدام الإجراء B عندما تكون قيمة الفقد في الحجم الناتج عن الإجراء A أكبر من 100 mm^3 .
 الإجراء C - إجراء قصير الزمن من الإجراء A يستخدم لطبقات التغطية الرقيقة.
 الإجراء D - وهو إجراء أخف حملاً من الإجراء A والذي يستخدم في تصنيف المواد قليلة المقاومة للاهتراء بالبري. وهو يستخدم أيضاً في تصنيف المواد ذات أنواع عامة محددة (درجات لنفس المواد الهندسية) والتي يمكن أن تتقارب مع بعضها في الحجم المفقود أثناء إجراء الاختبار A.
 الإجراء E - هو إجراء قصير الزمن للإجراء B والذي يفيد في تصنيف المواد ذات مقاومة الاهتراء المتوسطة إلى قليلة المقاومة للاهتراء بالبري.

الجدول (1): الإجراءات المتعلقة باختبار قياس حجم الاهتراء بالبري ASTM G65

الإجراء	القوة المقابلة للعينة $\pm 3\%$ [N]	عدد دورات العجلة	المسافة المقطوعة [m]
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71.8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

4-2- ملخص طريقة الاختبار:

يشمل هذا الاختبار - كما تم توضيح آليته بالشكل (1) في المقدمة- بري أو كشط قطعة اختبار قياسية تم التحكم بدرجة خشونتها وتركيبها. يتم إدخال المواد الكاشطة بين قطعة الاختبار وعجلة دوارة مغطاة بطبقة من مطاط الكلوروبوتيل أو طبقة بدرجة قساوة محددة. يتم ضغط قطعة الاختبار هذه على العجلة الدوارة بقوة محددة بوساطة ذراع عتلة بينما يقوم تيار من المواد الكاشطة (رمل جاف) المتحكم به بكشط قطعة الاختبار. تدور هذه العجلة بنفس اتجاه تيار الرمل. ينطبق محور أو مركز دوران العتلة على مستوى مماس تقريباً لسطح العجلة المطاطية، وعمودي على نصف القطر الأفقي للعجلة المطابق لحامل تأثير القوة. يتم التحكم بالقوة المطبقة وزمن الاختبار بقيم تختلف من الإجراء A وحتى الإجراء E. يتم وزن العينات قبل وبعد الاختبار ويتم تسجيل الفقد في الكتلة. من الضروري تحويل الفقد في الكتلة إلى الفقد في الحجم بالـ mm^3 ، وفقاً للاختلاف في الكثافة للمواد المختلفة.

4-3- الأدوات والمواد:

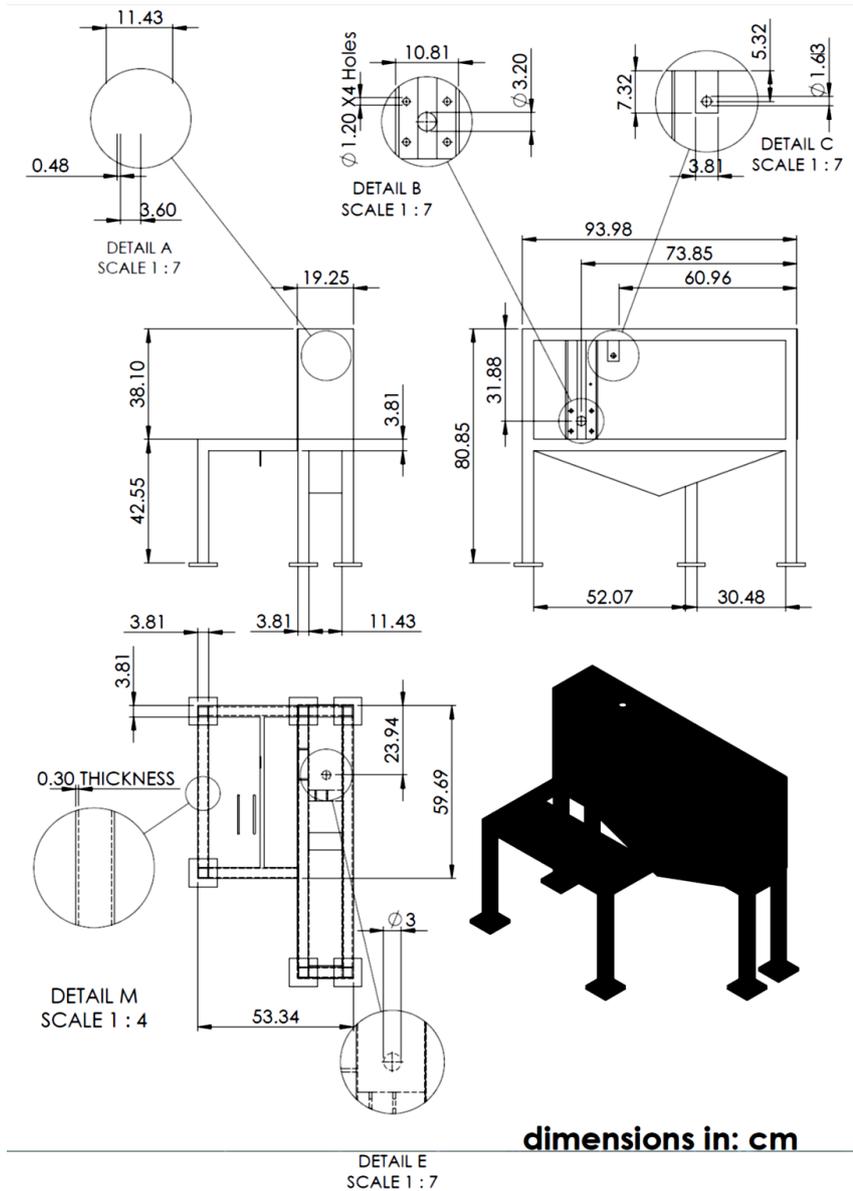
يوجد العديد من العناصر ذات الأهمية الكبيرة والتي تضمن الحصول على نتائج اختبار موحدة بين المخابر المختلفة. وهي: نوع المطاط المستخدم على العجلة، نوع وشكل المواد الكاشطة، مكان وحجم فتحة فوهة الرمل، وذراع عتلة ملائم لضمان نقل الحمل المطلوب.

4-3-1 الهيكل:

يجب أن يكون الهيكل قادر على حمل جميع الاجزاء بثبات وبدون اهتزاز، كما هو موضح في الشكل (2)، يتم تزويده بخزان للرمل بسعة حسب الرغبة، كما تم تضمينه بأبواب للأغلاق أثناء إجراء الاختبار للأمان وتم تزويدها بواجهة زجاجية لضمان رؤية العينة أثناء الاختبار.

2-3-4 العجلة المطاطية:

تتألف العجلة المطاطية الموضحة بالشكل (3) من قرص مصنوع من فولاذ (AISI 1020) بطبقة خارجية على محيطية من مطاط كلوروبوتيل المصبوب بدرجة حرارة 160°C لمدة 20 دقيقة، الطبقة المطاطية ملتصقة بشكل كامل على القرص وذات سطح معالج وأملس. تبلغ القساوة المثلى للطبقة المطاطية A-60 على مقياس (Durometer). يعتبر المجال من A58 وحتى A62 مقبولاً، وللتأكد من قساوة الطبقة المطاطية، أخذت أربعة قراءات على محيط القرص تبعد كل قراءة عن الأخرى 90° باستخدام مقياس Shore A والموجود في كلية الهندسة التقنية بطرطوس أخذت القراءة بعد تطبيق الحمل لمدة 5 ثواني. يبين الجدول (2) التركيب الكيميائي للمطاط مع النسب الوزنية للعناصر المكونة له [13].

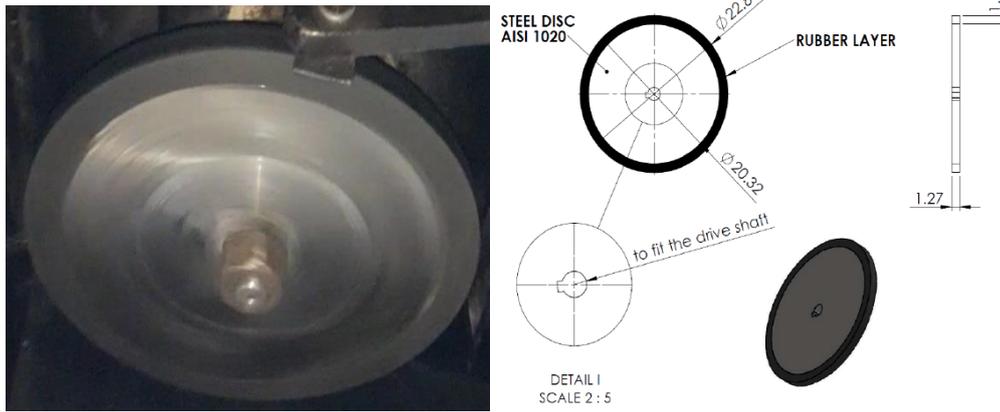




الشكل (2): أبعاد الهيكل الخاص بجهاز قياس الاهتراء

الجدول (2): النسب الوزنية للطبقة المطاطية المستخدمة في تصنيع جهاز قياس الاهتراء بالبري:

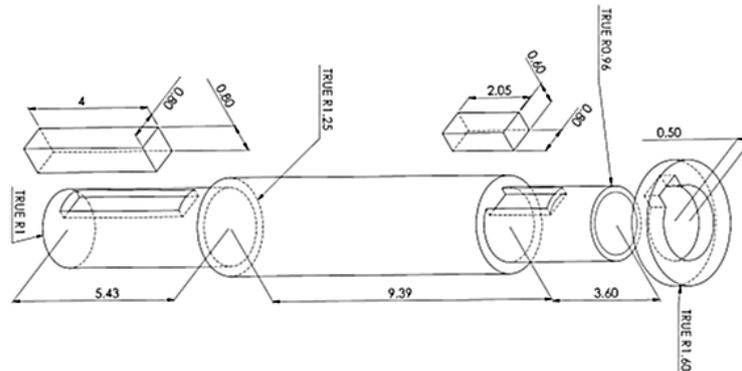
النسب الوزنية	المواد
100	كلوروبوتيل No. HT 10-66
1	اجيرايت ستايليت S- (AgeriteStaylite-S)
60	اسود الكربون HAF Carbon Black
5	زيت سيركولايت (Circolight Oil)
1	حمض الستريك (Stearic Acid)
5	اوksيد الزنك (Zinc Oxide)
2	ليدايت (Ledate) /ديميثيل ديثيوكارباميت (Dimethyldithiocarbamate)/



الشكل (3): العجلة المطاطية المستخدمة مع أبعادها

تثبت العجلة على محور دوار St45 مبنية بأبعاده بالشكل (4) محمول على محملين اثنين من نوع

UCF لضمان عدم اهتزازه أثناء العمل وخاصة عند تطبيق الحمل.



الشكل (4): أبعاد محور دوران جهاز قياس الاهتراء

4-3-3 المواد الكاشطة (حبيبات الرمل):

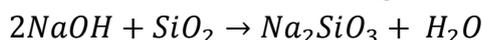
المواد الكاشطة القياسية المستخدمة في الاختبار هي عبارة عن حبيبات من رمل الكوارتز من نوع رمل الاختبار AFS 50/70، ويجب أن لا تتجاوز رطوبتها 0.5% وزناً، لأن رطوبة الرمال تؤثر تأثيراً كبيراً في نتائج الاختبار لذلك يجب أن يتم تجفيف الرمال باستمرار على الدرجة 120°C لمدة ساعة واحدة على الأقل حتى بلوغ نسبة الرطوبة المقبولة. يمكن أن يؤثر الاستخدام المتكرر للرمل في نتائج الاختبار ولذلك ينصح بعدم استخدامه استخداماً متكرراً. كما يؤثر حجم حبيبات الكوارتز أيضاً في سلوك الاهتراء لذلك يجب أن تكون هذه الحبيبات ذات حجم متناسق من أجل ضمان شروط اختبار موحدة إذ يجب أن يتراوح حجمها بين 212-300 μm أي mesh (50-70) كما هو موضح بالجدول (3) والذي يظهر مراحل غربلة الرمال بالطريقة القياسية للحصول على الحجم المطلوب للحبيبات.

الجدول (3): طريقة غربلة رمال السيليكا المستخدمة في جهاز قياس الاهتراء:

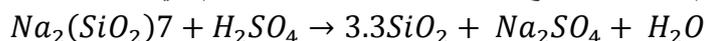
مرحلة الغربلة	المتبقي على الغربال	قياس الغربال (micrometer)	قياس الغربال (mesh)
المرحلة الأولى	لا يوجد	425	40
المرحلة الثانية	5% حد أعظمي	300	50
3	95% حد أعظمي	212	70
4	لا يوجد	150	100

4-3-3-1 تصنيع رمل السيليكا SiO₂ لاستخدامه مادة بري في جهاز ASTM G65:

كانت المادة الأولية المستخدمة عبارة عن رمل تم جمعه من منطقة النبك فيما يعرف بالرمل النبكي وهو مستخدم بكثرة في صناعة مواد البناء والخرسانة في الجمهورية العربية السورية، يوضح الشكل (5) الرمل الخام المستخدم. من أجل تحضير السيليكا تم اتباع الطريقة القياسية وفق [14]. في البداية يتم غسل الرمل (40g) بالماء المقطر لإزالة الشوائب العضوية والعلائق الأخرى، ثم يضاف حمض كلور الماء 3M -50ml وتحريكها لمدة 5 دقائق ومن ثم غسل الرمل بالماء المقطر لإزالة الحمض المتبقي، ثم يتم تجفيف الرمل. يضاف بعد ذلك هيدروكسيد الصوديوم 50g ضمن وعاء من الفولاذ المقاوم للصدأ ويتم تسخين المزيج لمدة 20 دقيقة، تبدأ سيليكات الصوديوم بالتشكل مع الماء وفق المعادلة الآتية:



يجري الاستمرار بالتحريك لمدة 40 دقيقة ومن ثم إضافة الماء المقطر 300 mL في وعاء خزفي مع التحريك، يضاف حمض الكبريت (98%) بشكل قطرات مع استمرار التحريك فتشكل السيليكا (ثنائي أوكسيد السيليكون) وفق المعادلة:



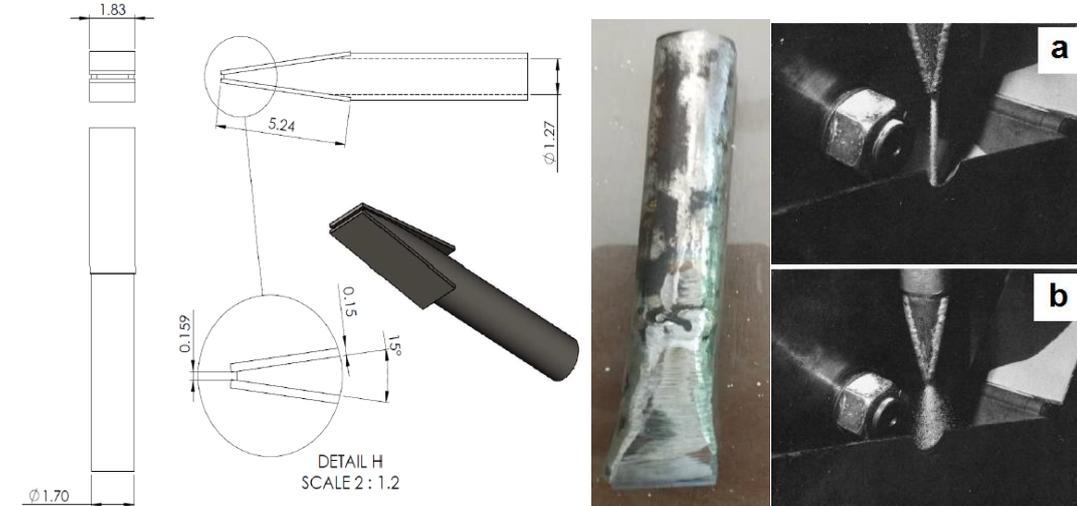
بعد ذلك يتم ترشيح السيليكا بوساطة قطعة قماش قطنية يتم الحصول على 22 g من السيليكا.

يتم طحن السيليكا بوساطة هاون خزفي وغربلتها بوساطة مناخل قياس 212-300 μm والموجودة في مخبر مقاومة المواد في نقابة المهندسين في طرطوس، بعد التجفيف على درجة حرارة 105°C حتى ثبات الوزن. يوضح الشكل (5) كل من السيليكا المحضرة بشكلها النهائي والصورة المجهرية للسيليكا باستخدام المجهر الضوئي من نوع Olympus BX51M بعد غربلتها بالطريقة القياسية المذكورة في الفقرة (2-3-3).



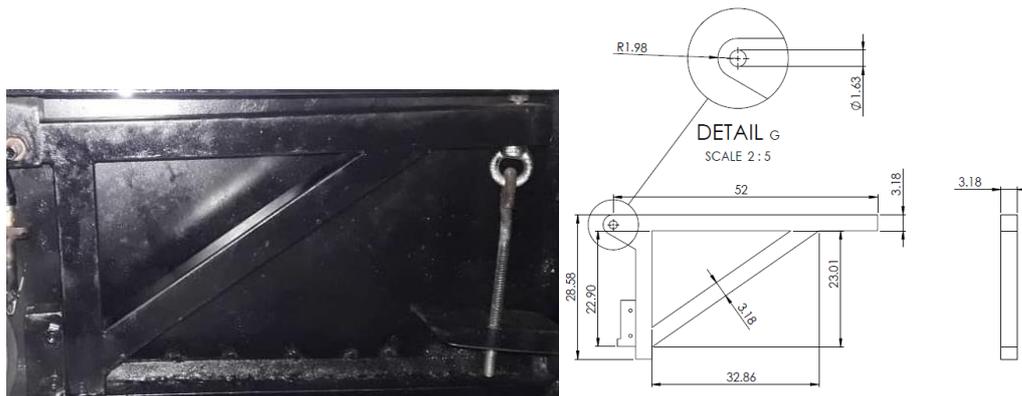
الشكل (5): A: الرمل النبكي، B: الرمل النبكي تحت المجهر، C: السيليكا بصورتها النهائية، D: رمل السيليكا تحت المجهر الضوئي
4-3-4 - فوهة الرمل:

يوضح الشكل (6) التصميم المثالي لفوهة خروج الرمل التي تؤمن معدل تدفق منتظماً للرمال وشكلاً منتظماً لشريط الرمل اللازم للاختبار. يمكن إعطاء الطول المناسب للفوهة والذي يضمن الاتصال مع الأنبوب البلاستيكي المتصل بدوره مع خزان الرمل، يجب أن تتم معايرة فوهة الرمل بحيث تضمن تدفق للرمال بمعدل $300-400$ g/min. يجب أن يتم تثبيت فوهة الرمل بحيث تكون متصلة مع منطقة الاتصال بين عينة الاختبار والعجلة المطاطية يفضل أن تصنع فوهة الرمل من الفولاذ غير قابل للصدأ (stainless steel) وذلك لمقاومتها العالية للصدأ والتآكل وخاصة بعد إجراء عمليات اللحام الضرورية للحصول على الشكل القياسي للفوهة، إذ تتشكل من خلال لحام صفيحتين معدنيتين على أسطوانة مشطوفة كما هو موضح بالشكل (6). يجب أن تؤمن الفوهة تدفقاً منتظماً لتيار الرمل (بشكل شريط) وأن يغطي كامل سماكة العجلة المطاطية بحيث يمر بينها وبين عينة الاختبار، حيث يمكن أن يؤثر التدفق العشوائي وغير المنتظم للرمال في نتائج الاختبار.



الشكل (6): فوهة الرمل القياسية في جهاز قياس الاهتراء بالبري. a: تدفق رمال شريطي منتظم b: تدفق رمال عشوائي
4-3-5 - ذراع نقل الحمل:

يجب أن يكون ذراع نقل الحمل متيناً وقادراً على حمل الوزن المطبق وبحيث يتم تثبيت العينة عليه تثبيتهً مثالياً خالياً من الاهتزاز، توضح أبعاده بالشكل (7).



الشكل (7): الأبعاد القياسية لنزاع نقل الحمل

يدار الجهاز بواسطة محرك كهربائي استطاعة 1HP، الشكل (8)، يتم نقل الحركة الدورانية من خلال بكرات وسير مطاطي بنسبة نقل 30:9، السرعة القياسية للاختبار 200 ± 10 rpm. تم تزويد الجهاز بوحدة تحكم، الشكل (8)، يتم القيام من خلالها بمعايرة الجهاز على عدد دورات الاختبار المطلوبة والتي تكون وفق المواصفات القياسية ASTM G65 100 او 1000 او 6000 دورة حسب الاجراء المتبع ويتم إيقاف الجهاز آلياً بواسطة انفرتر عند الوصول الى العدد المطلوب لدورات عجلة الاختبار وفق الجدول (1).



الشكل (8): وحدة التحكم مع الحساس والمحرك الكهربائي المستخدم

4-4 اختبار الاهتراء بالبري بالرمل الجاف والعجلة المطاطية:

تم تنفيذ الاختبار بواسطة جهاز اختبار الاهتراء بالبري بواسطة الرمل الجاف /العجلة المطاطية المعتمد وفق المواصفات القياسية ASTM G65-04 [13] والموجود حالياً في الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية - مركز بحوث طرطوس، والذي تم تصنيعه كما ذكر سابقاً، باستخدام رمل السيليكا الذي تم تحضيره كما ذكر سابقاً برطوبة وزنية لا تتجاوز 0.5%، جرى الاختبار على سرعة الاختبار القياسية 200 rpm على عينات قياسية $75 \times 25 \times 0.8$ cm، بمعدل تدفق للرمل 320 g/min بعد تجفيف الرمال داخل فرن حراري على الدرجة 105°C حتى ثبات الوزن للتخلص من الرطوبة، جرى الاختبار باستخدام الإجراءات A ، B ، C ، E المبين خصائصها في الجدول (1) أي أن الأحمال هنا ثابتة N (130) والمتغير الأساسي هو المسافة المقطوعة.

تم حساب الفقد في الوزن بعد وزن العينات قبل وبعد الاختبار بميزان حساسيته 0.0001g من نوع (Precisa)

(205 A SCS) ومن ثم تحويل الفقد في الوزن إلى فقد في الحجم V_{lost} من خلال العلاقة:

$$V_{lost} = \frac{m_{lost}}{\rho} \times 1000 \quad [\text{mm}^3] \quad (1)$$

m_{lost} : الفقد في الوزن [g]. ρ : كثافة عينة الاختبار $[\text{g}/\text{cm}^3]$.

يتم حساب الفقد المضبوط في الحجم وهو القيمة الحقيقية للفقد في الحجم نتيجة تعرض العجلة المطاطية للاهتراء باستمرار فيجب تحويل قيمة الفقد إلى قيمة مضبوطة كما يأتي:

$$(2) \quad \text{الفقد المقياس في الحجم} \times \frac{D_1}{D_2} = \text{AVL الفقد المضبوط في الحجم}$$

D_1 : القطر الاساسي للعجلة المطاطية والذي يبلغ 228.6 mm . D_2 : قطر العجلة بعد الاختبار. جرى الاختبار في درجة حرارة المختبر وعلى ثلاثة مكررات لكل عينة اختبار، تم أخذ قيمة المتوسط الحسابي قيمةً نهائيةً حسب ASTM G65-04.

4-4-1 معايرة جهاز الاهتراء وتأثير المسافة المقطوعة على معدلات الاهتراء:

بعد تصنيع جهاز اختبار الاهتراء، الشكل (9) لابد من إجراء المعايرة السليمة للتأكد من إعطائه النتائج المطابقة للمواصفات القياسية، وأن لا ينتهي الأمر عند ذلك فقط، بل يجب إجراء معايرات دورية على الجهاز للتأكد من عمله على نحو سليم. يعدّ هذا الأمر ضرورياً جداً وخاصة عند تغيير المشرف على الاختبار أو عند نقل الجهاز إلى مكان آخر. تم استخدام الفولاذ من نوع فولاذ العدة AISI D2 والفولاذ المقاوم للصدأ 17-PH على الإجراء A و B و C و E، كما تم تنفيذ الاختبار باستخدام حمولات مختلفة (F_1 قيمتها 30-45) N (73-113-130) لدراسة تأثير الحمل المطبق في حجم الاهتراء بسرعة دوران عجلة 200 rpm وعدد دورات اجمالي 6000.



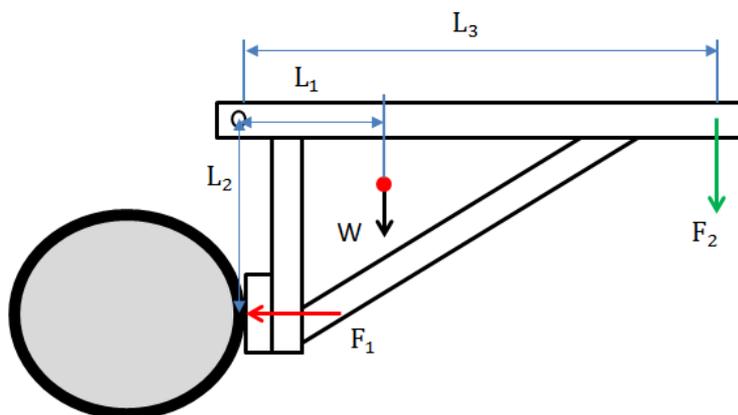
الشكل (9): جهاز اختبار الاهتراء بالرمل الجاف والعجلة المطاطية المستخدم مع وحدة التحكم والفرملة

نحسب القوة اللازم تعليقها F_2 ضمن الجهاز لتأمين حمل ناظمي F_1 على سطح التماس بين عينة الاختبار والعجلة المطاطية من خلال العلاقة الآتية وكما هو موضح بالشكل (10):

$$(3) \quad F_2 = \frac{F_1 \times L_2 - W \times L_1}{L_3}$$

ولدينا $L_1 = 166 \text{ mm}$ $L_2 = 226 \text{ mm}$ $L_3 = 495 \text{ mm}$ ، يتم حساب W بعد جمع وزن كل من وزن الخفاف 198 g ووزن القرص الحامل للأوزان 338 g ووزن برغي التثبيت 26 g ووزن الذراع 3452 g لتصبح قيمة $W = 47.245 \text{ N} = 4014 \text{ g}$ ، وبالتعويض في المعادلة (3) يمكن حساب قيمة F_2 وفق ما يأتي:

$$(4) \quad F_2 = 0.456 \times F_1 - 13.205$$



الشكل (10): الاحمال المؤثرة على جهاز اختبار الاهتراء

تم إجراء عملية المعادلة للفولاذ AISI D2 داخل فرن حراري على الدرجة 1010°C لمدة 25 دقيقة ومن ثم تبريده بالهواء حتى الوصول إلى درجة حرارة المختبر. ومن ثم الاستمرار بإجراء عملية التلطيع Tempering حتى الوصول إلى درجة قساوة تتراوح بين 58.5 – 60.5 HRC، تم إجراء عملية التخمير لعينات من الفولاذ 17-PH على الدرجة 500°C لمدة 4 ساعات للتخلص من الإجهادات المتبقية أثناء عملية التشكيل ومن ثم تركها لتبرد ضمن الهواء.

يعبر الجدول (4) عن النسب المئوية للعناصر السبائكية في الفولاذ المرجعي (AISI D2) والفولاذ (17-PH) بعد إجراء التحليل الطيفي.

بلغت قيمة متوسط كثافة الفولاذ AISI D2 (7.8415 g/cm^3) و الفولاذ 17-PH (7.772 g/cm^3).

الجدول (4): النسب المئوية للعناصر السبائكية في أنواع الفولاذ المختبرة

الفولاذ	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Mo	Ni	Al
AISI D2	1.534	0.2351	0.0162	0.0265	0.2316	11.1252	0.7453	0.8111	0.0243	0.0392
17-PH	0.070	0.641	0.0212	0.0195	0.816	16.015	0.0131	0.0321	3.2136	0.0013

تم إجراء اختبار القساوة للعينات المدروسة وفق ASTM E18-15 على عينات مستطيلة بأبعاد $4 \times 2.5 \times 0.8$ cm [15]، باستخدام جهاز قياس عمومي موديل HBRV-187 5 والموجود في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا. تم تطبيق الحمل بواسطة مخروط برأس ماسي (diamond spheroconical) بنصف قطر رأس 0.2 mm، تم تطبيق الحمل الأولي بقيمة 10 kgf وتثبيتته لمدة 4 ثوان ومن ثم زيادة الحمل حتى 150 kgf بسرعة رأس 2.5 mm/s وتثبيت الحمل الأعظمي لمدة 20 ثانية لتفادي الإرجاع المرن ومن ثم اخذ القراءات من على شاشة الجهاز. عدد القراءات 5 وأخذ المتوسط الحسابي لها.

تحسب قيمة معامل الاهتراء K [m^2/N] من خلال العلاقة بين كل من حجم الاهتراء الحاصل V [m^3] والمسافة المقطوعة L [m] والحمل الناظمي المطبق على العينة F_1 [N] وفق أركارد من العلاقة الآتية [16]:

$$K = \frac{V}{L \times F_1} \quad (5)$$

5. النتائج والمناقشة:

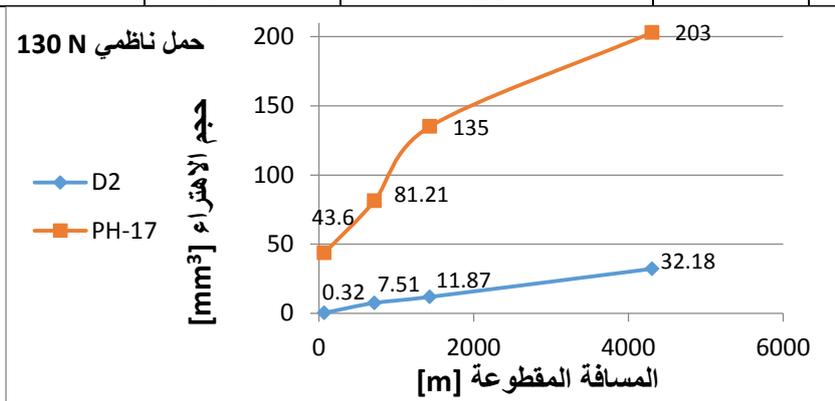
باستخدام المعادلة (4) لحساب الوزن الواجب تعليقه للحصول على الحمولة الناظرية المطلوبة في الاختبار كانت قيم الاحمال هي $N (0.475 - 7.315 - 20.083 - 38.323 - 46.075)$ المقابلة للأحمال الناظرية $N (30 - 45 - 73 - 113 - 130)$ على التوالي. يوضح الجدول (5) نتائج قراءات الاختبارات الميكانيكية التي تم تنفيذها على العينات D2 و PH-17 باستخدام جهاز قياس الاهتراء . ASTM G65

يوضح الشكل (11) تأثير المسافة المقطوعة في حجم الاهتراء لنوعي الفولاذ المختبرين. يمكن ملاحظة أن حجم الاهتراء للفولاذ PH-17 أكبر بكثير من حجم الاهتراء للفولاذ D2 والذي يمكن تفسيره برقم قساوة D2 الكبير نسبياً (58.9 HRC) بينما بلغت قساوة PH-17 (41.2 HRC) ويعود ذلك إلى أن تواجد الكربون والكروم معاً في الفولاذ D2 يؤدي إلى تشكيل الكريبيدات القاسية كما بينت نتائج التحليل الطيفي في الجدول (4). يلاحظ من الشكل أيضاً زيادة حجم الاهتراء للفولاذ PH-17 بشكل خطي تقريباً من 100 m (43.6 mm³) حتى قطع مسافة 718 m (81.21 mm³)، بعد ذلك تحدث زيادة مضطربة بحجم الاهتراء حتى مسافة 1436 m لتبلغ (135 mm³) ومن ثم يعود حجم الاهتراء للزيادة بشكل خطي حتى بلوغ حجم أعظمي بعد قطع مسافة 4309 m يبلغ (203 mm³). يمكن تفسير هذه الظاهرة إلى زيادة في قيم معاملات الاحتكاك نتيجة زيادة الخشونة السطحية بعد قطع مسافة معينة مما أدى إلى زيادة حجم الاهتراء بشكل كبير نتيجة لدونة المعدن، لكن وبعد هذه المسافة يحدث تنعيم للسطح نتيجة صقله بالرمال ليعود الاهتراء إلى زيادته المنتظمة من جديد. هذه الظاهرة لم تلاحظ في الفولاذ D2 فقد زادت قيم الاهتراء زيادةً منتظمةً تقريباً لتبدأ من (0.32 mm³) بعد مسافة 100 m وتصل إلى (32.18 mm³) بعد قطع مسافة 4309 m مع ملاحظة زيادة طفيفة في معدل الاهتراء عند المسافات القصيرة، فقد بلغت (7.51 mm³) بعد 718 m.

الجدول (5): نتائج اختبار الاهتراء.

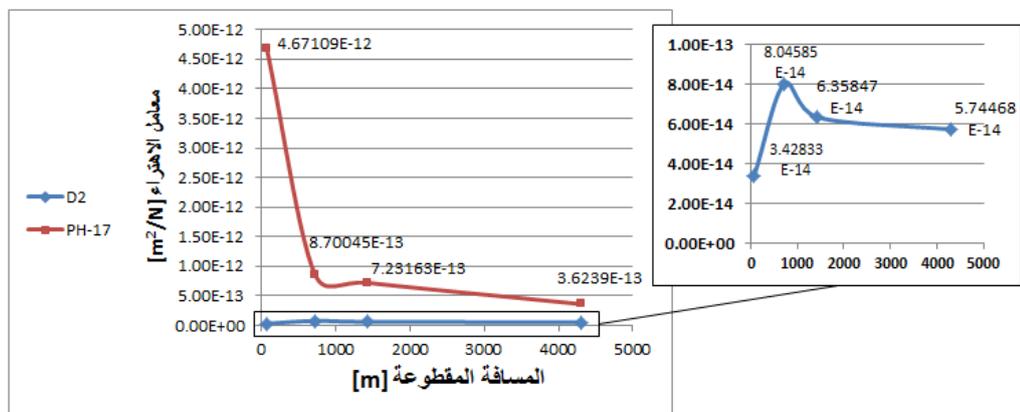
العينة	المسافة m	AVL mm ³	قطر العجلة بعد الاختبار mm	الفقد في الوزن g	الفقد المقاس في الحجم mm ³
D2	71.8	0.32	228.6	0.0025	0.32
	718	7.51	228.4	0.0590	7.503429571
	1436	11.87	228.2	0.0932	11.8492301
	4309	32.18	228	0.2528	32.09553806
PH-17	71.8	43.6	227.8	0.3409	43.44741907
	718	81.21	227.5	0.6349	80.81922572
	1436	135	227.3	1.0555	134.2322835
	4309	203	227.1	1.5872	201.667979
العينة	الحمل N	AVL mm ³	قطر العجلة بعد الاختبار mm	الفقد في الوزن g	الفقد المقاس في الحجم mm ³
D2	30	7.3	226.9	0.0573	7.245713036
	45	17.23	226.7	0.1353	17.08679353
	73	26.18	226.5	0.2056	25.93950131
	113	30.23	226.3	0.2375	29.92584864
	130	32.18	228	0.2528	32.09553806
PH-17	30	41.33	225.9	0.3231	40.84185039
	45	68.23	225.7	0.5334	67.36444007
	73	165	225.5	1.2901	162.7624672
	113	178.3	225.3	1.3942	175.7458268
	130	203	227.1	1.5872	201.667979
العينة	السرعة	AVL mm ³	قطر العجلة بعد الاختبار mm	الفقد في الوزن g	الفقد المقاس في الحجم mm ³

				rpm	
14.10469116	0.1125	225.1	14.324	100	D2
21.00739151	0.1677	224.9	21.353	150	
32.09553806	0.2528	228	32.18	200	
40.62941295	0.3249	224.6	48.412	250	
47.43783027	0.3803	224	41.353	300	
25.12557612	0.2015	223.9	25.653	350	PH-17
111.3556745	0.8893	223.8	113.744	100	
168.0951636	1.3437	223.6	171.854	150	
201.667979	1.5872	227.1	203	200	
210.8407196	1.6876	223.3	228.965	250	
223.3560586	1.7902	223	215.845	300	
191.8555556	1.5391	222.8	196.85	350	



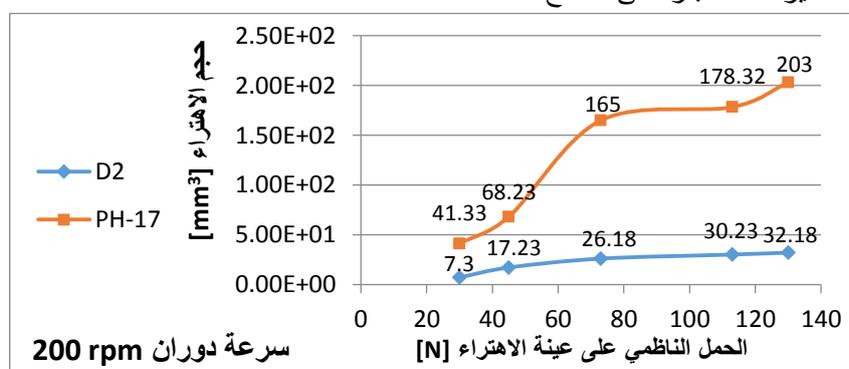
الشكل (11): تأثير المسافة المقطوعة في حجم الاهتراء. سرعة دوران العجلة 200 دورة في الدقيقة

يوضح الشكل (12) تأثير المسافة المقطوعة في قيمة معامل الاهتراء K. نلاحظ بالنسبة للفولاذ PH-17 انخفاضاً في قيمة معامل الاهتراء بشكل كبير عند قطع مسافات قصيرة، فقد بلغت $4.67 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ بعد 100 m لتصل إلى $8.7 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ لكن بعد ذلك لا يُحْدِثُ تغيّر كبير في قيمة معامل الاهتراء، يفسر ذلك بارتفاع درجة حرارة الطبقة المطاطية والتي بلغت قساوتها 60.14 عند درجة حرارة المختبر لكن أثناء إجراء الاختبار ترتفع حرارة المطاط بزيادة عدد دورات العجلة الأمر الذي يجعلها أكثر طراوة وبالتالي انغماس بعض جسيمات الرمل ضمنها مسبباً انخفاضاً في حجم الاهتراء. وهذا الأمر مأخوذ بالحسبان أثناء اجراء الاختبارات، إذ ينصح بزمان 30 دقيقة بين كل اختبار والاختبار الذي يليه لترك الطبقة المطاطية تبرد. بلغت قيمة معامل الاهتراء للفولاذ PH-17 $3.62 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$. بالنسبة للفولاذ D2 لم يحدث تغيير ملحوظ في قيمة معامل الاهتراء مع زيادة المسافة لتتراوح بين $(3.42-8.04) \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ ، يعود هذا إلى رقم القساوة المرتفع للفولاذ D2.



الشكل (12): تأثير المسافة المقطوعة في قيمة معامل الاهتراء K

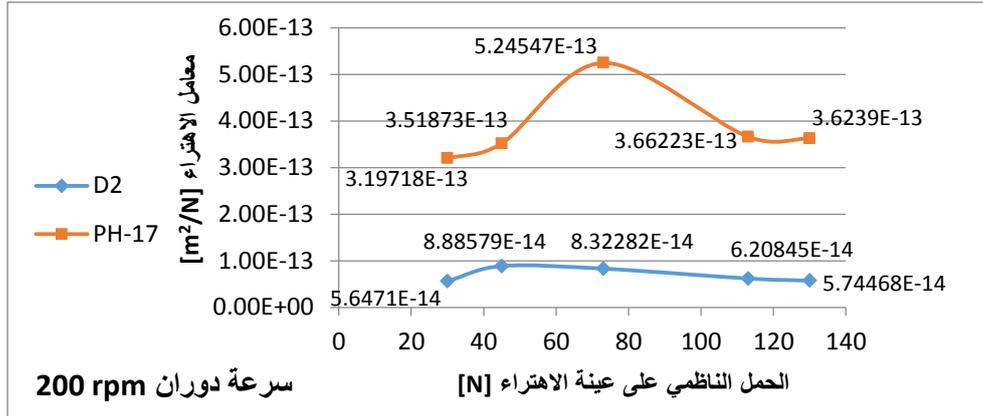
يوضح الشكل (13) تأثير الحمل المطبق في حجم الاهتراء، نلاحظ أن مقاومة الاهتراء العالية للفولاذ D2 مقارنة بالفولاذ PH-17، كانت قيم حجم الاهتراء للفولاذ HP-17 أكبر بكثير من الفولاذ D2 ويعود السبب إلى قساوة الفولاذ المرتفعة مقارنة بالفولاذ المقاوم للصدأ، ترتفع قيمة حجم الاهتراء للفولاذ بزيادة الحمل المطبق من 30 N وحتى 73 N لتتراوح بين (41.33-165.42) mm³، تحدث بعد ذلك زيادة طفيفة في معدل الاهتراء بزيادة الحمل إلى 113 N (178.32 mm³) ومن ثم تعود للزيادة زيادةً كبيرةً بزيادة الحمل 130N لتصل إلى قيمتها الأعظمية (203.01 mm³)، بينما كانت الزيادة مضطربة في حجم الاهتراء للفولاذ D2 من 7.3 mm³ وحتى 26.18 mm³ عند زيادة الحمل من 30 N حتى 73 N بسبب زيادة قوى الاحتكاك مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة الاهتراء، بعد زيادة الحمل حتى 130 N لم يكن هنالك تغيير كبير في قيمة حجم الاهتراء 32.18 mm³ كما هو موضح بالشكل (13). يمكن تفسير هذا السلوك بأنه بزيادة الحمل قد تتحطم جسيمات الرمل بسبب قساوة الفولاذ D2 وتصبح أصغر حجماً وبالتالي تؤثر في حجم الاهتراء الأمر الذي يعكس أهمية متغيرات الاختبار على النتائج.



الشكل (13): تأثير الحمل المطبق في حجم الاهتراء

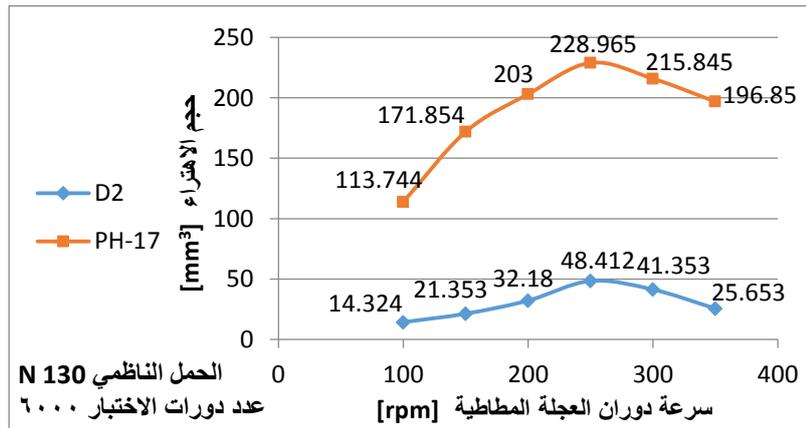
يبين الشكل (14) تأثير الحمل المطبق في قيم معامل الاهتراء. نلاحظ قيم معامل الاهتراء المنخفضة للفولاذ D2 أعظمها كانت (8.88 x 10⁻¹⁴) m²/N عند حمولة 45 N مقارنة بالفولاذ PH-17 بقيمتها الأعظمية (5.25 x 10⁻¹⁴) m²/N عند حمولة 73 N. تؤكد هذه النتائج أن قيم وحدة المسافة المقطوعة تتأثر تأثيراً كبيراً في قيمة الحمل المطبق، إذ تزداد بزيادة الحمل حتى قيمة حرجة لكن تعود لتتخفف بعد هذه القيمة والسبب نتيجة تغيير في خصائص جسيمات البري. علماً أن القراءات قد أخذت بعد 6000 دورة للعجلة المطاطية.

عند مقارنة قيم حجم الاهتراء للفولاذ المرجعي D2 (32.18)mm³ عند الإجراء A بالقيم المرجعية (V_{ref} = 35.6±5.2)mm³ نجد أن قيم الاهتراء ما تزال ضمن المجال المسموح به ولذلك يعدّ الجهاز الذي تم تصميمه مناسباً لإجراء اختبار الاهتراء بالعجلة المطاطية والرمال الجاف، هذا الانخفاض القليل في قيمة حجم الاهتراء عن القيم المرجعية يعود إلى خصائص رمل السيليكيا التي تم تصنيعها محلياً عن رمل أوتاوا المستخدم مادةً مرجعيةً وفق ASTM G65.



الشكل (14): تأثير الحمل المطبق في قيم معامل الاهتراء

كما هو موضح بالشكل (15) فإن لسرعة الاحتكاك بين العجلة المطاطية والعينة تأثيراً كبيراً في خصائص مقاومة الاهتراء. تزداد قيمة الفقد في الحجم بزيادة سرعة الدوران بسبب زيادة سرعة الاحتكاك بين العجلة والعينة حتى الوصول على سرعة معينة تتخفض بعدها قيمة حجم الاهتراء، يعود ذلك الى أنه وبسبب سرعة الاحتكاك الكبيرة تزداد درجة حرارة المطاط ويصبح أكثر لدونة فتتخفض قساوته الأمر الذي يسمح لحبيبات الرمل بالانغماس ضمن الطبقة المطاطية ثم انخفاض تأثيرها في سطح العينة فتتخفض شدة الاهتراء، ومن هنا نستنتج أن هنالك سرعة احتكاك حدية تكون فيها شدة الاهتراء أكبر ما يمكن تتخفض بعدها شدة الاهتراء.



الشكل (15): تأثير سرعة دوران العجلة المطاطية في قيم معامل الاهتراء

6. الاستنتاجات:

مما سبق يمكن استنتاج مجموعة من النقاط المهمة يمكن تلخيصها كما يأتي:

1. جهاز الاهتراء بالرمل الجاف والعجلة المطاطية ASTM G65 الذي تم تصنيعه يمكن استخدامه استخداماً فعالاً في قياس خصائص مقاومة الاهتراء للمعادن عند استخدام رمل السيليكا المصنع من الرمل النبكي السوري.
2. قيم مقاومة الاهتراء لفولاذ العدة D2 أكبر من قيم الاهتراء للفولاذ المقاوم للصدأ PH-17.
3. يتأثر حجم الاهتراء ببارامترات الاختبار كالحمل المطبق والمسافة المقطوعة وسرعة الاحتكاك تأثيراً كبيراً.

4. تتأثر قيمة معامل الاهتراء عند شروط اختبار محددة بزمان الاختبار وذلك بسبب تغير بالخصائص الفيزيائية للطبقة المطاطية العاملة، لذلك يفضل ترك فاصل زمني بين كل اختباريين متتاليين لا يقل عن 30 دقيقة للحفاظ على سلامة الإجراء المتبع.
5. تزداد شدة الاهتراء بزيادة سرعة دوران العجلة المطاطية حتى حد معين تنخفض بعدها شدة الاهتراء.

التوصيات والمقترحات:

1. دراسة أوسع لتأثير بارامترات أخرى في تشغيل جهاز قياس الاهتراء بالرمل الجاف كقساوة المطاط المستخدم أو أنواع أخرى من المطاط أو مواد كاشطة مختلفة.
2. إجراء دراسات موسعة عن سلوك الاهتراء بالبري بالرمل الجاف على أنواع أخرى من الفولاذ أو المواد الهندسية الأخرى كالبوليمرات.
3. دراسة علاقة مقاومة الاهتراء بالبري بالخصائص الميكانيكية الأخرى كمقاومة الصدم، القساوة، ومقاومة الشد.

المراجع:

1. RABINOWICZ, E. (1965). Types of wear. In: Friction and Wear of Materials. New York: John Wiley and Sons. P: 109.
2. PETERSON, M; WINER, W. (1980). Introduction to wear control. In: Wear Control Handbook. ASME. P 1.
3. AVERY. H.S. (1977). Classification and precision of abrasion tests. in W.A. Glaeser. K.C. Ludema and S.K. Rhee (eds.), Proc. In?. Conf: on Wear of Materials, ASME, New York. pp:148-157.
4. SWANSON. P.A. (1985). Comparison of laboratory and field abrasion tests, in K.C. Ludema (ed.), Proc. Int. ConJ on Wear of Materials, ASME, New York. pp: 519-525.
5. SWANSON. P.A. (1993). Comparison of laboratory abrasion tests and field tests. in A.W. Ruff and R.G. Bayer (eds.), Tribology; Wear Test Selection for Design and Application, ASTM STP 1199, ASTM, Philadelphia, PA. pp: 80-99.
6. HAWORTH. R.D.Jr. (1949). The abrasion resistance of metals. Trans. Am. Sot. Met. 41. pp: 819-869.
7. AVERY. H.S. (1981). An analysis of the rubber wheel abrasion test.in S.K. Rhee, A.W. Ruff and K.C. Ludema (eds.), Proc. Inf. Co@ on Wear of Materials, ASME, New York. pp: 367-378.
8. BORIK, F. (1972). Rubber wheel abrasion test. SAE Trans. 79. pp: 2145-2154.
9. BORIK, F. (1972). Using tests to define the influence of metallurgical variables on abrasion. Met. Eng. Q., 12. pp: 33-39.
10. BORIK, F. (1976). Testing for abrasive wear. in R.G. Bayer (ed.), Selection and Use of Wear Tests for Metals, ASTM STP 615, ASTM, Philadelphia, PA. pp: 30-44.
11. TUCKER, R.C.J.; MILLER , A.E. (1976) . Low stress abrasive and adhesive wear testing. in R.G. Bayer (ed.), Selection und Use of Wear Tests for Metals, ASTM STP 615, ASTM, Philadelphia, PA. pp: 68-90.
12. HUARD, G. (1987). The effects of size and shape of abrasive particles on the measurement of wear rate using a dry sand rubber wheel test. in K.C. Ludema (ed.), Proc. Int. Con& on Wear of Materials, ASME, New York. pp: 689-699.
13. ASTM G65-04, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, United States.
14. BASRUR, A. (2016). Industrial Catalytic Processes for Fine and Specialty Chemicals || Catalyst Synthesis and Characterization. pp: 113–186
15. ASTM E92-82, Standard test method for Vickers hardness of metallic materials, United States.
16. ARCHARD, J.F. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics. 24. pp: 981–988.