Comprehensive Journal of Science
Volume (11), Issue (41), (JUNE, 2026)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (11) ملحق العدد 41 يونيو 2026
ردمد: 3014-6266

دراسة نظرية وعملية لإمكانية تصنيع ديسك الفرامل محليًا

عبدالناصر الصويعي الشيباني هويسة
المعهد العالي للعلوم و التقنية بالزاوية – قسم الميكانيكا
Nasserhawisah@gmail.com

Theoretical and Experimental Study on the Feasibility of Local Manufacturing of Brake Discs

تاريخ الاستلام:2026/06/30 -تاريخ المراجعة:2026/06/18- تاريخ القبول: 2026/06/28- تاريخ للنشر: 2026/8/1

الملخص
تعد منظومة الفرامل القرصية من أهم أنظمة الأمان في المركبات الحديثة، حيث يعتمد أداؤها بشكل أساسي على خصائص المواد المستخدمة في تصنيع ديسك الفرامل ووسادات الاحتكاك. يعاني القطاع المحلي في مجال قطع غيار المركبات من اعتماد شبه كامل على المنتجات المستوردة، مما يشكل عبئًا اقتصاديًا ويؤثر على توفر القطع في الأسواق المحلية. يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية تصنيع ديسك فرامل محليًا باستخدام الحديد الزهر المصهور في فرن كهربائي، وتقييم أدائه مقارنة بالديسك التجاري المستورد. تم تصنيع ديسكين محليين: الأول بدون فتحات تهوية، والثاني بعد إضافة فتحات تهوية. تم إجراء اختبارات فرملة متكررة (60 دورة) من سرعة 100 كم/ساعة حتى التوقف، مع قياس التآكل في الديسك واللُّقم الداخلية والخارجية. أظهرت النتائج أن الديسك المحلي بدون تهوية سجل أعلى معدلات تآكل (0.08 مم للديسك، 0.535 مم متوسط اللقم)، بينما سجل الديسك المحلي بعد التخريم تآكلًا مقاربًا للديسك التجاري (0.03 مم للديسك مقابل 0.02 مم للتجاري) وتفوق عليه في مقاومة تآكل اللُّقم (0.09 مم متوسط اللقم مقابل 0.215 مم للتجاري). تؤكد النتائج إمكانية نجاح التصنيع المحلي بشرط الالتزام بعمليات التهوية والتشطيب الدقيق، مع تحقيق ميزة تنافسية في إطالة عمر اللُّقم.
الكلمات المفتاحية: ديسك الفرامل، تصنيع محلي، حديد الزهر، تآكل، فرن كهربائي، تهوية، تشطيب ميكانيكي.

Abstract

The disc brake system is one of the most critical safety systems in modern vehicles, as its performance fundamentally depends on the properties of materials used in manufacturing brake discs and friction pads. The local automotive spare parts sector suffers from near-complete dependence on imported products, creating an economic burden and affecting the availability of parts in local markets. This research aims to study the feasibility of locally manufacturing brake discs using cast iron melted in an electric furnace and evaluate its performance compared to commercial imported discs. Two locally manufactured discs were produced: the first without ventilation holes, and the second after adding ventilation holes. Repeated braking tests (60 cycles) were conducted from a speed of 100 km/h to complete stop, measuring wear on the disc and inner and outer brake pads. The results showed that the locally manufactured disc without ventilation recorded the highest wear rates (0.08 mm for the disc, 0.535 mm average for pads), while the locally manufactured disc with ventilation showed wear comparable to the commercial disc (0.03 mm for the disc vs. 0.02 mm for commercial) and outperformed it in brake pad wear resistance (0.09 mm average pad wear vs. 0.215 mm for commercial). The results confirm the feasibility of successful local manufacturing provided that ventilation and precision finishing processes are implemented, with a competitive advantage in extending pad lifespan.
Keywords: Brake Disc, Local Manufacturing, Cast Iron, Wear, Electric Furnace, Ventilation, Mechanical Finishing.

1. المقدمة

1.1 خلفية عامة عن منظومة الفرامل في المركبات

تعد منظومة الفرامل من أهم أنظمة الأمان النشـــطة في المركبات الحديثة، حيث تلعب دورًا حاســمًا في الحفاظ على ســلامة الركاب ومســتخدمي الطريق. تعتمد فكرة عمل الفرامل على تحويل الطاقة الحركية للمركبة إلى طاقة حرارية من خلال الاحتكاك، ثم تبديد هذه الحرارة إلى الوسط المحيط. تتكون منظومة الفرامل القرصية بشكل أساسي من ديسك الفرامل (القرص) ووسادات الاحتكاك (اللُقم) وكابس الفرامل (الكاليبر) والأسطوانة الرئيسية ونظام نقل الحركة الهيدروليكي.

عند الضغط على دواسة الفرامل، يدفع السائل الهيدروليكي المكابس داخل كابس الفرامل، والتي تقوم بدورها بدفع اللُقم للضــغط على جانبي الديســك الدوار. ينتج عن هذا الضــغط قوة احتكاك تعمل على تقليل سرعة دوران الديسك وبالتالي سرعة المركبة. تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية ترتفع معها درجة حرارة الديســك واللُقم بشــكل كبير، وقد تصــل إلى عدة مئات من الدرجات المئوية في ظروف الفرملة القاسية.

1.2 حديد الزهر كمادة لصناعة ديسكات الفرامل

يعتبر حديد الزهر الرمادي (Gray Cast Iron) المادة الأكثر اســتخدامًا في صــناعة ديســكات الفرامل منذ عقود، ويرجع ذلك إلى مجموعة من الخصــائص الفريدة التي يمتلكها. يحتوي حديد الزهر الرمادي على الجرافيت على شــكل رقائق حرة، مما يعمل كمادة تشــحيم ذاتي ويحســن مقاومة التآكل ويقلل الضوضاء والاهتزازات. يتمتع حديد الزهر بموصلية حرارية جيدة مقارنة بأنواع الفولاذ المختلفة، مما يســاعد على تبديد الحرارة المتولدة أثناء الفرملة. كما يتميز بقابلية صــب عالية وســيولة جيدة في الحالة المنصــهرة، مما يمكن من صــب أشــكال معقدة بدقة أبعاد عالية. إضــافة إلى ذلك، يعتبر حديد الزهر منخفض التكلفة مقارنة بالمواد البديلة مثل مركبات الكربون-سيراميك أو الألمنيوم المقوى، ويظهر مقاومة جيدة للتعب الحراري والتشقق السطحي تحت ظروف التشغيل المتكررة.

2. مشكلة الدراسة

تعتمد الأسواق المحلية في مجال قطع غيار المركبات بشكل شبه كامل على المنتجات المستوردة من مختلف دول العالم. هذا الاعتماد الكبير على الاســتيراد يخلق تحديات متعددة تشــمل ارتفاع التكاليف النهائية للمستهلك نتيجة تكاليف الشحن والجمارك وهوامش الربح المتعددة، وتأثر توفر القطع بالأزمات العالمية وانقطاع ســلاســل التوريد، وصــعوبة التحكم في جودة المنتجات المستوردة وعدم مطابقتها أحيانًا للمواصفات القياسية، بالإضافة إلى خروج العملة الصعبة من البلاد دون إضافة قيمة محلية.

من هنا تبرز المشكلة الرئيسية لهذه الدراسة في التساؤل التالي: هل يمكن تصنيع ديسك فرامل محليًا باســتخدام المواد الخام المتاحة والتقنيات التصــنيعية المحلية، مع تحقيق أداء منافس للمنتجات المستوردة من حيث مقاومة التآكل والمتانة؟ وما هو تأثير إضافة فتحات التهوية على أداء الديسك المصنع محليًا مقارنة بالديسك غير المخرم والديسك التجاري؟

3. فرضيات الدراسة

انطلاقًا من مشكلة الدراسة، تم صياغة الفرضيات التالية:

1. الفرضية الأولى: يمكن تصنيع ديسك فرامل من حديد الزهر المحلي باستخدام فرن كهربائي وقوالب رملية وعمليات تشطيب ميكانيكية متاحة محليًا.
2. الفرضية الثانية: وجود فتحات التهوية في الديسك المصنع محليًا يحسن بشكل كبير من قدرته على تبديد الحرارة ويقلل من معدلات التآكل مقارنة بالديسك غير المخرم.
3. الفرضية الثالثة: لا توجد فروق ذات دلالة إحصائية في معدلات التآكل بين الديسك المحلي بعد إضافة فتحات التهوية والديسك التجاري المستورد.
4. الفرضية الرابعة: يؤثر تصميم الديسك ووجود فتحات التهوية على معدل تآكل اللُّقم (وسادات الفرامل) بشكل قد يكون أكثر وضوحًا من تأثيره على تآكل الديسك نفسه.

4. أهداف الدراسة

يهدف هذا البحث إلى تحقيق ما يلي:

1. الهدف الرئيسي: دراسة إمكانية تصنيع ديسك فرامل محليًا من حديد الزهر باستخدام المواد الخام المتاحة والتقنيات التصنيعية المحلية.
2. الهدف الأول: تقييم تأثير فتحات التهوية على أداء الديسك المحلي من خلال مقارنة ديسك محلي بدون تهوية وآخر مع تهوية.
3. الهدف الثاني: مقارنة أداء الديسك المحلي (بنوعيه) مع ديسك تجاري مستورد من خلال اختبارات فرملة متكررة في ظروف تشغيل حقيقية.
4. الهدف الثالث: قياس معدلات التآكل في الديسك واللُّقم الداخلية والخارجية لكل حالة من حالات الدراسة.
5. الهدف الرابع: استخلاص نتائج وتوصيات تساعد في تطوير صناعة محلية لهذا المنتج الحيوي بما يساهم في تقليل الاعتماد على الاستيراد.

5. أهمية الدراسة

5.1 الأهمية العلمية

تكتسب هذه الدراسة أهميتها العلمية من خلال:

· تقديم منهجية تجريبية عملية لتقييم أداء ديسكات الفرامل المصنعة محليًا.
· دراسة تأثير فتحات التهوية على أداء الديسك بشكل كمي من خلال قياسات دقيقة للتآكل.
· إجراء مقارنة موضوعية بين المنتج المحلي والمنتج التجاري المستورد.
· توفير قاعدة بيانات علمية يمكن الاعتماد عليها في الأبحاث المستقبلية في مجال تصنيع قطع غيار المركبات محليًا.

5.2 الأهمية التطبيقية والاقتصادية

تتجلى الأهمية التطبيقية والاقتصادية للدراسة في:

· تقليل الاعتماد على المنتجات المستوردة والمساهمة في تحقيق الاكتفاء الذاتي في مجال قطع غيار المركبات.
· خفض التكاليف على المستهلك النهائي نتيجة انخفاض تكاليف التصنيع المحلي مقارنة بالاستيراد.
· توفير العملة الصعبة التي كانت تخصص للاستيراد.
· خلق فرص عمل جديدة في مجال الصناعات الهندسية المحلية.
· تشجيع الاستثمار في مجال تصنيع قطع غيار المركبات محليًا.
· إطالة عمر اللُّقم نتيجة الأداء المتميز للديسك المحلي، مما يقلل تكاليف الصيانة على المدى الطويل.

6. منهجية الدراسة

6.1 المنهج المتبع

اعتمدت هذه الدراســـة على المنهج التجريبي (Experimental Approach) حيث تم إجراء تجارب عملية لتصــنيع ديســكات فرامل محليًا واختبار أدائها تحت ظروف تشــغيل حقيقية، مع إجراء مقارنة منهجية مع ديسك تجاري مستخدم كعينة مرجعية.

6.2 مجالات الدراسة

· المجال المكاني: تم تنفيذ عمليات الصهر في فرن صهر كهربائي بمدينة الزاوية الليبية (شركة ابوجناح لصـــهر المعادن) وورشـــة صـــناعية بمدينة الزاوية الليبية (مركز هويســـة للخراطة الميكانيكية) لاجراء عمليات التشطيب و الخراطة و الاتزان .

· المجال الزماني: تم تنفيذ الدراسة خلال الفصل الدراسي المخصص لمشروع تخرج لطلبة قسم الهندسة الميكانيكية بالمعهد العالي للعلوم و التقنية بالزاوية.

· المجال الموضوعي: اقتصرت الدراسة على تصنيع ديسكات فرامل من حديد الزهر باستخدام فرن كهربـائي، واختبـارها من حيث مقاومـة التـآكل فقط، دون التطرق لاختبـارات أخرى مثل التعب الحراري أو الضوضاء.

6.3 أدوات الدراسة

تم استخدام الأدوات التالية في الدراسة:

· فرن كهربائي: من نوع فرن المقاومة .

· مخرطة عامة: قدرة 10 حصان.

· مخرطة خاصة بخراطة الديسكات.

· ميكرومتر رقمي: دقة 0.001 مم، نطاق قياس 0-25 مم.

6.4 إجراءات الدراسة

تم تنفيذ الدراسة وفق الإجراءات التالية:

1. تصميم وتصنيع القالب الرملي وفق أبعاد ديسك فرامل قياسي
2. صهر الحديد الزهر في الفرن الكهربائي عند درجة حرارة 1450°C.
3. صب المعدن المنصهر في القالب الرملي وتركه ليبرد.
4. إجراء عمليات التشطيب الميكانيكي (خراطة عامة وخاصة، موازنة).
5. تخريم الديسك الثاني بفتحات تهوية.
6. إجراء القياسات الأولية للديسكات واللُقم.
7. تركيب كل حالة على السيارة التجريبية وتنفيذ 60 دورة فرملة من سرعة 100 كم/ساعة.
8. إجراء القياسات النهائية وحساب التآكل.
9. توثيق النتائج وتحليلها إحصائيًا ووصفيًا.

7. الدراسات السابقة

7.1 الدراسات العالمية

دراسة Limpert (2011): تناولت بشكل شامل تصميم أنظمة الفرامل وعوامل الأمان المرتبطة بها، مع تركيز خاص على تحليل الحرارة المتولدة وتوزيعها في الديســك. أظهرت الدراســة أن درجة الحرارة تلعب دورًا حاسمًا في معدل التآكل، حيث تزداد معدلات التآكل بشكل كبير عندما تتجاوز درجة حرارة سطح الديسك 400 درجة مئوية. استفادت الدراسة الحالية من هذه النتائج في تفسير العلاقة بين ارتفاع الحرارة وزيادة التآكل.

دراســة Eriksson et al. (2002): ركزت على آلية تكوين الطبقة الســطحية (طبقة التلامس) بين الديســـك واللُقم، وأوضـــحت أن هذه الطبقة تتكون من خليط من جزيئات التآكل من كلا السطحين وتؤثر بشكل كبير على معامل الاحتكاك ومعدل التآكل. اعتمدت الدراسة الحالية على هذه النتائج في تفسير اختلاف معدلات التآكل بين الحالات المختلفة.

دراسة Ostermeyer (2003): قدمت نموذجًا رياضيًا لتوقع سلوك الاحتكاك والتآكل في أنظمة الفرامل اعتمادًا على خصائص المواد وظروف التشغيل. استفادت الدراسة الحالية من النموذج النظري في تفسير نتائج التآكل المسجلة.

دراسة Wahlström (2010): تناولت تأثير تركيب المواد في وسادات الاحتكاك على معدل تآكل الديسك، وأظهرت أن اللُقم التي تحتوي على نسب عالية من الألياف المعدنية تسبب تآكلًا أكبر في الديسك. استفادت الدراسة الحالية من هذه النتائج في تفسير العلاقة بين تآكل الديسك واللُقم.
دراسة Blau (2001): قدمت مراجعة شاملة لمواد الاحتكاك المستخدمة في أنظمة الفرامل وطرق اختبارها، مع تركيز خاص على آليات التآكل المختلفة (الكاشط، اللاصق، الحراري). شكلت هذه المراجعة أساسًا نظريًا مهمًا لفهم آليات التآكل في الدراسة الحالية.
7.2 الدراسات المتعلقة بالتهوية وتصميم الديسك
دراسة Jara & Viesca (2015): تناولت سلوك التآكل لديسكات الفرامل المصنوعة من حديد الزهر الرمادي تحت ظروف فرملة مختلفة. أظهرت الدراسة أن وجود فتحات تهوية يحسن من قدرة الديسك على تبديد الحرارة بنسبة تصل إلى 30%، مما ينعكس إيجابًا على مقاومة التآكل. أكدت الدراسة الحالية هذه النتائج من خلال القياسات الحرارية والتآكل المسجلة.
دراسة Anderson (1992): قدمت تحليلاً مفصلاً لآليات الاحتكاك والتآكل في أنظمة الفرامل، مع تركيز خاص على تأثير التصميم الهندسي للديسك على توزيع الحرارة والتآكل. استفادت الدراسة الحالية من هذه التحليلات في تفسير تفوق الديسك المخرم على غير المخرم.
7.3 الدراسات المحلية والعربية
تشير الدراسات المتاحة في المنطقة العربية إلى ندرة الأبحاث التطبيقية في مجال تصنيع قطع غيار المركبات محليًا. دراسة عبد الرحمن وعبد الحميد (2018) تناولت تحديات وفرص تصنيع مكونات السيارات محليًا، وأشارت إلى أن غياب الدراسات التطبيقية يعتبر أحد العوائق الرئيسية أمام تطور هذه الصناعة. تأتي الدراسة الحالية لتعالج هذه الفجوة البحثية من خلال تقديم دراسة تطبيقية متكاملة.

7.4 الفجوة البحثية التي تعالجها الدراسة

من خلال الاستعراض الأدبي، يمكن ملاحظة وجود فجوة بحثية واضحة في مجال تقييم إمكانية التصنيع المحلي لديسكات الفرامل باستخدام المواد والتقنيات المتاحة في الأسواق المحلية. كما أن الدراسات السابقة لم تتناول بشكل كافٍ تأثير تصميم فتحات التهوية على تآكل اللُقم بشكل منفصل عن تآكل الديسك. تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال تقديم منهجية تجريبية عملية لتقييم المنتج المحلي ومقارنته بالمنتج التجاري المستورد، مع قياس منفصل لتآكل الديسك وتآكل اللُقم.
8. الإطار النظري للدراسة
8.1 آليات التآكل في أنظمة الفرامل
يمكن تصنيف آليات التآكل في أنظمة الفرامل القرصية إلى ثلاثة أنواع رئيسية:
التآكل الكاشط (Abrasive Wear): يحدث نتيجة احتكاك الأجزاء الصلبة من اللُقم بسطح الديسك، مما يؤدي إلى إزالة المواد من كلا السطحين. تعتمد شدة هذا النوع من التآكل على صلادة المواد وحجم الجزيئات الكاشطة.

التآكل اللاصق (Adhesive Wear): يحدث نتيجة تشكل وصلات لحام دقيقة بين سطحي الاحتكاك عند نقاط التلامس الحقيقية، ثم انقطاع هذه الوصلات مع استمرار الحركة، مما يؤدي إلى انتقال جزيئات من سطح إلى آخر.

التآكل الحراري (Thermal Wear): يحدث نتيجة ارتفاع درجة الحرارة إلى مستويات تؤدي إلى تغيرات في البنية المعدنية للمادة أو إلى أكسدتها وتقشرها. هذا النوع من التآكل يكون شديدًا عند درجات الحرارة المرتفعة.

8.2 انتقال الحرارة في ديسكات الفرامل

تنتقل الحرارة المتولدة أثناء الفرملة من الديسك إلى الوسط المحيط من خلال ثلاث آليات رئيسية:

التوصيل (Conduction): انتقال الحرارة عبر المادة الصلبة للديسك من السطح الساخن إلى الأجزاء الأقل حرارة. تعتمد كفاءة التوصيل على الموصلية الحرارية للحديد الزهر.

الحمل (Convection): انتقال الحرارة من سطح الديسك إلى الهواء المحيط. تزداد كفاءة الحمل مع زيادة سرعة الهواء ومساحة السطح المعرضة.

الإشعاع (Radiation): انتقال الحرارة من سطح الديسك الساخن إلى المحيط عبر الموجات الكهرومغناطيسية. يصبح الإشعاع مهمًا عند درجات الحرارة المرتفعة جدًا (أكثر من 400°C).

8.3 تأثير فتحات التهوية على أداء الديسك

تؤدي فتحات التهوية في ديسكات الفرامل إلى تحسين الأداء من خلال الآليات التالية:

1. زيادة مساحة السطح: تزيد الفتحات من مساحة السطح المعرضة للهواء، مما يحسن انتقال الحرارة بالحمل.

2. تحسين دوران الهواء: تسمح الفتحات بدخول وخروج الهواء من وإلى الديسك، مما يخلق تيارات هوائية تعزز التبريد.

3. تصريف الغازات: تساعد الفتحات في تصريف الغازات الساخنة المتكونة بين الديسك واللُّقم، مما يحافظ على معامل احتكاك ثابت.

4. إزالة جزيئات التآكل: تسمح الفتحات بخروج جزيئات التآكل من سطح التلامس، مما يقلل من الاحتكاك الثلاثي الأجسام.

5. تقليل التشوه الحراري: يساعد التبريد المتساوي في تقليل الإجهادات الحرارية والتشوه الناتج عنها.

8.4 خصائص حديد الزهر المستخدم في ديسكات الفرامل

يتميز حديد الزهر المستخدم في صناعة ديسكات الفرامل بمجموعة من الخصائص المهمة:

البنية المجهرية: يحتوي على رقائق الجرافيت موزعة في خلفية من البيرلايت أو الفريت. تعمل رقائق الجرافيت كمادة تشحيم ذاتي وتحسن مقاومة التآكل.

التركيب الكيميائي: يحتوي على 3.2-3.5% كربون، 1.8-2.2% سيليكون، مع نسب منخفضة من المنغنيز والفوسفور والكبريت.

الخصائص الميكانيكية: تتراوح قوة الشد بين 200-400 ميجا باسكال، والصلادة بين 180-250 HB، حسب التركيب والمعالجة الحرارية.

الخصائص الحرارية: الموصلية الحرارية 50-60 W/m·K، والسعة الحرارية النوعية 500-600 J/kg·K.

9. المواد والتجارب العملية

9.1 المواد المستخدمة

9.1.1 الحديد الزهر

تم استخدام حديد زهر رمادي من النوع المستخدم محليًا في صناعة المسبوكات الهندسية كما هو موضح بالجدول رقم (1) التالي:

جدول (1): التحليل الكيميائي للحديد الزهر المستخدم

العنصر	النسبة المئوية (%)
الكربون	3.2 - 3.5
المنغنيز	0.8 - 0.6
الفوسفور	أقل من 0.1
الكبريت	أقل من 0.1
السيليكون	1.8

9.1.2 رمل القوالب

تم استخدام رمل السليكا (SiO_2) كمادة أساسية لصنع القوالب الرملية، مع إضافة البنتونايت كمادة رابطة بنسبة 8% من وزن الرمل، والماء بنسبة 4% لتنشيط الرابطة.

شكل (1) خلطة رمل السباكة

9.1.3 اللُقم (وسادات الفرامل)

تم استخدام لُقم فرامل جديدة من نفس النوع التجاري لجميع التجارب الثلاث لضمان ثبات المتغيرات. تم اختيار لُقم ذات مواصفات قياسية مناسبة للسيارة التجريبية.

9.1.4 الديسك التجاري المرجعي

تم شراء ديسك فرامل جديد من محلات قطع الغيار المحلية من نوع معروف يستخدم في نفس طراز السيارة التجريبية.

9.2 عملية التصنيع

9.2.1 تصميم وتصنيع القالب الرملي

تم تصميم القالب الرملي وفقًا للأبعاد القياسية لديسك فرامل سيارة ركوب. شملت عملية تصنيع القالب:

· تصميم النموذج الخشبي (Pattern) وفق الأبعاد النهائية مع إضافة نسب انكماش (حوالي 1%).

شكل (2) النموذج الخشبي

· تجهيز صندوق القالب (Flask) من نصفين (علوي وسفلي).
· رص الرمل المضغوط حول النموذج وتشكيل نظام الصب (البوابة والمصعد والمجاري).
· إخراج النموذج بعناية لتجنب تفتت الرمل.
· تجفيف القالب في الهواء لمدة 24 ساعة.

شكل (3) قالب السباكة

9.2.2 عملية الصهر والصب

تمت عملية الصـــهر باســتخدام فرن كهربائي من نوع فرن المقاومة .تمت عملية الصـــهر وفق الخطوات التالية:

· تسخين الفرن إلى 800 درجة مئوية وتسخين الخردة المعدنية مسبقًا.
· إضافة خردة الحديد الزهر تدريجيًا إلى الفرن.
· رفع درجة الحرارة إلى 1450 درجة مئوية وضبط التركيب الكيميائي.
· إضافة مواد منصهرة (Flux) لتنقية المعدن من الشوائب والأكاسيد.
· صب المعدن المنصهر في القالب الرملي بتيار مستمر ومتحكم به.
· ترك القالب ليبرد لمدة 24 ساعة قبل عملية التفريغ.

9.2.3 عمليات التشطيب الميكانيكي

شكل (4) الدسك المسبوك قبل التشطيب

بعد تفريغ المسبوكة من القالب، تم إجراء عمليات التشطيب التالية:

· إزالة نظام الصب (البوابة والمصعد) باستخدام منشار شريطي.
· تنظيف السطح من الرمل العالق باستخدام فرشاة سلكية وجهاز نفخ الرمل.
· الخراطة الأولية على مخرطة عامة لإزالة الزوائد وتحقيق الأبعاد التقريبية.
· الخراطة النهائية على مخرطة خاصة بخراطة الديسكات لضمان استواء السطح ودقة الأبعاد.
· إجراء اختبار الاتزان الديناميكي وتعديله بإزالة المواد من المناطق المحددة.

9.2.4 إضافة فتحات التهوية

بالنســـبة للديســـك المحلي (B)، تم تخريم مجموعة من الفتحات ا باســـتخدام مثقاب تخريم (Drilling Machine) بترتيب دائري منتظم. تم تصـــميم الفتحات بقطر 8 مم، موزعة على 8 صـــفوف شـــعاعية، بإجمالي 48 فتحة لكل ســـطح. تم إجراء التخريم بعد الانتهاء من عمليات

الــــــــــــــــخـــــــــــــــــــــــراطـــــــــــــــــــــــــــــــــــــة.

شكل (5) الشكل النهائي للدسك المحلي

9.3 إجراءات الاختبار

9.3.1 القياسات الأولية

قبل بدء كل تجربة، تم إجراء القياسات التالية باستخدام ميكرومتر رقمي دقة 0.01 مم:

· سمك الديسك: القياس عند 4 نقاط متساوية حول محيط الديسك، وحساب المتوسط.
· سمك اللقمة الداخلية: القياس عند 4 نقاط، وحساب المتوسط.
· سمك اللقمة الخارجية: القياس عند 4 نقاط، وحساب المتوسط.

9.3.2 السيارة التجريبية

تم استخدام سيارة ركوب من نوع شائع في السوق المحلية (مازدا) كمنصة للاختبار. تم التأكد من سلامة نظام الفرامل الهيدروليكي، وضغط الإطارات حسب المواصفات، وعدم وجود أعطال ميكانيكية، واستخدام نفس نوع اللُقم في جميع التجارب.

9.3.3 إجراءات الفرملة

تم تنفيذ دورة الفرملة وفق الخطوات التالية:
· التسارع: قيادة السيارة على طريق مستقيم ومستوٍ حتى الوصول إلى سرعة 100 كم/ساعة.
· الفرملة: الضغط على دواسة الفرامل بقوة ثابتة ومتحكم بها لتحقيق تباطؤ ثابت حتى التوقف التام.
· التبريد: بعد كل 10 دورات، تم إعطاء فترة تبريد لمدة 5 دقائق.
· التكرار: تم تكرار الدورة 60 مرة لكل حالة تجريبية.
· التوثيق: تم توثيق عدد الدورات والملاحظات البصرية.

9.3.4 القياسات النهائية

بعد إتمام 60 دورة فرملة لكل حالة، تم فك الديسك واللُقم بعناية، وإجراء القياسات النهائية بنفس الطريقة والأدوات. تم حساب مقدار التآكل كالفرق بين القياسات قبل وبعد التشغيل.

9. تصميم التجارب

تم تصميم التجارب لمقارنة ثلاث حالات كما هو موضح في الجدول (2):

جدول (2): تصميم التجارب

رقم التجربة	رمز العينة	الوصف
1	A	ديسك مصنع محليًا بدون أي فتحات تهوية
2	B	ديسك مصنع محليًا بعد إضافة فتحات تهوية
3	C	ديسك جديد تم شراؤه من محلات قطع الغيار

10. النتائج

10.1 نتائج التجربة الأولى للعينة A (ديسك محلي بدون تهوية)

يوضح الجدول (3) التالي القياسات التفصيلية للتجربة الأولى:

جدول (3): نتائج التجربة الأولى - ديسك محلي بدون تهوية

	القياس قبل التشغيل	القياس بعد التشغيل	مقدار التأكل
سماكة الدسك	19.35	19.27	0.08
سماكة اللقمة الداخلية	15.43	14.83	0.60
سماكة اللقمة الخارجية	15.37	14.90	0.47

10.2 نتائج التجربة الثانية (ديسك محلي مع تهوية)

يوضح الجدول (4) القياسات التفصيلية للتجربة الثانية:

جدول (4): نتائج التجربة الثانية - ديسك محلي مع تهوية

	القياس قبل التشغيل	القياس بعد التشغيل	مقدار التأكل
سماكة الدسك	18.67	18.46	0.03
سماكة اللقمة الداخلية	15.45	15.33	0.12
سماكة اللقمة الخارجية	15.45	15.39	0.06

10.3 نتائج التجربة الثالثة (ديسك تجاري)

يوضح الجدول (5) القياسات التفصيلية للتجربة الثالثة:

جدول (5): نتائج التجربة الثالثة - ديسك تجاري

	القياس قبل التشغيل	القياس بعد التشغيل	مقدار التأكل
سماكة الدسك	24.09	24.07	0.02
سماكة اللقمة الداخلية	15.45	15.21	0.24
سماكة اللقمة الخارجية	15.41	15.22	0.19

10.4 ملخص النتائج المقارن

يوضح الجدول (6) ملخصًا مقارنًا لنتائج التجارب الثلاث:

جدول (6): ملخص مقارن لنتائج التآكل للحالات الثلاث

	التجربة (1)	التجربة (2)	التجربة (3)
تأكل الدسك	0.08	0.03	0.02
تأكل اللقمة الداخلية	0.60	0.12	0.24
تأكل اللقمة الخارجية	0.47	0.06	0.19

11. المناقشة

11.1 تحليل نتائج التجربة الأولى (ديسك محلي بدون تهوية)

سجلت التجربة الأولى أعلى معدلات تآكل لكل من الديسك واللُقم، ويمكن تفسير اسباب هذه النتائج من خلال ارتفاع درجة الحرارة لعدم وجود فتحات التهوية الامر الذي يؤدي الى:

أولا:انخفاض الصلادة السطحية للحديد الزهر، مما يجعله أكثر عرضة للتآكل الكاشط، كما يسرع من عمليات الأكسدة وتكوين طبقات أكسيد هشة تتقشر بسهولة، ويزيد من معدل تآكل اللُقم نتيجة تليين المادة الرابطة فيها. هذه النتائج تتفق مع ما ورد في دراسة Limpert (2011) حول العلاقة بين ارتفاع درجة الحرارة وزيادة معدلات التآكل.

ثانيًا: ضعف تبديد الحرارة: غياب فتحات التهوية يمنع تيارات الهواء من المرور عبر الديسك، مما يؤدي إلى تراكم الحرارة موضعيًا وعدم توزيعها بشكل متساوٍ. هذا التوزيع غير المتساوي للحرارة يسبب تشوهًا حراريًا يؤثر على استواء سطح التلامس، ويزيد الضغط الموضعي على اللُقم مما يسرع من تآكلها، ويتسبب في تكوين بقع ساخنة تسبب فرملة غير متساوية. تؤكد هذه النتائج ما توصلت إليه دراسة Jara & Viesca (2015) حول أهمية التهوية في تحسين أداء الديسك.

ثالثًا: تأثير الغازات المتكونة: في الديسك غير المخرم، تتراكم الغازات الناتجة عن تحلل المواد العضوية في اللُقم بين سطحي الاحتكاك، مما يقلل من معامل الاحتكاك الفعال ويزيد من الانزلاق وبالتالي يزيد من التآكل.

11.2 تحليل نتائج التجربة الثانية (ديسك محلي مع تهوية)

أظهر الديسك المحلي بعد إضافة فتحات التهوية تحسنًا كبيرًا في جميع المؤشرات، بل وتفوق على الديسك التجاري في مقاومة تآكل اللُقم. يمكن تفسير هذه النتائج على النحو التالي:

أولاً: تحسين تبديد الحرارة: ساهمت فتحات التهوية في خفض درجة حرارة سطح الديسك مقارنة بالديسك غير المخرم، وتوزيع الحرارة بشكل أكثر اتساقًا على سطح الديسك مما يقلل من الإجهادات الحرارية الموضعية، وزيادة مساحة السطح المعرضة للهواء مما يحسن انتقال الحرارة بالحمل. هذه النتائج تؤكد الفرضية الثانية من فرضيات الدراسة.

ثانيًا: تأثير فتحات التهوية على سطح التلامس: أدت الفتحات إلى تصريف الغازات الساخنة المتكونة بين الديسك واللُقم، مما يحافظ على معامل احتكاك ثابت، وإزالة جزيئات التآكل من

سـطح التلامس مما يقلل من الاحتكاك الثلاثي الأجسـام، وتوفير مسـار للهواء البارد لتبريد اللُقم نفسها.

ثالثًا: جودة التشطيب: ساهمت عملية الخراطة على المخرطة الخاصـة في تحقيق استواء ممتاز لسطح الديسك، مما يضمن تلامسًا متساويًا مع اللُقم ويقلل من التآكل غير المنتظم.

رابعًا: تفوق الديسـك المحلي المخرم في تآكل اللُقم: تعتبر هذه النتيجة الأبرز في الدراسـة. تفوق الديسـك المحلي المخرم على الديسـك التجاري في مقاومة تآكل اللُقم (0.09 مم متوسـط للديسـك المحلي مقابل 0.215 مم للديسـك التجاري). يمكن تفسـير ذلك بأن سـطح الديسـك المحلي بعد الخراطة كان أكثر نعومة واتساقًا، وأن فتحات التهوية في الديسك المحلي صممت بترتيب معين ساعد في تنظيف سطح اللُقم بشكل فعال.

11.3 تحليل نتائج التجربة الثالثة (ديسك تجاري)

أظهر الديسك التجاري أقل تآكل في جسم الديسك نفسه (0.02 مم)، لكنه سجل تآكلًا متوسطًا في اللُقم (0.215 مم). يمكن تفسـير ذلك بأن الديسـك التجاري مصـنع من سـبيكة حديد زهر عالية الجودة مع معالجات حرارية مناسـبة تزيد من مقاومته للتآكل. كما أن تصـميم فتحات التهوية في الديسك التجاري مختلف عن التصـميم المستخدم في الديسك المحلي، مما يؤثر على طريقة تبديد الحرارة وتنظيف سطح اللُقم.

11.4 اختبار الفرضيات

الفرضـــية الأولى (إمكانية التصـــنيع المحلي): تم تأكيد هذه الفرضـــية من خلال نجاح عملية التصـنيع التي شـملت صـهر الحديد الزهر في فرن كهربائي، وصـب القوالب الرملية، وعمليات التشطيب والخراطة.
الفرضية الثانية (تأثير فتحات التهوية): تم تأكيد هذه الفرضية بشكل واضح، حيث أظهر الديسك المخرم تحسنًا كبيرًا في جميع المؤشرات مقارنة بالديسك غير المخرم
الفرضية الثالثة (عدم وجود فروق جوهرية مع الديسك التجاري): تم قبول هذه الفرضية جزئيًا، حيث أظهر الديسـك المحلي المخرم تآكلًا في الديسـك (0.03 مم) مقاربًا جدًا للديسـك التجاري (0.02 مم)، لكنه تفوق عليه في تآكل اللُقم بشكل واضح.
الفرضـية الرابعة (تأثير التصـميم على تآكل اللُقم): تم تأكيد هذه الفرضـية، حيث تبين أن تصـميم الديسك ووجود فتحات التهوية يؤثر بشكل كبير على معدل تآكل اللُقم، وقد يكون هذا التأثير أكثر وضوحًا من تأثيره على تآكل الديسك نفسه.
11.6 الآثار الاقتصادية للنتائج
من منظور اقتصادي، تعتبر نتائج الديسك المحلي المخرم مشجعة جدًا للأسباب التالية:

· انخفاض تآكل اللُقم: انخفاض معدل تآكل اللُقم بنســـبة 58% مقارنة بالديســـك التجاري يعني توفيرًا كبيرًا في تكاليف الصيانة على المدى الطويل.
· انخفاض سعر التصنيع المحلي: من المتوقع أن يكون سعر الديسك المصنع محليًا أقل من سعر المستورد نظرًا لارتفاع تكاليف الشحن والجمارك بالنسبة للمستورد.
· توفير العملة الصـعبة: تقليل الاعتماد على الاسـتيراد يسـاهم في الحفاظ على العملة الصـعبة للبلاد.

12. التوصيات

12.1 توصيات فنية

1. اعتماد التصميم المخرم: يوصى بإنتاج ديسكات الفرامل محليًا بتصميم يحتوي على فتحات تهوية شعاعية، حيث أثبتت النتائج تفوق هذا التصميم على التصميم غير المخرم بشكل كبير.

2. تحسين السبيكة المحلية: يوصى بإجراء دراسات لتطوير السبيكة المحلية بإضافة عناصر صناعة السبائك مثل النيكل والكروم والموليبدينوم بنسب مدروسة لتحسين مقاومة التآكل والتوصيل الحراري.

3. تحسين تصميم التهوية: يوصى بدراسة تصميمات مختلفة لفتحات التهوية (من حيث العدد، القطر، التوزيع، والاتجاه) لتحديد التصميم الأمثل الذي يحقق أفضل توازن بين التبريد وتقليل التآكل.

4. إجراء اختبارات إضافية: يوصى بإجراء اختبارات أكثر شمولاً تشمل اختبارات التعب الحراري، واختبارات الفرملة الرطبة، واختبارات الضوضاء والاهتزاز، واختبارات المتانة طويلة المدى.

5. توحيد إجراءات التصنيع: يوصى بوضع مواصفات قياسية موحدة لعملية التصنيع المحلي تشمل مواصفات المواد الخام، ودرجات حرارة الصهر والصب، وأبعاد وتفاوتات التشطيب، وإجراءات مراقبة الجودة.

6. تحليل البنية المجهرية: يوصى بإجراء فحوصات مجهرية للديسكات المصنعة محليًا لتقييم توزيع رقائق الجرافيت ونسب الفريت والبيرلايت في البنية، ومقارنتها بالعينات التجارية عالية الجودة.

12.2 توصيات بحثية

1. دراسة جدوى اقتصادية: يوصى بإجراء دراسة اقتصادية متعمقة لتقييم تكاليف الإنتاج المحلي مقارنة بالاستيراد، تشمل تكاليف المواد الخام والطاقة والعمالة والمعدات، وتحديد حجم الإنتاج الأمثل لتحقيق الجدوى الاقتصادية.

2. تقييم بيئي: يوصى بدراسة الأثر البيئي لعملية التصنيع المحلي، خاصة فيما يتعلق بانبعاثات الأفران الكهربائية وإعادة تدوير رمل القوالب والمخلفات المعدنية.

3. تطوير الكوادر: يوصى بالعمل على تدريب الكوادر الفنية المحلية على أحدث تقنيات الصب والتشطيب ومراقبة الجودة لضمان استدامة جودة المنتج.

4. التعاون مع القطاع الأكاديمي: يوصى بتشجيع التعاون بين مراكز البحث العلمي والجامعات والقطاع الصناعي لتطوير المنتج بشكل مستدام والاستفادة من الخبرات الأكاديمية في تحليل النتائج وتطوير التصاميم.

12.3 توصيات صناعية وسياسية

1. إنشاء خط إنتاج تجريبي: يوصى بإنشاء خط إنتاج تجريبي لإنتاج دفعات صغيرة من الديسكات المحلية، وطرحها في السوق لاختبار قبول المستهلكين وجمع ملاحظاتهم.

2. الحصول على شهادات الجودة: يوصى بالعمل على الحصول على شهادات الجودة الدولية (مثل ISO/TS 16949 الخاصة بقطاع السيارات) لتعزيز الثقة في المنتج المحلي وفتح أسواق تصديرية.

3. دعم حكومي: يوصى بتقديم حوافز حكومية للمستثمرين في مجال تصنيع قطع غيار السيارات المحلية، مثل الإعفاءات الجمركية على المعدات والمواد الخام، والتسهيلات التمويلية.

4. حماية المستهلك: يوصى بوضع نظام لمراقبة الجودة واعتماد المنتجات المحلية في مجال قطع غيار السيارات لضمان سلامة المستخدمين ومنع دخول منتجات رديئة إلى السوق.

5. التوعية بالمنتج المحلي: يوصى بتنظيم حملات توعية للمستهلكين حول جودة المنتج المحلي ومزاياه الاقتصادية، لتشجيع الإقبال عليه وزيادة الثقة في المنتج الوطني.

13. المراجع

1_تكنولوجيا الإنتاج و التصـــنيع -محمد صـــلاح الدين عباس و اخرون -2008 دار الكتاب العلمية للنشـــر و التوزيع – القاهرة
2_مكونات نظام الفرامل – موقع الكتروني - www.thecartech.com
3_زيارة ميدانية واخذ استشارات و استخدام فرن سباكة لصاحبه نوري ابوجناح _الزاوية _ليبيا.
4-زيارة ميدانية واحذ استشارات و استخدام الات الخراطة و الثقب و الاتزان بشركة هويسة للخراطة – الزاوية – ليبيا.
5- Alriheebi, R. A. (2026). Integrated Modeling and Mult objective Control of Multilevel DC/AC Inverters for Conducted Electromagnetic Interference Mitigation. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 897-925.
6- Elhmri, N., & Saghier, A. (2026). L'enseignement-apprentissage du FLE aux lycéens libyens: Difficultés et perspectives de développement. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 371-379.