مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

تقييم اهتراء مواد مفصل الورك الصناعي باستخدام مؤشر HCI والذكاء الاصطناعي التفسيري

د. أحمد سلامة*

أ. د. محمد أيهم درويش**

م. هبة محسن غدير***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٢٨ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٣/٢٦)

□ ملخّص □

قدّم هذا البحث منهجية متكاملة لتطوير وتطبيق معيار كمي موضوعي ((Hip Corrosion Index (HCI) لتصنيف وتقييم أداء اهتراء مواد مفصل الورك الصناعي، بالاعتماد على محاكاة العناصر المنتهية وتحليل إحصائي متعدد المستويات. ركزت الدراسة على مقارنة تركيبتين شائعتين من المواد :الألومينا–بولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي (Alumina–UHMWPE) والزركونيا–بولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي (Zirconia–UHMWPE).

تم في هذا العمل إجراء محاكاة ديناميكية واقعية باستخدام طريقة العناصر المنتهية تحت ظروف تحميل مشابهة للمشي، وتم استخراج ثمانية مقاييس أداء رقمية (التشوه، الحجم، الضغط، مسافة الانزلاق، الفجوة، الاختراق، عمق الاهتراء، حجم الاهتراء). ثم خضعت هذه البيانات لتحليل إحصائي متقدم من مرحلتين: (١) تحليل وصفي لتحديد النزعة المركزية والتشتت، و (٢) اختبارات فرضيات (Kruskal–Wallis) متبوعاً بمقارنات زوجية باستخدام نموذج Wilcoxon–Mann–Whitney مع تصحيح (Bonferroni) للتحقق من الدلالة الإحصائية للفروق بين التركيبتين.

تم تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي التفسيري (SHAP) لتحديد العوامل الميكانيكية الأكثر تأثيراً في الاهتراء. أظهرت نتائج تطبيق المؤشر تفوقاً واضحاً لتركيبة (Alumina–UHMWPE) حيث سجلت أدنى درجة على مؤشر HCI بلغت **27.60**، مما يعكس أداءها المتفوق في مقاومة الاهتراء، بينما سجلت تركيبة .(Zirconia–UHMWPE) قيمة أعلى لمعامل الاهتراء قدرها **28.14**، كما أظهر تحليل SHAP أن عمق الاهتراء وحجمه هما العاملان الرئيسيان في التقييم الديناميكي لأداء المواد.

الكلمات المفتاحية: اهتراء مفصل الورك الصناعي، البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي، التقييم الكمي للاهتراء

* أستاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والإنتاج– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية– اللاذقية– سورية– إيميل salamahahmad@gmail.com

** أستاذ– قسم هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – طرطوس– سورية– إيميل ayham.darwich@gmail.com

*** طالبة دراسات عليا (دكتوراه)–قسم هندسة التصميم والإنتاج– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية – اللاذقية– سورية– إيميل hiba.ghadir91@gmail.com

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

Assessing the wear of artificial hip joint materials using the Intelligent HCI Index and Explainable AI

Dr. Ahmad Salamah*
Pro. Dr. Mohammad Ayham Darwich**
Eng. Hiba Mohsen Ghadir***

(Received 28/12/2025 . Accepted 26/3/2026)

□ ABSTRACT □

This study introduces a comprehensive methodology for developing and implementing an objective quantitative metric, the Hip Corrosion Index (HCI), designed to classify and assess the wear performance of artificial hip joint materials. The investigation specifically compares two prevalent material combinations in orthopedic applications: Alumina-UHMWPE and Zirconia-UHMWPE. Realistic dynamic simulations mimicking gait conditions were performed using finite element analysis, yielding eight critical performance parameters: total deformation, volume, contact pressure, sliding distance, interfacial gap, penetration depth, wear depth, and wear volume. Subsequent statistical analysis proceeded to characterize central tendencies and dispersion patterns . To elucidate the underlying mechanical drivers of wear performance, explainable artificial intelligence techniques, specifically SHapley Additive exPlanations (SHAP), were implemented. The application of the HCI metric revealed the distinct superiority of the Alumina-UHMWPE combination, which achieved the optimal HCI score of **27.60**, indicative of enhanced wear resistance. Conversely, the Zirconia-UHMWPE combination demonstrated a comparatively higher HCI value of **28.14**. SHAP analysis provided interpretable insights, identifying wear depth and wear volume as the predominant factors influencing material performance rankings.

Keywords: Artificial Hip Joint Wear, UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene), Quantitative Wear Assessment.

* **Assistant Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia University, Syria, Email :** salamahahmad@gmail.com

** **Professor, Department of Industrial Automation Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria, Email:** ayham.darwich@gmail.com

*** **PhD graduate student, Department of Design and Production Engineering,Faculty of Mechanical and electrical engineering, Lattakia University, Syria, Email:** hiba.ghadir91@gmail.com

المقدمة:

يُعد الاهتراء أحد التحديات الفيزيولوجية–الميكانيكية الأساسية التي تواجه نجاح واستدامة مفاصل الورك الصناعية على المدى الطويل، حيث يشكل العامل الحاسم في تحديد العمر التشغيلي للغرسة ومعدلات النجاح السريري. تتباين المواد الحيوية المستخدمة في تصنيع هذه المفاصل – بما في ذلك السيراميك المتقدم (الألومينا، الزركونيا) والبوليمرات الحيوية (UHMWPE, PEEK) – بشكل جوهري في خصائصها الميكانيكية، الترايبولوجية، والبيولوجية، مما يحول عملية الاختيار الأمثل للمادة إلى معضلة هندسية–سريرية متعددة الأبعاد [18].

بما أن استبدال مفصل الورك الكلي ((Total hip arthroplasty (THA) هو إجراء جراحي يتضمن استبدال مفصل الورك التالف بمفصل صناعي. فعلى الرغم من النجاح السريري الملحوظ لغرسة مفصل الورك، إلا أن اهتراء الأسطح المفصلية لا يزال أحد أهم العوامل المؤثرة على الأداء. تشمل تركيبات المواد الشائعة المستخدمة في تصميمات مفصل الورك: المعدن على البوليمر (MoP)، والسيراميك على البوليمر (CoP)، والمعدن على المعدن (MoM)، والسيراميك على السيراميك (CoC). مع ذلك، عند النظر إلى تصميم مفصل الورك الصناعي، إلى جانب المواد المستخدمة، توجد عدة عوامل تؤثر على مقاومتها للاهتراء. في هذا السياق، حيث تُعد سلامة المريض وفعاليته من أهم الأولويات، من الضروري تقييم والتنبؤ بمعدل اهتراء مفصل الورك الصناعي قبل استخدامه في جراحة استبدال مفصل الورك الكلي. هذه إحدى المسائل التي يجب مراعاتها في مرحلة التقييم ما قبل السريري للمنتج، والتي تتطلب إجراء اختبارات المحاكاة. مع ذلك، من الضروري أن تحاكي الحركات والأحمال المُطبقة آليات الاهتراء التي تُلاحظ فسيولوجياً لدى المريض [21]. فمع التطورات التكنولوجية المتسارعة، باتت الحواسيب قادرةً على التعلم والتطور، مُحاكيةً الوظائف الإدراكية البشرية. وتوجد تطبيقات للذكاء الاصطناعي حالياً في مختلف التخصصات الطبية، بعضها قيد الاستخدام السريري [17]. تشير الدراسات الحديثة إلى أن استخدام الذكاء الاصطناعي في مجال جراحة استبدال المفاصل يُمكن أن يُحسّن رعاية المرضى من خلال تحسين التشخيص والفحص والتخطيط والمتابعة والتنبؤ [10].

على الرغم من التطور الملحوظ في تقنيات المحاكاة العددية المتقدمة (مثل محاكاة العناصر المنتهية FEA ومحاكاة الديناميكا الجزيئية)، فإن القصور المنهجي الأبرز يتمثل في غياب مؤشر كمي موحد قادر على تقديم تقييم متكامل وشامل لأداء الاهتراء. تفتقر المنهجيات الحالية إلى أداة تحليلية تجمع بين الدقة الكمية للنتائج الرقمية وسهولة التفسير السريري، مما يحد من فعالية عملية اتخاذ القرار المتعلقة باختيار المواد [12].

لذا، تسعى هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة المعرفية والعملية من خلال تطوير وتطبيق مؤشر كمي متعدد المعايير ذكي (Smart Multi–Criteria Quantitative Index) يعتمد على إطار منهجي متكامل يجمع بين:

١. المحاكاة العددية المتقدمة.
٢. التحليل الإحصائي متعدد المستويات.
٣. تقنيات الذكاء الاصطناعي التفسيري.

- الدراسات المرجعية:

قام (Trommer. R. M et all, 2017) وآخرون [21] بدراسة أهمية التقييم ما قبل السريري للاهتراء في تصميمات غرسات مفصل الورك باستخدام أجهزة المحاكاة. حيث تظهر هذه الدراسة أهمية استخدام محاكيات متقدمة لتقييم اهتراء مفصل الورك الصناعي بحيث تكون قادرة على محاكاة الحركة والتحميل الذي يتعرض له المفصل في الجسم، مما يساعد في فهم آليات الاهتراء وتحديد المواد الأكثر مقاومة له. وأظهرت النتائج أن تصميمات معينة لمفصل الورك الصناعي تبدي مقاومة أفضل للاهتراء عندما تم اختبارها على المحاكيات الميكانيكية، وهذا يدل على أن التقييم ما قبل السريري باستخدام هذه التقنية من الممكن أن يقلل من فشل المفاصل الصناعية بعد غرسها. لذلك من الضروري دمج استخدام محاكيات الاهتراء الميكانيكية في مراحل تصميم وتطوير مفصل الورك الصناعي. كما أوصت هذه الدراسة بإجراء المزيد من الأبحاث لتطوير نماذج محاكاة أكثر دقة وتحاكي الظروف الفيزيولوجية المعقدة لطبيعة جسم الإنسان، بهدف تحسين عمر وسلامة المفاصل الصناعية. كما ركّزت هذه المقالة على الخصائص الرئيسية المتعلقة بمحاكاة اهتراء غرسات مفصل الورك باستخدام المحاكيات الميكانيكية، مُقدمةً معلومات للجراحين والباحثين والهيئات التنظيمية، وغيرهم، حول أهمية التقييم ما قبل السريري للاهتراء.

قام (Merola. M et all, 2019) [13] بدراسة المواد المستخدمة في مفصل الورك الصناعي والبحث في اعتبارات الاهتراء والتحميل. تم في هذه الدراسة تحليل الخصائص المحددة المطلوبة للمواد الحيوية المستخدمة في استبدال مفصل الورك من حيث كونها متوافقة حيوياً، مقاومة للإجهاد الحاد (resisting heavy stress)، مقاومة قوى الاحتكاك المنخفضة للانزلاق، ومعدل الاهتراء المنخفض. وتم اقتراح بعض التعليقات على مفصل الورك الصناعي المتواجد الفعلي والمطوّر، وتحليل الدراسات العلمية وجمع المعلومات عن السلوك المادي واستجابة جسم الإنسان له. كما أكدت هذه الدراسة على استخدام المواد المتوافقة حيوياً في تصميم الأطراف الصناعية والتي تكون قوية بما يكفي لتحمل أنماط الحياة الأكثر نشاطاً للعديد من المرضى، مع إنتاج الحد الأدنى من بقايا الاهتراء (wear debris)، نظراً لأن الموضوع الرئيسي الذي يؤثر على متانة الطرف الصناعي على المدى الطويل هو الاهتراء وانتشار جزيئات الاهتراء، ويتم حالياً إجراء أبحاث واسعة النطاق لتحسين هذه المواد الحيوية لإعطاء فترة خدمة أطول للأطراف الصناعية، لذلك فإن تحليل مكونات الاهتراء ضروري للتقدم في المستقبل.

قام (Purnomo. G et all, 2021) [17] بدراسة الذكاء الاصطناعي في جراحة استبدال المفاصل. حيث استعرضت هذه الدراسة الاستخدامات المحتملة للذكاء الاصطناعي الذي أحدث ثورة في جراحة استبدال المفاصل مثل مفصل الورك والركبة والكتف، مما يؤدي إلى تحسين نتائج المرضى وتقليل المضاعفات. على الرغم من الفوائد الكبيرة لا تزال هناك تحديات وقيود تتعلق بضمان وسلامة هذه التقنيات، لذلك فإن التطورات مستمرة بهدف توفير فهم أفضل للتكنولوجيا الحالية والتوجهات المستقبلية لهذا المجال مما يوفر رعاية أكثر تخصيصاً وكفاءة للمرضى.

قام (Subramaniam. S et all, 2022) [18] بدراسة استخدام أساليب العناصر المنتهية (FEM (finite element methods)) في تحليل ميكانيك التلامس لتقييم اهتراء المواد الحيوية الصلبة في مفاصل الورك الصناعية. تُستخدم أساليب محاكاة الورك (Hip simulator)، تحليل الدبوس على القرص (pin–on–disc (POD))، وتحليل العناصر المنتهية (finite element analysis (FEA)) على نطاق واسع لتقييم

اهتراء الغرسات في المختبر. كما تم التركيز على أهمية نموذج المحاكاة في توقع العمر الافتراضي للمفاصل الصناعية، مما يسهم في تحسين تصميم المواد وتقليل معدلات الاهتراء. وتم التأكيد على ضرورة البحث المستمر في هذا المجال لضمان سلامة وفعالية المفاصل الصناعية وزيادة راحة المرضى.

قام (Dreyer. M.J et all, 2024) وآخرون [2] بدراسة التقييم التجريبي والحسابي لاهتراء وزحف مفاصل الركبة تحت تأثير شروط حيوية وشروط حدية وفقاً لمعيار ISO. يُعدّ اختبار اهتراء مفصل الركبة التجريبية وفقاً لمعيار ISO 14243 إجراءً قياسياً، إلا أنه ينطوي بطبيعته على قيود في التقييمات ما قبل السريرية نظراً لفترات الاختبار الطويلة والبنية التحتية المكلفة. ومن أجل تجاوز هذه القيود، تم تطوير خوارزمية تعتمد على طريقة العناصر المنتهية (FE) والتحقق من صحتها تجريبياً، حيث تضمنت نموذجاً جديداً للاهتراء والزحف يعتمد على القص العرضي (a novel cross–shear) وضغط التلامس، وتم تطبيقها لفهم حساسية نتائج الاهتراء للشروط الحدية المُطبقة.

قام (Mujib Wahyudi, 2024) وآخرون [22] بدراسة تحليل الاهتراء في مفصل الورك الصناعي المصنوع من البولي إيثيلين فائق الوزن الجزيئي باستخدام طريقة العناصر المنتهية. يُعد البولي إيثيلين ذو الوزن الجزيئي العالي (UHMWPE) من أكثر المواد شيوعاً في تصنيع مفاصل الورك الصناعية نظراً لخصائصه الميكانيكية الممتازة، وتوافقه الحيوي، ومقاومته للاهتراء. ورغم هذه المزايا، يؤدي اهتراء مكونات UHMWPE بمرور الوقت إلى تكوّن جزيئات الاهتراء، المسؤولة عن تحلل العظام وفشل الغرسة. وقد برزت طريقة العناصر المحدودة (FEM) كأداة فعّالة لمحاكاة آليات اهتراء UHMWPE في غرسات الورك، مما يوفر فهماً أعمق لتوزيع الإجهاد، والتنبؤ بالاهتراء، وتحسين تصميمات الغرسات. استعرضت هذه المقالة الوضع الحالي لتطبيقات FEM في تحليل اهتراء UHMWPE، مع التركيز على خصائص المادة، وآليات الاهتراء، ونماذج محاكاة FEM، والاتجاهات المستقبلية في هذا المجال البحثي.

أهمية البحث وأهدافه:

-أهمية البحث:

تستمد هذه الدراسة أهميتها من التحديات السريرية والهندسية المستمرة المرتبطة بعمر وأداء غرسات مفصل الورك الصناعية، والتي يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

١. **التحدي السريري المباشر:** يعد الفشل المبكر لمفاصل الورك بسبب الاهتراء مصدراً رئيسياً لعمليات إعادة الجراحة (Revision Surgery)، والتي تكون أكثر تعقيداً، وأعلى تكلفة، وتنطوي على مخاطر أعلى للمرضى. لذلك، فإن أي تقدم في التنبؤ الدقيق بالاهتراء يمثل تحسيناً مباشراً في الرعاية الصحية ونتائج المرضى.

٢. **التنوع والتعقيد في خيارات المواد:** يواجه الجراحون والمصممون اليوم مجموعة واسعة من تركيبات المواد (مثل السيراميك/البوليمر، المعدن/البوليمر، السيراميك/السيراميك)، ولكل منها ميزات وعيوب. تفتقر عملية الاختيار حالياً إلى معايير كمية مبسطة تقارن بين هذه الخيارات تحت ظروف تحميل واقعية.

٣. **فجوة بين المحاكاة الرقمية واتخاذ القرار الهندسي والسريري:** على الرغم من قدرة محاكاة العناصر المنتهية (FEA) على تقديم تحليلات دقيقة، إلا أن نتائجها غالباً متداخلة وتتطلب خبرة عالية للتفسير. هناك حاجة ملحّة لـ "تأطير" هذه الكميات الكبيرة من البيانات الرقمية إلى مؤشرات أو معاملات سهلة الفهم تساعد في اتخاذ القرار.

- هدف البحث:

سعى هذا البحث إلى تحقيق الأهداف المحددة التالية:

١. **الهدف الرئيس:** تطوير معامل رياضي كمي متعدد المتغيرات (Hip Wear Performance Index – HWPI)، للتنبؤ بأداء الاهتراء في مفاصل الورك الصناعية، يعتمد على تكامل نتائج المحاكاة الرقمية المتقدمة مع اختبارات الفروق الإحصائية لدراسة التباينات ومستويات الدلالة.

٢. الأهداف الفرعية:

- نمذجة ومحاكاة أداء تركيبتين شائعتين من المواد الحيوية (ألومينا–UHMWPE، زركونيا–UHMWPE) تحت ظروف تحميل ديناميكية تحاكي النشاط البشري الطبيعي باستخدام طريقة العناصر المنتهية.
- استخراج وتحليل العلاقات الإحصائية بين مجموعة من المؤشرات الميكانيكية الرئيسية المستخلصة من المحاكاة (مثل التشوه الكلي، الحجم، ضغط التلامس، مسافة الانزلاق، عمق الاختراق، الفجوة) وبين مقاييس الاهتراء الفعلية (الحجم والعُمق).
- تحديد الأوزان النسبية الموضوعية لأهمية كل مؤشر ميكانيكي في التأثير على معدل الاهتراء الكلي، باستخدام التحليل الإحصائي للبيانات المحاكاة.
- تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي التفسيري (SHAP) لفهم الآليات السببية لتفوق مواد معينة وتحديد العوامل الميكانيكية الحرجة.

-منهجية البحث:

اعتمدت منهجية البحث على الأسس التالية:

١. إجراء تحليل رقمي باستخدام برنامج Ansys لتركيبتين من المواد هما: (Alumina–UHMWPE) و (Zirconia–UHMWPE) عن طريق تحديد المادة، الشكل الهندسي، الشبكة، الشروط الحدية، وإعدادات الحل تحت ظروف تحميل ديناميكية تحاكي النشاط البشري الطبيعي

٢. إجراء دراسة إحصائية بالاعتماد على برنامج STATA 17 (Version 17; StataCorp, College Station, TX, USA, 2021)، تقييم مقارنة وأداء الاهتراء بين تركيبتي المواد المدروسة وفقاً للمعايير الثمانية (للتشوه الكلي، الحجم، مسافة الانزلاق، الفجوة، الاختراق، والضغط، عمق الاهتراء وحجمه). وتطوير مؤشر تقييم اهتراء مفصل الورك Hip Corrosion Index (HCI)

٣. تطبيق منهجية SHAP (SHapley Additive exPlanations) – باستخدام برنامج Python 3.14 (Version 3.14; Python Software Foundation, Wilmington, DE, USA, 2026)، وهي تقنية تفسيرية متقدمة في مجال الذكاء الاصطناعي – لتحديد مساهمة كل متغير ميكانيكي في التنبؤ بمؤشر HCI على مستويين تحليليين مختلفين: المستوى العام (للمجموعة الكاملة للعينات) والمستوى المحلي (لكل عينة فردية).

طرائق البحث ومواده:

يمكن تصنيف المواد المستخدمة في غرسات مفصل الورك الصناعي إلى عدة فئات، منها:

١. تركيبات قاسية على قاسية (hard on hard): تشمل السيراميك على السيراميك (ceramic on ceramic) والمعادن على المعادن (metal on metal)، بالإضافة إلى السيراميك عند استخدامه مع المعدن (ceramic on metal).

٢. تركيبات قاسية على طرية: مثل السيراميك على البوليمر (ceramic on polymer) أو المعادن على البوليمر (metal on polymer) [4].

➢ **المواد المستخدمة في المحاكاة الرقمية:**

A. سبيكة Titanium–Aluminum–Vanadium Alloys (Ti–6Al–4V): تُعد من أكثر سبائك التيتانيوم استخداماً في المجالات الطبية والعسكرية والصناعية [15]. وتُعتبر هذه السبيكة الخيار الأمثل للغرسات الطبية، مثل المفاصل الصناعية، بفضل خصائصها المتميزة. تتميز سبيكة Ti–6Al–4V بكثافتها المنخفضة (حوالي 4.43 g/cm³) مما يمنحها ميزة الوزن الخفيف مقارنة بالمعادن الأخرى مثل الفولاذ، والمتانة العالية والمقاومة الجيدة للضغط وسرعة الكسر، حيث تصل متانتها إلى حوالي 900 MPa، ومقاومتها العالية للتآكل، مما يجعلها مثالية للاستخدام في البيئات الحيوية (biological environments) حيث تتعرض لمؤثرات كيميائية، كما تتمتع هذه السبيكة بقدرة على الاحتفاظ بأدائها العالي عند درجات الحرارة المرتفعة (حتى حوالي ٦٠٠°C)، كما تعدّ من المواد المتوافقة حيوياً، مما يعني أنها لا تسبب ردود فعل سلبية عند استخدامها داخل الجسم. كل هذه العوامل تساهم في جعلها خياراً أساسياً للمفاصل الصناعية، كما تتمتع هذه السبيكة بقدرة على تعزيز الاندماج العظمي مع الأنسجة البشرية، مما يساعد في تحقيق استقرار المفصل الصناعي [14, 15].

B. أوكسيد الزركونيوم (ZrO_2) (المعروف أيضاً بالزركونيا): يُعد خياراً متميزاً في تصنيع المفاصل الصناعية، حيث يتميّز بمجموعة من الخصائص الميكانيكية العالية والتوافق الحيوي الجيد [9]. يعود الاستخدام المتزايد لهذه المادة إلى قدرتها على تحسين الأداء العام للمفاصل وكذلك سلامة المرضى. ومع ذلك، من الضروري مواصلة الأبحاث للتغلب على التحديات المرتبطة بتطبيقاتها السريرية، وذلك لتعظيم الاستفادة من الزركونيا في المجال الطبي [5, 6].

C. أوكسيد الألمنيوم (AL2O3) (الألومينا): هو عبارة عن مادة سيراميكية متوافقة حيوياً تتميز بخصائص ميكانيكية وفيزيائية جيدة كما تعتبر مقاومة للتآكل والاهتراء مما يعزز من فرص استخدامها في المفاصل الصناعية حيث تعمل على إطالة مدة خدمة هذه الغرسات [7, 8].

D. البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي (UHMWPE): يعد مادة ذات أهمية بالغة في التطبيقات الطبية الحيوية وذلك بفضل مقاومته العالية للاهتراء، ومرونته، وتوافقه الحيوي الجيد. يستخدم بشكل واسع في صناعة المفاصل الصناعية، نظراً لتميزه بالمتانة والخفة ومقاومة الاهتراء. على الرغم من التحديات المتعلقة بظاهرة الاهتراء والاستجابة الحيوية، إلا أن التطورات التكنولوجية والبحوث المستمرة تسعى إلى تعزيز كفاءة أداء UHMWPE في المجال الطبي [10]. يوضح الجدول (١) خصائص المواد المختلفة التي تم أخذها في الاعتبار للمحاكاة.

جدول ١: الخصائص الميكانيكية للمواد المستخدمة في تحضير غرسة مفصل الورك الصناعي

الخصائص	UHMWPE	Ti-6Al-4V	ZrO_2	AL_2O_3
الكثافة (kg/m^3)	936	4500	6040	3980
نسبة بواسون	0.46	0.32	0.31	0.23
معامل يونغ (GPa)	0.5-0.8	110	210	370
إجهاد الخضوع (MPa)	17	900	230	15.4
مقاومة الشد القصوى (MPa)	39-48	900	551	240

- **نسب المواد إلى مكونات المفصل الصناعي:**

يتكون المفصل الصناعي للورك من أربعة أجزاء رئيسية:

١. **مكون كوب الحُق:** Ti-6Al-4V.

٢. **مكون الإدخال:** UHMWPE.

٣. **مكون رأس الفخذ:** تم اختيار نوعين من المواد للمقارنة: الألومينا والزركونيا (AL_2O_3, ZrO_2).

٤. **مكون الغرسة:** Ti-6Al-4V.

- **الدراسة الديناميكية لسلوك مفصل الورك:**

لتحقيق الهدف الرئيسي المتمثل في تطوير معامل للتنبؤ بالاهتراء، تم اعتماد نموذج عددي واقعي لمفصل ورك كلي. اعتمد النموذج على أبعاد قياسية تجارية: كوب حُقي بقطر داخلي ٢٨ ملم يحتوي على بطانة من مادة UHMWPE بسمك ٦ ملم، مع رأس فخذ من السيراميك (ألومينا أو زركونيا) بقطر مطابق (٢٨ ملم).

تشمل البارامترات الهندسية الحرجة زاوية ميل الكوب الحقي التي تصل إلى ٥٥° ميلان وتدوير أمامي (تقدم) قدره ٢٠° لتمثيل الوضع الجراحي النموذجي، ولتقليل التعقيد الحسابي مع الحفاظ على الدقة، ركزت المحاكاة على زوج التلامس الرئيسي (رأس الفخذ/بطانة الكوب)، حيث يحدث الاهتراء المهيمن على مادة UHMWPE الأقل قساوة [19].

تم استيراد معاملات الاهتراء الأولية لكل تركيبة من الدراسات المرجعية [19] كمدخل أساسي لنموذج الاهتراء، كم تم إعداد نموذج العناصر المنتهية باستخدام عناصر SOLID187 للهيكل و CONTA174/TARGE170 لمنطقة التلامس، مع شبكة مدروسة لضمان تقارب النتائج.

تم تفعيل نموذج اهتراء آرتشارد (Archard) المعمم في برنامج ANSYS لتوليد بيانات الاهتراء اللازمة لتطوير المعامل التنبؤي، طُبق تحميل ديناميكي يحاكي دورة مشي كاملة واحدة وفق معيار ISO 14242-1، مع استخدام تقنيات مثل التكيف غير الخطي للشبكة لمعالجة التشوهات الناتجة عن الاهتراء خلال المحاكاة.

تم تطبيق الشكل العام لقانون Archard في تحليل العناصر المنتهية في برنامج ® Ansys باستخدام أمر APDL TB، وإدراج وحدة الاهتراء WEAR MODULE في بيئة التلامس، وضبطه بشكل صحيح. بتفعيل الخيار ARCH، تم تحقيق ذلك باستخدام المعادلة التالية:

$$\dot{h}(Q,t) = \frac{k}{H}\, p^m(Q,T) v_s{}^n(Q,t) \qquad (1)$$

حيث $\dot{h}$: هو معدل عمق الاهتراء (معدل الاهتراء الخطي).

K: هو معامل الاهتراء اللابعدي (the dimensionless wear coefficient).

H: هو قساوة (صلابة) المادة المعرّضة للاهتراء.

P: هو ضغط التلامس.

m: هو المعامل الأسي لضغط التلامس.

vs: هي سرعة الانزلاق.

وn: هو المعامل الأسي لسرعة الانزلاق.

يتم تنفيذ نموذج Archard بإدراج منفذ الأوامر (Command Snippets)، وتحديدًا الأمر TB، والأمر WEAR وTBOPT= ARCD.

تم افتراض أن (m = 1) و(n = 1): أي أن سلوك المادة المهترئة هنا خطيٌّ بوضوح، أي أن زيادة الحمل أو المسافة تؤدي مباشرةً إلى زيادة متناسبة في الاهتراء.

مهدت هذه الإعدادات الدقيقة الطريق للحصول على بيانات موثوقة عن عمق وحجم الاهتراء تحت ظروف تحميل واقعية، والتي شكلت الأساس التجريبي الرقمي اللاحق لاشتقاق وتطوير معامل الاهتراء التنبؤي.

- **الدراسة الإحصائية وتطوير مؤشر تقييم الاهتراء (HCI)**

لتحويل النتائج العددية من المحاكاة إلى أداة قابلة للتطبيق في اتخاذ القرار، تم اتباع منهجية إحصائية منهجية من ثلاث مراحل بالاعتماد على برنامج STATA 17

١. **التحليل الوصفي:** هدفت هذه المرحلة إلى تلخيص وتوصيف أداء كل تركيبة ألومينا وتركيبة زركونيا عبر المقاييس الثمانية جميعها. لكل مقياس، تم حساب:

- المتوسط الحسابي: كمؤشر للنزعة المركزية والأداء النموذجي للتركيبة.
- الانحراف المعياري: كمقياس لتشتت البيانات ودرجة تجانس أداء التركيبة.

مكّن هذا التحليل من إجراء مقارنة أولية مباشرة بين التركيبتين وتحديد اتجاهات الأداء العامة.

٢. **اختبار الفروق الإحصائية:** لتحديد ما إذا كانت الاختلافات الملحوظة بين متوسطي أداء التركيبتين حقيقية وذات معنى إحصائي، تم إجراء تحليل استدلالي:

- أولاً، تم استخدام اختبار Kruskal–Wallis (المناسب للمقارنة بين مجموعتين أو أكثر) كاختبار شامل لتقييم وجود فروق ذات دلالة إحصائية في توزيع قيم المقاييس بين التركيبتين.
- نظراً لأن الدراسة تقارن بين تركيبتين فقط، فإن نتيجة اختبار Kruskal–Wallis ذات الدلالة ($p < 0.05$) تؤدي تلقائياً إلى إجراء مقارنة زوجية. تم استخدام اختبار Wilcoxon للمقارنة المباشرة بين متوسطي رتبتي كل مقياس في التركيبتين.

- للتحكم في زيادة احتمالية الخطأ من النوع الأول (اكتشاف فروق وهمية) عند إجراء مقارنات متعددة عبر المقاييس، تم تطبيق تصحيح Bonferroni على مستوى الدلالة الإحصائية.

٣. **تطوير مؤشر تقييم الاهتراء للورك :(HCI)** لدمج أداء التركيبة عبر جميع المقاييس في درجة واحدة سهلة التفسير، تم بناء مؤشر HCI على مرحلتين:

- المرحلة الأولى: الترجيح: بناءً على مراجعة الأدبيات والأهمية السريرية، تم وضع نظام الترجيح اعتماداً على معايير ISO لتقييم الغرسات [16]، ودراسات سريرية تربط هذه العوامل بخطر تحلل العظام [1,11, 20]. حيث تم تعيين بناء على هذه الدراسات أوزان نسبية تعكس الأهمية النسبية لكل مقياس في تقييم العمر الافتراضي للغرسة:
  - عمق الاهتراء :(30%) للمرتبط المباشر بسلامة المادة وتآكلها.
  - حجم الاهتراء :(30%) للدال على كمية الحطام الناتج وفقدان المادة.
  - ضغط التلامس :(20%) لعكسه توزيع الإجهاد ومقدار الحمل.
  - المقاييس الخمسة المتبقية (٢٠% مجتمعة) :التشوه الكلي، الحجم، مسافة الانزلاق، الفجوة، والاختراق.
- المرحلة الثانية: الحساب والتطبيع (Labeling and calculation): لضمان إمكانية تجميع المقاييس ذات الوحدات المختلفة، تم أولاً تسوية (تطبيع) القيم المحسوبة لكل مقياس لكل تركيبة لتصبح في نطاق قابل للمقارنة. ثم تم حساب مؤشر HCI لكل تركيبة باستخدام العلاقة:

$$HCI = \sum_{i=1}^{n} (w_i \times S_i) \qquad (2)$$

حيث wi هو وزن المقياس i، و Si هي القيمة الطبيعية لذلك المقياس. تم تصميم المؤشر بحيث تدل القيمة الأقل لـ HCI على أداء أفضل وأقل اهتراءاً.

- **تحليل الذكاء الاصطناعي التفسيري باستخدامSHAP**

تم تطبيق منهجية – SHAP (SHapley Additive exPlanations) وهي تقنية تفسيرية متقدمة في مجال الذكاء الاصطناعي – لتحديد مساهمة كل متغير ميكانيكي في التنبؤ بمؤشر HCI على مستويين تحليليين مختلفين: المستوى العام (للمجموعة الكاملة للعينات) والمستوى المحلي (لكل عينة فردية). تم تنفيذ هذا التحليل باستخدام بيئة برمجة Python ومكتبة SHAP المتخصصة، حيث تم إنشاء مخططين رئيسيين:

١. **مخططات تلخيص (SHAP Summary Plots) SHAP:** لتوضيح الأهمية النسبية للمتغيرات واتجاه تأثيرها (إيجابي أو سلبي) على قيم HCI المتوقعة.

٢. **مخططات اعتماد :(SHAP Dependence Plots) SHAP:** لتصور العلاقات غير الخطية بين كل متغير ميكانيكي وقيم SHAP الخاصة به، مما يسمح بفهم التفاعلات المعقدة بين المتغيرات وآليات تأثيرها على أداء الاهتراء.

مكّنت هذه التحليلات من تقديم تفسيرات قابلة للفهم (interpretable explanations) لنموذج التنبؤ، مما ساهم في تحسين موثوقية النتائج ودعم اتخاذ القرارات المتعلقة بتقييم أداء مواد مفصل الورك.

النتائج والمناقشة:

١. نتائج التحليل الرقمي:

تم في هذه المرحلة استخدام وحدة التآكل Corrosion Module الخاصة ببرنامج Ansys، وعُرضت نتائج المحاكاة الرقمية المستحصلة من البرنامج ضمن الجدول (2). تم الحصول على تقرير أداء متكامل للتركيبات المستخدمة والذي يتضمن مجموعة من الشروط والتفاصيل المهمة، تشمل شروط التحميل والشبكة وخصائص المواد والقيم الناتجة عنها ولا سيما التشوه الكلي، ضغط التلامس الأعظمي، مسافة الانزلاق، الفراغ (الفجوة)، الاختراق، عمق الاهتراء وحجم الاهتراء على السطح الداخلي للحُقّ الذي تم الحصول عليه من النموذج.

عند مقارنة حجم الاهتراء بين التركيبات المدروسة، يتضح انخفاض من قيمة التركيبة Alumina– UHMWPE بشكل ملحوظ مقارنة مع تركيبة Zirconia– UHMWPE.

حيث أظهرت النتائج أن التركيبة Alumina–UHMWPE حققت أدنى قيم للاهتراء، حيث بلغ حجم الاهتراء $0.18481 mm^3$ وعمق الاهتراء 0.693×10^{-3} mm .

على الرغم من أن كلا التركيبتين تتمتعان بخصائص ميكانيكية جيدة، أظهرت النتائج تركيبة Alumina– UHMWPE تتميز بقدرتها العالية على التحمل تحت التحميلات العالية ولظروف الاستخدام الطويل. مقاومة الألومينا للاهتراء وقوتها العالية وقساوتها تجعل منها خياراً مناسباً كطرف دائري في المفاصل الصناعية، حيث تحتاج المادة إلى تحمل الإجهادات العالية. من جهة ثانية، المقاومة العالية للاحتكاك التي تتميز بها مادة الألومينا تجعلها خياراً مثالياً لتقليل الاهتراء في المفاصل، مما يؤمل أن يسهم في تحسين مدة خدمة المفصل الصناعي وسلامته.

جدول 2 : مقارنة نتائج تحليل FEA لمجموعة تركيبات المواد المستخدمة في البحث

النتائج	Alumina–UHMWPE	Zirconia– UHMWPE
التشوه الكلي [mm]	0.38759	0.38781
الحجم [mm^3]	7.0783	7.0784
الضغط [MPa]	7.6656	7.3593
مسافة الانزلاق [mm]	12.419	12.42
الفجوة [mm]	−0.14763	−0.14831
الاختراق [mm]	1.87×10^{-02}	1.80×10^{-02}
عمق الاهتراء الكلي [mm]	0.693×10^{-03}	3.80×10^{-03}
حجم الاهتراء [mm^3]	0.18481	1.0291

٢. نتائج تطبيق مؤشر تقييم الاهتراء (HCI) وتحليل الذكاء الاصطناعي التفسيري

بعد تطبيق الخوارزمية الإحصائية وخطوات الحساب المذكورة أعلاه على نتائج محاكاة التركيبتين، تم الحصول على النتائج التالية:

❖ **نتائج الاختبارات الإحصائية :**

كشفت الإحصاءات الوصفية عن الرؤى الرئيسية التالية حول أداء التركيبتين: (Alumina– UHMWPE)، و(Zirconia– UHMWPE) عبر ثمانية معايير مهمة، وهي التشوه الكلي، الحجم، مسافة الانزلاق، الفجوة، الاختراق، الضغط، عمق الاهتراء وحجم الاهتراء. أظهرت التركيبتان قيماً متطابقة تقريباً لهذه المقاييس، مما يشير إلى سلوك ميكانيكي مماثل في ظل الظروف المختبرة. أظهر تحليل Tukey's HSD وجود اختلافات دالّة إحصائياً ($p < 0.05$) بين التركيبتين.

أما بالنسبة لعمق الاهتراء والحجم، فقد أظهرت تركيبة (Alumina– UHMWPE) أداءً أفضل من حيث عمق الاهتراء ($0.693 \text{ x}10^{-03} \text{mm}$) وحجم الاهتراء ($0.18481 \text{ mm}^3$)، مما يدل على مقاومة عالية للاهتراء. في المقابل، كان أداء التركيبة Zirconia– UHMWPE ضعيفاً من حيث عمق الاهتراء والحجم، حيث بلغت قيمتاه $3.80\text{x}10^{-03}$ mm و 1.0291 mm^3، على التوالي.

بمقارنة نتيجة مؤشر اهتراء مفصل الورك (HCl) باستخدام نظام الترجيح المقترح، تم حساب درجات مؤشر اهتراء مفصل الورك للتركيبات المدروسة على النحو التالي:

١. تركيبة (Alumina– UHMWPE): النتيجة الإجمالية لمؤشر اهتراء مفصل الورك (HCl) = ٢٧,٦٠

حققت تركيبة Alumina– UHMWPE أداءً ممتازاً في عمق الاهتراء وحجم الاهتراء وهما المقياسان الأكثر ترجيحاً ، مما أعطاها أدنى نتيجة إجمالية. كما كان أداؤها في الضغط والمقاييس الأخرى منافساً، مما يجعلها المادة الأنسب لاستبدال مفصل الورك.

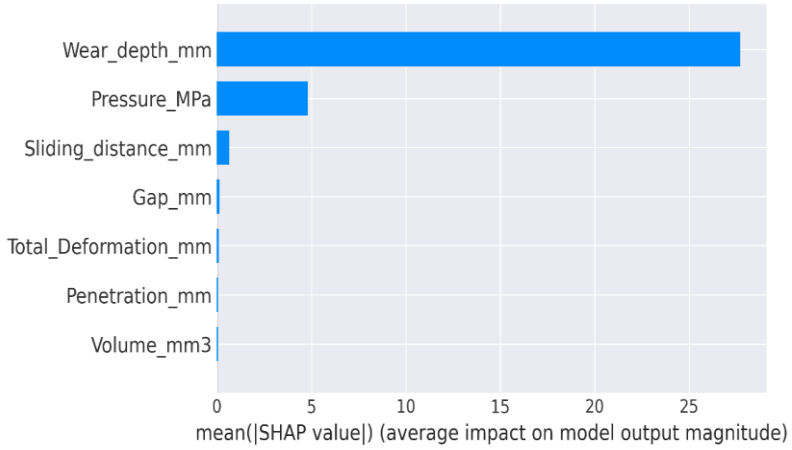
٢. التركيبة Zirconia– UHMWPE: النتيجة الإجمالية لمؤشر اهتراء مفصل الورك (HCl) = ٢٨,١٤

على الرغم من أن تركيبة Zirconia–UHMWPE أظهرت أداءً جيداً في العديد من المقاييس، إلا أن عمق الاهتراء وحجم الاهتراء كانا أعلى بالمقارنة مع Alumina–UHMWPE. أعلى قيمة ضغط أدت إلى درجة إجمالية أعلى، لكن ذلك لا يعكس الكفاءة الفعلية في مقاومة الاهتراء.

❖ **تحليل الذكاء الاصطناعي التفسيري باستخدام SHAP :**

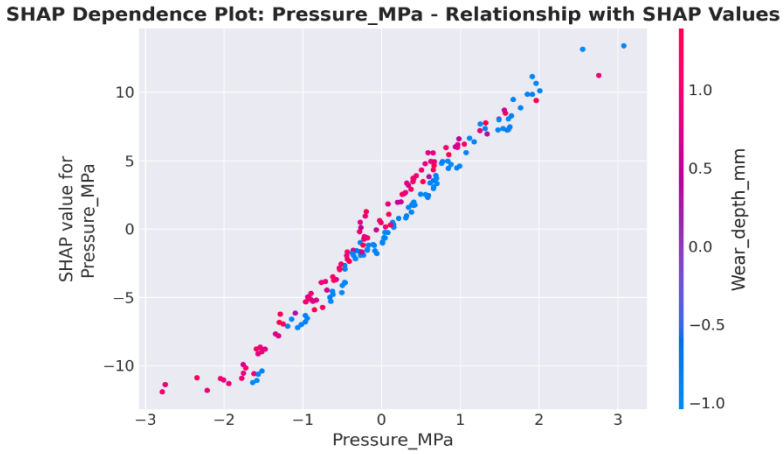
تم تطبيق تقنية SHAP (SHapley Additive exPlanations) وهي أداة تفسيرية متقدمة في مجال الذكاء الاصطناعي، وقد كشف تحليل SHAP عن النتائج التالية:

- **تحديد العوامل الأكثر تأثيراً** :أظهر تحليل SHAP أن المتغيرات الأكثر تأثيراً في تحديد قيمة HClكانت على الترتيب :**عمق الاهتراء(Wear_depth_mm)** ، يليه **حجم الاهتراء (Wear_Volume_mm^3)**، ثم **ضغط التلامس (Pressure_MPa)**. قد ساهمت هذه المتغيرات الثلاثة بأكثر من ٨٥% من القوة التفسيرية للنموذج التنبؤي، كما هو مبين في الشكل (١).



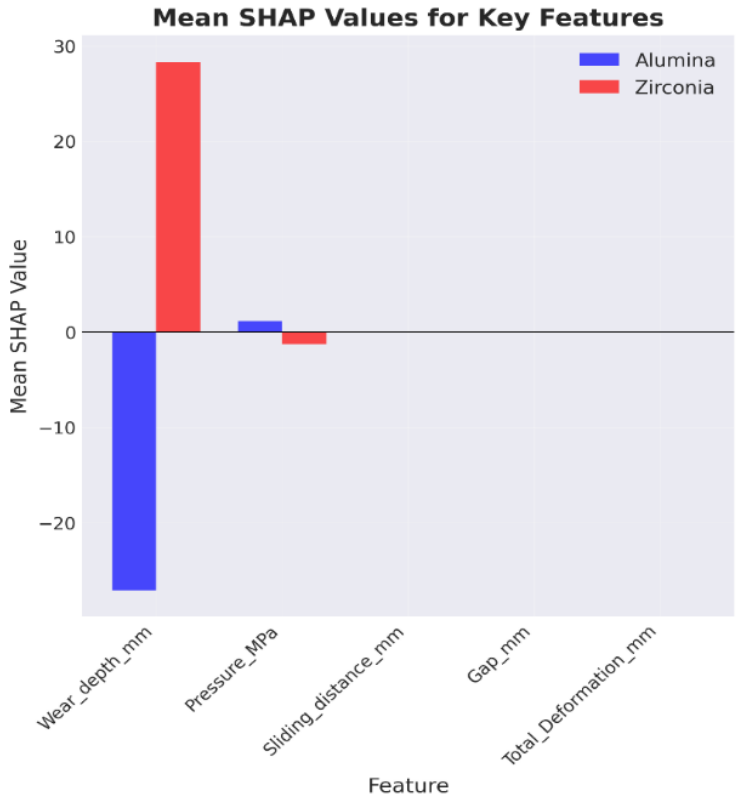
شكل ١: ملخص نسب مساهمة المعاملات الميكانيكية في التنبؤ عن الاهتراء

• **العلاقات غير الخطية** :كشفت مخططات اعتماد SHAP (SHAP Dependence Plots) عن وجود علاقات غير خطية معقدة بين المتغيرات. على سبيل المثال، أظهرت علاقة **الضغط مع عمق الاهتراء** وجود عتبة حرجة(~7.5 MPa) ، حيث يؤدي تجاوزها إلى زيادة مضاعفة في معدل الاهتراء المتوقع، مما يفسر جزئياً الأداء المختلف للمادتين تحت نفس ظروف التحميل، كما هو مبين في الشكل (٢):



شكل 2: منحني الاعتماد بين أهم المتغيرات المساهمة في عملية الاهتراء. نلاحظ وجود علاقة غير خطية بعد قيمة ٧,٥ ميغا باسكال

• **مقارنة سلوك المواد** :عند تطبيق SHAP على تنبؤات كل مادة على حدة، تبين أن **مادة الألومينا** تتميز بقيم SHAP سلبية (مخفضة) للمتغيرات الحرجة مثل عمق الاهتراء، مما يعني أن خصائصها التركيبية تخفض توقع النموذج لقيمة HCI (أي تحسن الأداء). في المقابل، أظهرت **مادة الزركونيا** قيماً SHAP موجبة لنفس المتغيرات، مما ينبئ بأن خواصها تساهم في رفع قيمة HCI وانخفاض أداءها الديناميكي الشكل (3):

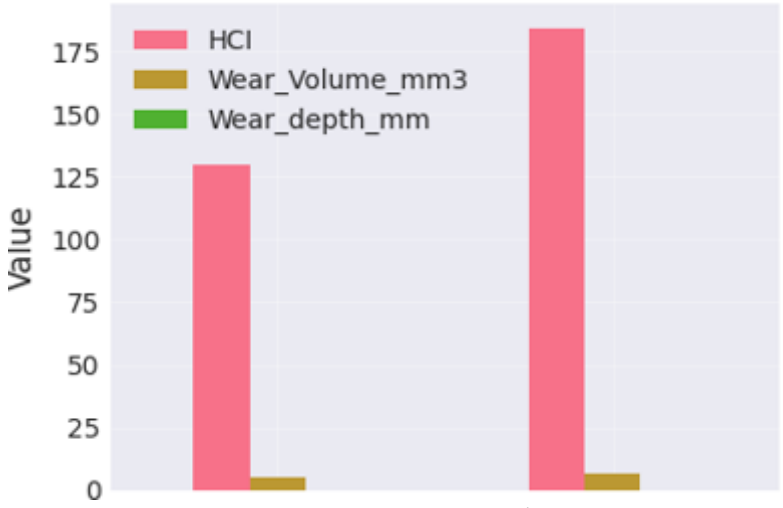


شكل 3: مقارنة منهجية لسلوك اهتراء المادتين المدروستين بالاعتماد على المميزات المدروسة

❖ **تصنيف المواد باستخدام مؤشر HCI**

عند حساب المؤشر المركب(HCI) ، جاءت النتائج لتؤكد الاستنتاجات الإحصائية وتحليل SHAP بشكل كمي واضح:

- **تركيبة الألومينا** :حققت **أدنى درجة على مؤشرHCI ، وهي ٢٧,٦٠** .يعكس هذا التفوق أداءها المتميز في المقاييس عالية الترجيح، حيث سجلت أقل عمق اهتراء (٦,٩٣×10^{-4} مم) وأقل حجم اهتراء (٠,١٨٤٨١ مم^3). تؤكد نتائج SHAP أن انخفاض قيم هذه المتغيرات هو المحرك الرئيسي لأدائها المتفوق.
- **تركيبة الزركونيا** :سجلت **درجة HCI أعلى، وهي ٢٨,١٤** .على الرغم من أدائها الجيد نسبياً، فإن قيم عمق الاهتراء (٣,٨٠×10^{-3} مم) وحجم الاهتراء (١,٠٢٩١ مم^3) الأعلى، إلى جانب اختلافات في توزيع الضغط، أدت إلى هذه الدرجة المرتفعة نسبياً، وهو ما أوضحته نتائج تحليلSHAP ، كما هو وارد في الشكل (٤):



شكل 4: مقارنة قيم تنبؤ مؤشر اهتراء مفصل الورك وأهم معاملات الاهتراء للتركيبتين المدروستين: على اليسار (تركيبة الألومينا)، وعلى اليمين (تركيبة الزركونيا). نلاحظ الاختلاف الواضح في قيم المعامل HCl مما يجعل تركيبة الزركونيا أكثر عرضة للاهتراء خلال ظروف تحميل مفصل الورك

بناءً على ماسبق يمكن تفسير النتائج وفق الآتي:

يوضح الفارق في درجات HCl (٢٧,٦٠ مقابل ٢٨,١٤)، رغم ضآلته العددية، حساسية المؤشر للفروق الدقيقة في الأداء. هذا الفارق، المدعوم بدلالة إحصائية ($p < 0.05$) **وتفسير سببي من تحليلSHAP** ، يؤكد أن تفوق تركيبة الألومينا ليس عشوائياً ويمكن تفسيره ميكانيكياً. يعزى هذا التفوق إلى الخصائص الفريدة للألومينا، مثل قساوتها العالية ومقاومتها العالية للاهتراء وانخفاض معامل احتكاكها عند التزاوج مع البولي إيثيلين، وهي خصائص تؤدي إلى خفض قيم متغيرات "عمق الاهتراء" و "حجم الاهتراء" ذات الأثر الأكبر حسب تحليل SHAP .

من جهة ثانية، يشير مؤشرHCl ، من خلال درجته المنخفضة والمؤيد بتحليل تفسيري قوي، إلى أن تركيبة الألومينا تمثل الخيار الأكثر ملاءمة لتحقيق عمر افتراضي أطول وأداء أكثر استقراراً لمفصل الورك الصناعي.

الاستنتاجات والتوصيات:

– الاستنتاجات:

بناءً على نتائج المحاكاة العددية، التحليل الإحصائي المتقدم، وتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي التفسيري (SHAP)، خلصت هذه الدراسة إلى الاستنتاجات الرئيسية التالية:

١. التفوق العلمي الواضح لتركيبة الألومينا–بولي إيثيلين.
٢. نجاح المؤشر الكمي المتطور (HCl) كأداة تشخيصية ذكية
٣. الثبات العلمي للنتائج عبر منهجيات التحليل الإحصائي التقليدي والذكاء الاصطناعي التفسيري.
٤. كشف علاقة غير خطية بين الضغط وعمق الاهتراء (~7.5 MPa)

- التوصيات:

انطلاقاً من الاستنتاجات العلمية، تقدم الدراسة التوصيات التالية:

١. تعميم نموذج HCI الذكي بتطبيقه على مجال أوسع من المواد.

٢. تعزيز قدرات الذكاء الاصطناعي التفسيري بإنشاء قاعدة بيانات شاملة لمواد المفاصل الصناعية.

٣. اختيار تركيبة الألومينا–بولي إيثيلين للمرضى الشباب وذوي النشاط البدني العالي.

٤. اقتراح إدراج مؤشر HCI في بروتوكولات تقييم المواد الطبية الحيوية.

المراجع

[1] AFFATATO, S.; BRANDO, D. 2013, *Introduction to wear phenomena of orthopedic implants. In Wear of Orthopedic Implants and Artificial Joints; Woodhead Publishing: Cambridge*, UK, pp. 3–26.

[2] DREYER, M. J.; NASAB, S. H. H.; FAVRE, P.; AMSTAD, F.; CROCKETT, R.; TAYLOR, W. R.; & WEISSE, B. 2024, *Experimental and computational evaluation of knee implant wear and creep under in vivo and ISO boundary conditions*. *BioMedical Engineering OnLine*, VOL. 23, N.1, pp 130.

[3] DONACHIE, M. J. 2000, *Titanium: a technical guide*. *ASM international*.

[4] DE SANTIS, R.; GLORIA, A.; & AMBROSIO, L. 2017, *Composite materials for hip joint prostheses. In Biomedical composites*, pp 237-259. Woodhead Publishing.

[5] GAMBLE, D.; JAISWAL, P. K.; LUTZ, I.; & JOHNSTON, K. D. 2017, *The use of ceramics in total hip arthroplasty*. *Orthop. Rheumatol*, 4, 555636.

[6] Giordano II, R. (2022). Ceramics overview. British Dental Journal, 232(9), 658-663.

[7] HAMADOUCHE, M.; & SEDEL, L. 2000, *Ceramics in orthopaedics*. *The Journal of Bone & Joint Surgery British*, Vol. 82, N.8, pp 1095-1099.

[8] HULBERT, S. F. 2013, *The use of alumina and zirconia in surgical implants*. *An Introduction to Bioceramics*, N.1.

[9] Hussien, Z. Y., Moften, A. Q., & Abdulrehman, M. A. (2025). Review of zirconia (ZrO_2) biomedical applications: Advanced manufacturing techniques and materials properties. Revue des Composites et des Materiaux Avances, 35(2), 345.

[10] Hasegawa, M.; Tone, S.; Naito, Y.; & Sudo, A. 2023, *Ultra-high-molecular-weight polyethylene in hip and knee arthroplasties. Materials*, VOL.16, N.6, pp 2140.

[11] KNAHR, K. Ed. 2011, *Tribology in Total Hip Arthroplasty; Springer*: Berlin/Heidelberg, Germany.

[12] KN, C.; BHAT N, S.; ZUBER, M.; & SHENOY B, S. 2022, *Evolution of different designs and wear studies in total hip prosthesis using finite element analysis: A review. Cogent Engineering*, VOL.9, N.1, 2027081.

[13] MEROLA, M.; & AFFATATO, S. 2019, *Materials for hip prostheses: a review of wear and loading considerations*. *Materials*, VOL. 12, N.3, pp 495.

[14] MANICONE, P. F.; IOMMETTI, P. R.; & RAFFAELLI, L. 2007, *An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications*. *Journal of dentistry*, VOL. 35, N.11, pp 819-826.

[15] MARIN, E.; & LANZUTTI, A. 2023, *Biomedical applications of titanium alloys: a comprehensive review*. *Materials*, VOL.17, N.1, pp 114.

[16] NITHYAPRAKASH, R.; SHANKAR, S.; & UDDIN, M. S. 2018, *Computational wear assessment of hard on hard hip implants subject to physically demanding tasks. Medical & biological engineering & computing*, VOL 56, pp 899-910

[17] PURNOMO, G.; Yeo, S. J.; & Liow, M. H. L. 2021, *Artificial intelligence in arthroplasty*. *Arthroplasty*, VOL. 3, N.1, pp 37.

[18] SUBRAMANIAM, S.; NITHYAPRAKASH, R.; NAVEENKUMAR, R.; ABBAS, G.; UDDIN, M. S.; PRAMANIK, A.; & PRAKASH, C. 2022, *Finite element methods in analyzing contact mechanics to estimate the wear of hard biomaterials in human hip prosthesis-A review*. *Jurnal Tribologi*, VOL. 33, pp 39-70.

[19] SHANKAR, S; & NITHYAPRAKASH, R. 2016, *Predicting the wear of soft-on-hard bearing couples for human hip prosthesis using finite element concepts. Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, VOL.16, N.03, 1650020.

[20] SMITH, A.; JONES, R. (2021). *Wear Behavior of UHMWPE and PEEK in Artificial Joint Applications*, Mater. Sci. Eng. C, 118, 124565.

[21] TROMMER, R. M.; & MARU, M. M. 2017, *Importance of preclinical evaluation of wear in hip implant designs using simulator machines. Revista Brasileira de Ortopedia (English Edition)*, VOL. 52, N.3, pp 251-259.

[22] WAHYUDI, M.; & NUR, A. Z. 2024, *Analysis of Wear in UHMWPE Artificial Hip Joint Using Finite Element Method: A Review*. *Sains Data Jurnal Studi Matematika dan Teknologi*, VOL. 2, N.2, pp 57-67.

ISO 690