

A Study of the Biotribology of the Artificial Hip Joint Using the Finite Element Method

Hiba Mohsen Ghadir * 

Dr. Ahmad Salamah**

Dr. Mohammad Ayham Darwich***

(Received 25 / 4 / 2025. Accepted 23 / 7 / 2025)

□ ABSTRACT □

This research aims to study the wear evaluation of artificial hip joint implants subjected to walking loading due to various activities. These activities place these implants at risk for failures such as osteolysis and aseptic loosening, which generate wear and associated debris. Therefore, wear evaluation under walking activities is critical for the design and development of new and improved implant components. Based on this, this paper presents the wear evaluation of two different pairs of hip implants. The first pair predicts the wear of a UHMWPE acetabular cup liner versus a zirconia femoral head, and the second pair predicts the wear of a PEEK liner versus a zirconia femoral head, using Finite element analysis (FEA) analysis of a three-dimensional (3D) model of the hip implant. The analysis results show that the Zirconia-UHMWPE combination has lower wear depth and lower wear volume compared to the Zirconia-PEEK combination.

Keywords: Biotribology, Wear, UHMWPE, PEEK.

Copyright  :Latakia University journal (Formerly Tishreen)-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Postgraduate student (Ph.D.), Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and electrical engineering, Lattakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: hiba.ghadir91@gmail.com

Associate Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia University (Formerly Tishreen), Latakia. Syria, Email: salamahahmad@gmail.com *Professor, Department of Industrial Automation Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria. Email: ayham.darwich@gmail.com

دراسة الترابيولوجيا الحيوية لمفصل الورك الصناعي باستخدام طريقة العناصر المنتهية

هبة محسن غدير * 

د. أحمد سلامة **

د. محمد أيهم درويش ***

(تاريخ الإيداع 25 / 4 / 2025. قُبل للنشر في 23 / 7 / 2025)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تقييم اهتراء مفصل الورك الصناعي الذي يتعرض لتحميل المشي بسبب الأنشطة المختلفة. حيث أن هذا المفصل بسبب هذه الأنشطة معرض بشكل محتمل للفشل مثل انحلال العظم (osteolysis) والارتقاء المعقم (aseptic loosening)، مما يؤدي إلى توليد الاهتراء والحطام المرتبط به. وبالتالي فإن تقييم الاهتراء تحت أنشطة المشي أمر بالغ الأهمية لتصميم وتطوير مفصل جديد محسن. بناءً على هذا، تقدم هذه الورقة تقييم اهتراء زوجين مختلفين من مفصل الورك الصناعي الأول يتنبأ باهتراء بطانة الكوب الحقي المصنوعة من UHMWPE مقابل رأس فخذ مصنوع من Zirconia والمفصل الثاني يتنبأ باهتراء بطانة مصنوعة من PEEK مقابل رأس فخذ مصنوع من Zirconia وذلك باستخدام تحليل العناصر المنتهية (Finite element analysis FEA) لنموذج ثلاثي الأبعاد (3D) لمفصل الورك. حيث أظهرت نتائج التحليل أن تركيبة Zirconia- UHMWPE أقل عمق اهتراء، وأقل حجم اهتراء بالمقارنة مع تركيبة Zirconia- PEEK.

الكلمات المفتاحية: الترابيولوجيا الحيوية، الاهتراء، البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي، البولي إيثر إيثر كيتون.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) -

اللاذقية - سورية - إيميل hiba.ghadir91@gmail.com

** أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية -

سورية - إيميل salamahamrad@gmail.com

*** أستاذ - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية - إيميل

ayham.darwich@gmail.com

مقدمة:

يُستخدم مصطلح علم الاحتكاك الحيوي (biotribology) عندما تكون الأسطح المتفاعلة (interacting surfaces) جزءاً من جسم الإنسان أو الحيوان مثل مفاصل الورك والركبة الكاملة. تم استخدامه لأول مرة من قبل Dowson في عام 1970 وتم تفسيره على أنه علم الترابيولوجيا في الأنظمة البيولوجية مثل الجلد، الشعر، العينين، المفاصل الزلالية، العمود الفقري وعلم الترابيولوجيا الفموي [1]. يعد مفصل الورك أهم المفاصل في جسم الإنسان، حيث هو نقطة الوصل بين رأس عظم الفخذ وحُق الحوض. يمكن أن يتعرض المحمل (سطح التمثفصل) في هذا المفصل للاحتكاك، الاهتراء وتلف السطح مما يؤثر على الأداء العام ويؤدي إلى الفشل في وقت معين بسبب التلامس المستمر الذي يعرض المستخدم للخطر. يعد تقييم مفصل الورك باستخدام الدراسة السريرية، الاختبار التجريبي ونهج الصيغة الرياضية أمراً صعباً لأن هناك بعض العقبات في كل نهج. تعد المحاكاة الحاسوبية (Computational simulation) نهجاً بديلاً فعالاً وذلك كونها ذات تكلفة مقبولة، سريعة نسبياً وأكثر سهولة من الأساليب الأخرى في فحص الظروف المعقدة المختلفة التي تتطلب موارد واسعة والعديد من البارامترات المختلفة [2]. على الرغم من أن جراحة استبدال مفصل الورك تعتبر واحدة من أكبر التطورات في جراحة العظام (orthopaedics) في العقود القليلة الماضية، إلا أن هذه العملية لم تتم دراستها بنجاح تام من منظور ميكانيكي، لذا فهي تتطلب المزيد من الدراسات [2]. يعد اهتراء أزواج المحامل مصدر قلق كبير في مفاصل الورك. وبالتالي لتقليل اهتراء أسطح محامل الورك، تم تقديم واختبار العديد من المواد الجديدة [3]. تهدف عملية استبدال مفصل الورك بالكامل إلى تزويد المريض بمفصل يعمل بشكل طبيعي قدر الإمكان، مقاوم للخلع، ويحافظ على أكبر قدر ممكن من العظام ويدوم لأطول فترة ممكنة [4]. يمكن تقسيم المواد المستخدمة في غرسة مفصل الورك الصناعي إلى عدة تركيبات [4, 5]:

- مادة صلبة على مادة صلبة (hard on hard) مثل المعدن على المعدن ((metal on metal (MOM)، السيراميك على السيراميك ((Ceramic on Ceramic (COC) والسيراميك المتطور على المعدن ((Ceramic on metal (COM).
 - مادة قاسية على مادة طرية (hard on soft) مثل بوليمر على سيراميك (polymer on ceramic (PoC)، ومعدن على بوليمر ((metal on polymer (MoP).
- يُعد التوافق الحيوي (bio-compatibility) شرطاً أساسياً لاختيار مواد استبدال الورك الكلي. يتم اختيار المادة بحيث لا تُسبب المخلفات (الحطام) الناتجة عن اهتراء أجزاء غرسة الورك أي ضرر لأنسجة جسم الإنسان. كما يجب أن تكون المادة مقاومة للاهتراء [6].

- مشكلة البحث:

تلف المواد المستخدمة في مفصل الورك الصناعي، بسبب الاحتكاك والاهتراء، الذي يجعل عمرها قصير نسبياً، مما يؤثر سلباً على حياة المريض من الناحيتين الصحية والاقتصادية.

أهمية البحث وأهدافه:

- هدف البحث:

- (1) إجراء تحليل لمجموعة من المواد الحيوية المركبة التي سنشكلها حاسوبياً، والحصول على أفضل هذه المواد من حيث الخواص الميكانيكية والترابيولوجية الحيوية من خلال التحليل الرقمي.

(2) العمل على محاكاة النتائج الحاسوبية وإجراء مقارنة بينها.

- أهمية البحث:

الحصول على مادة حيوية ذات خواص ميكانيكية وترايبولوجية جيدة، تقلل الاحتكاك والاهتراء، أي تخفيف تلف مفصل الورك، وذلك لتعزيز وظيفة المفصل، وهذا يزيد عمر المفصل، مما يؤثر إيجابياً على حياة المريض الصحية والنفسية.

- الدراسات المرجعية:

قام Binnur Sagbas عام 2016 [1] بدراسة علم الترايبولوجيا الحيوية لمفاصل الورك، حيث إن علم الترايبولوجيا هو علم الأسطح المتفاعلة. عندما تكون هذه الأسطح في نظام بيولوجي، يطلق عليها اسم الترايبولوجيا الحيوية (biotribology). مع تزايد معدل عمليات استبدال المفاصل والحاجة إلى المفاصل الصناعية، أصبح علم الترايبولوجيا الحيوية فرعاً مهماً للغاية وسريع النمو من فروع علم الترايبولوجيا. بناءً على هذه الحقيقة، في هذه الدراسة، تم تقديم المفاهيم الترايبولوجية الأساسية من حيث الاحتكاك والتشحيم والاهتراء، ثم تم مناقشة السلوك الحيوي لمفاصل الورك الطبيعية والصناعية بالتفصيل. بالإضافة إلى ذلك، تم التعامل مع أزواج المواد المستخدمة في استبدال المفاصل الصناعية وتطبيق تعديل السطح لتعزيز الخصائص الترايبولوجية لهذه المواد. وكذلك، تمت مناقشة تحديد السلوك الترايبولوجي لمواد المفصل مثل الاهتراء، معامل الاحتكاك، عزم الاحتكاك وحرارة الاحتكاك باستخدام التقنيات التقليدية ومحاكاة مفصل الورك.

قام J. Jamari وآخرون عام 2022 [2] بدراسة مراجعة حالة المشي المعتمدة لنهج المحاكاة الحاسوبية على تحمل مفصل الورك الصناعي على مدى الثلاثين سنة الماضية. يتعرض المحمل في مفصل الورك الصناعي للاحتكاك، الاهتراء وتلف السطح مما يؤثر على الأداء العام ويؤدي إلى الفشل في وقت معين بسبب التلامس المستمر الذي يعرض المستخدم للخطر. يعد تقييم مفصل الورك باستخدام الدراسة السريرية، الاختبار التجريبي ونهج الصيغة الرياضية أمراً صعباً لأن هناك بعض العقبات من كل نهج. تعد المحاكاة الحاسوبية (Computational simulation) نهجاً بديلاً فعالاً والذي يكون ذو تكلفة مقبولة، سريعاً نسبياً وأكثر سهولة من الأساليب الأخرى في فحص الظروف المعقدة المختلفة التي تتطلب موارد واسعة والعديد من البارامترات مختلفة. على وجه الخصوص، تؤثر دورات المشي المختلفة على مسافة الانزلاق وتوزيع تحميل المشي المؤثر على المفاصل. يعد الاختيار المناسب وإضافة دورات المشي في النمذجة الحسابية أمراً بالغ الأهمية للتنبؤ والتحليل الدقيق والموثوق لأداء المحمل مثل الاهتراء أو فشل الغرسات. ومع ذلك، يتم النظر في مجموعة واسعة من دورات المشي وبيانات التحميل ودراساتها من قبل الباحثين كما ورد في الأدبيات. تصف المقالة الحالية مراجعة شاملة للأدبيات لحالة المشي المعتمدة والتي تم إجراؤها لدراسة المحمل باستخدام نهج المحاكاة الحاسوبية على مدار الثلاثين عاماً الماضية. تم تحديد العديد من فروق المعرفة المتعلقة بإجراءات التنفيذ والتبسيط والبحوث المستقبلية للحصول على نتائج تحليل المحمل باستخدام نهج محاكاة عددية أكثر واقعية وفقاً لمفاصل الورك البشرية الفيزيولوجية.

قام Bojko Łukasz وآخرون عام 2024 [7] بدراسة الاختبارات الترايبولوجية لمواد أكواب مفصل الورك الصناعي. حيث أن تفاصيل استبدال مفصل الورك تُحدث تغييراً جذرياً في شروط التفاعل بين أزواج الاحتكاك البيولوجية السليمة من خلال إدخال كوب ورأس متصلين بجذع المفصل الصناعي. عند تصميم واختيار هذا مفصل، يتعين الاختيار بعناية بين عدة ترايبولوجية صلبة تتميز بالثبات ولكن بقلّة الامتصاص للأحمال الحركية، وبين محمل حيوي مرّن قادر

على امتصاص هذه الأحمال بما يحاكي بشكل أفضل ظروف المفصل الطبيعي. كان الهدف من هذه الدراسة المقارنة والتقييم المنهجي للبارامترات الترابيولوجية والميكروميكانيكية لمجموعة مختارة من المواد الحيوية المستخدمة في تصنيع أكواب مفصل الورك الصناعي. أجريت سلسلة من الاختبارات التي شملت مقاومة الاهتراء، تحديد معاملات الاحتكاك، قياسات الصلابة الدقيقة، وكذلك اختبار معامل يونغ، وذلك بهدف التحقق من المواد الأكثر ملاءمة لاستخدامها في هذه التطبيقات. استناداً إلى نتائج الاختبارات الترابيولوجية، استطاع الباحثون تحديد الزوج الترابيولوجي الأمثل من حيث تقليل معدلات الاهتراء وانخفاض معامل الاحتكاك. إن تحسين التفاعل الترابيولوجي بين أزواج التلامس، مع التركيز على تقليل الاهتراء ومنع تكون المنتجات الناتجة عن الاحتكاك، من شأنه أن يحسن من ظروف عمل المفصل الصناعي ويطيل عمره التشغيلي داخل الجسم.

قام Amit Choudhari وآخرون عام 2024 [8] بمراجعة شاملة لآليات الاهتراء والاحتكاك في إعادة تأهيل مفصل الورك والركبة التي تعدّ محور اهتمام كثيف للبحث نظراً لأهميتها الحرجة في طول عمر وأداء المفاصل الصناعية. تستكشف هذه المراجعة العوامل الرئيسية التي تؤثر على المفاصل الصناعية للورك والركبة، بما في ذلك طول عمر المفصل، آليات الاهتراء، الاستجابات البيولوجية الناتجة عن جسيمات الاهتراء، اختيار المواد، استراتيجيات التصميم والاعتبارات الخاصة بالمريض. كما يتم فحص التأثير السريري والمعايير التنظيمية التي تحكم هذه المفاصل الصناعية. تؤدي الحالات العضلية الهيكلية المختلفة المتعلقة بالعظام، مثل هشاشة العظام، سرطان العظام، التشوهات الخلقية، إصابات الحروب والحوادث غير المتوقعة، مجتمعة إلى عبء اقتصادي سنوي قدره 136.8 مليار دولار على اقتصاد الولايات المتحدة. كما تصنف هذه المراجعة أيضاً أنواع عمليات استبدال مفاصل الورك والركبة، بما في ذلك استبدال الورك الكلي ((THR total hip replacement (THR)) واستبدال سطح الورك (resurfacing hip replacement (RHR))، مع التأكيد على الأهمية السريرية للاهتراء والاحتكاك في هذه الحالات. وتمت مناقشة أنواع الاهتراء في مفاصل الركبة والورك، مثل الاهتراء اللاصق (adhesive wear)، الاهتراء الكاشط (abrasive wear)، والاهتراء الناتج عن التعب (fatigue wear)، واهتراء التآكل/التأكسدي (corrosion/oxidative wear)، بالإضافة إلى اختيار مواد المفاصل، والتي تشمل الخيارات المعدنية، السيراميكية، البوليمرية والمركبة. كما تم استعراض تعديلات السطح المختلفة لتحسين مقاومة الاهتراء، مثل زراعة الأيونات، الطلاءات السطحية، والتعديلات المحاكية للحويّة (biomimetic modifications). كذلك تم في هذه المراجعة استعراض استراتيجيات التزيت في عمليات استبدال مفصل الورك والركبة، دور السائل الزليلي، تقنيات التزيت في المفاصل الصناعية، إلى جانب الطلاءات السطحية الناشئة لمقاومة الاهتراء، مثل طلاءات هيدروكسي أباتيت (hydroxyapatite)، والكربون الشبيه بالماس (diamond-like carbon)، وطلاءات نيتريد المعادن. كما يبحث النهج التجريبية لدراسة الاهتراء والاحتكاك، بما في ذلك اختبار الدبوس على القرص (pin on disk)، محاكيات المفاصل، اختبار tribo-corrosion، وتقنيات تحليل بقايا الاهتراء (wear debris)، مع التركيز على الاتجاهات المستقبلية والتقنيات الناشئة مثل التصنيع الإضافي، المفاصل الذكية، ابتكارات المواد الحيوية، والذكاء الصناعي في التنبؤ بالاهتراء. اختتمت هذه المراجعة بتلخيص الحالة الحالية للمعرفة في آليات الاهتراء والاحتكاك في إعادة تأهيل الركبة والورك، وحددت الاتجاهات المستقبلية للبحث في هذا المجال الحيوي.

قام Vipin Kumar وآخرون عام 2024 [9] بمراجعة التطور الترابيولوجي للبولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي (UHMWPE) ومركباته المستخدمة في استبدال المفاصل الصناعية للورك والركبة. حيث تقدّم هذه المراجعة تحليلاً

شاملاً لعملية التطور الترابيولوجي ل UHMWPE وموادها المركبة المستخدمة في استبدال المفاصل الصناعية للورك والركبة. وتركز على فهم آليات الاهتراء والاحتكاك التي تؤثر على أداء واستدامة هذه المواد في البيئات البيولوجية، مع أخذ الاعتبارات المتعلقة بتشريح المفاصل، التحميل الميكانيكي، خصائص المادة وظروف العمل في الاعتبار. كما استعرضت تطور تقنيات تصنيع وتعديل سطح UHMWPE لتعزيز مقاومته للاهتراء، تشمل معالجات سطحية، وتعديلات كيميائية، وإضافات محسنة لخصائص المواد. وناقشت أثر إضافة مركبات متنوعة مثل الألياف الزجاجية والكربونية، وتعديلات التركيب لتعزيز القوة، ومقاومة الاهتراء، وتقليل إنتاج جسيمات الاهتراء المسببة للالتهاب، الذي يساهم في اهتراء العظم حول المفصل. أبرزت هذه المراجعة أهمية التوافق الحيوي، استقرار المادة، والاستدامة، مع التركيز على التحديات المرتبطة باهتراء المادة، مثل التراكم الحيوي لجسيمات الاهتراء وتأثيرها على الأنسجة المحيطة. سلطت الضوء على أحدث التطورات في تصميم مواد UHMWPE، استراتيجيات تحسين الترابيولوجيا، والتقنيات التجريبية التي تقم أداء تلك المواد في ظروف محاكاة البيئات البيولوجية، مع النظر في الاتجاهات المستقبلية، مثل استخدام المواد النانوية، تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، المواد ذاتية التجديد، وتطبيقات الذكاء الصناعي لتحسين توقعات الأداء والاهتراء. يختتم المقال بالإشارة إلى الحاجة لمزيد من الدراسات التطبيقية والتطويرات الهندسية لضمان قابلية الاستخدام المستدام لهذه المواد في طب العظام وجراحة المفاصل على مدى السنوات القادمة.

طرائق البحث ومواده:

تم اختيار المواد لكل عنصر من مكونات المفصل الصناعي الذي يتكوّن من أربعة أجزاء رئيسية هي:

1. مكون كوب الحُق: Ti-6Al-4V.
2. مكون الإدخال أو البطانة (Liner): تم اختيار نوعين من المواد للمقارنة هما UHMWPE و PEEK.
3. مكون رأس الفخذ: مادة الزركونيا (ZrO_2).
4. مكون الغرسة: Ti-6Al-4V.

A. المواد المعدنية The Metal Materials:

❖ سبيكة Titanium-Aluminum-Vanadium Alloys (Ti-6Al-4V): إنها سبيكة ألفا- بيتا- تيتانيوم التي تتميز بطاقة عالية ومقاومة ممتازة للاهتراء. لذلك، يتم استخدامها في الطب الحيوي. وهي أحد أكثر سبائك التيتانيوم استخداماً وتستخدم في مجموعة واسعة من التطبيقات حيث تكون الكثافة المنخفضة ومقاومة عالية للاهتراء ضرورية مثل تطبيقات الفضاء والميكانيكا الحيوية (الغرسات والأطراف الصناعية) [2].

B. المواد السيراميكية The Ceramic Materials:

❖ أوكسيد الزركونيوم (الزركونيا) Zirconia (ZrO_2): يأتي اسم الزركونيوم من الكلمة العربية زركون (اللون الذهبي) (Zargon (golden in color)) والتي تأتي بدورها من الكلمتين الفارسييتين زار (الذهب) (Zar (Gold)) وغون (اللون) (Gun (Color)) [14]. تم إدخال سيراميك الزركونيا في تصنيع رؤوس الفخذ لاستبدال الورك الكامل بسبب قوتها النوعية العالية ومتانتها، مما يقلل من خطر الكسر. [11، 10].

C. المواد البوليميرية the Polymeric Materials: تم استخدام نوعين مختلفين من المواد البوليميرية وهي:

1. البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي **Polyethylene (Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE)**: البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي (UHMWPE) هو مادة ترموبلاستيكية، ويستخدم في التطبيقات الطبية الحيوية بسبب مقاومته العالية للاهتراء، والليونة، والتوافق الحيوي [12].
 2. بولي إيثر إيثر كيتون **Polyetheretherketone (PEEK)**: بولي إيثر إيثر كيتون (PEEK) هو بوليمر ترموبلاستيكي (thermoplastic) شبه بلوري متعدد الأرومات مع الصيغة الكيميائية $(-C_6H_4-O-C_6H_4-CO-)_n$ وخصائص ميكانيكية مناسبة للتطبيقات الطبية الحيوية [14]. مثل استخدامها كمادة حيوية لزراعة الأسنان ومواد المفاصل الصناعية [13].
- يوضح الجدول 1. خصائص المواد المختلفة التي تم أخذها في الاعتبار للمحاكاة.

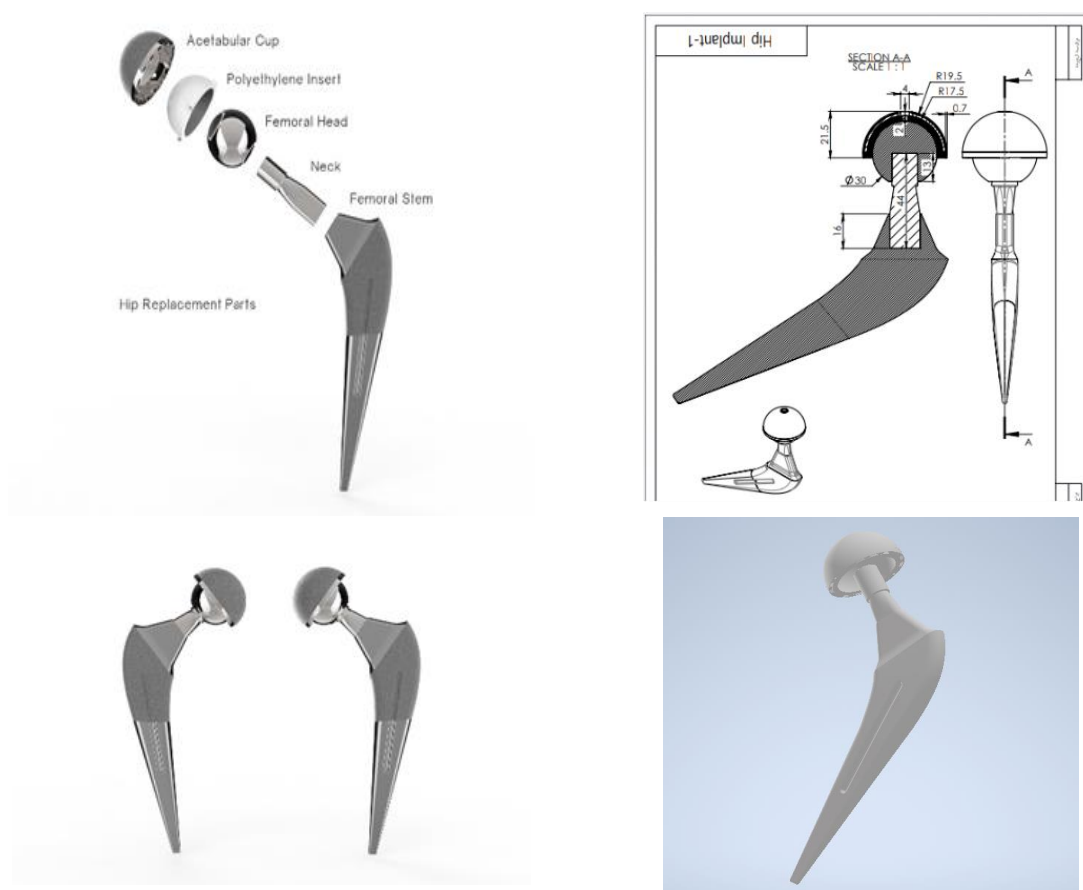
جدول 1. الخصائص الميكانيكية للمواد المستخدمة

الخصائص	PEEK	UHMWPE	Ti-6Al-4V	ZrO ₂
الكثافة (kg/m ³)	1300	936	4500	6040
نسبة بواسون	0.3	0.46	0.32	0.31
معامل يونغ (GPa)	3.6	0.5-0.8	110	210
إجهاد الخضوع (MPa)	100	17	900	230
مقاومة الشد القصوى (MPa)	139	39-48	900	551

❖ التصميم الهندسي ثلاثي الأبعاد لمفصل الورك الصناعي:

تم رسم النموذج الأولي ثلاثي الأبعاد لمفصل الورك الصناعي باستخدام برنامج Autodesk Inventor 2021، بناءً على أبعاد مكونات مفصل الورك الصناعي المتوفرة تجارياً. والتي تم الحصول عليها من ملفات ال CAD المقدمة من الشركة المصنعة. يتكون التصميم من أربعة أجزاء رئيسية هي: مكون الكوب الحُقِّي (Acetabular Cup)، مكون الإدخال (Acetabular Insert)، مكون رأس الفخذ (Femoral Head)، ومكون الزرعة الفخذية (Femoral Stem). يحتوي مفصل الورك الصناعي على رأس بقطر 30 مم، وإدخال حُقِّي بقطر داخلي 35 مم وسماكة 2 مم، مما يجعل القطر الخارجي للإدخال 39 مم. بالإضافة إلى ذلك، فإن الخلوص القطري بين الإدخال الحُقِّي (Acetabular Insert) ورأس عظم الفخذ هو 0.05 مم.

يوضح الشكل 1 الرسم التخطيطي والتصميم ثلاثي الأبعاد لمفصل الورك الصناعي، مع عرض تفاصيل المكونات والأبعاد. تم تصميم هذا النموذج ليكون نموذجاً أولياً لمفصل الورك الصناعي الكلي (Total Hip Replacement)، الذي يستخدم لاستبدال مفصل الورك التالف أو المريض.



الشكل 1. الرسم التخطيطي والتصميم ثلاثي الأبعاد لمفصل الورك الصناعي

نظراً لأن رأس عظم الفخذ يتمفصل داخل كوب الحُق فإن الاهتراء يكون مهيمناً على سطح إدخال كوب الحُق ورأس الفخذ [3]. ونظراً لأن تأثير عظم الحوض كان ضئيلاً لا يذكر على اهتراء زوج المحمل يتم أخذ رأس عظم الفخذ وإدخال كوب الحُق فقط في الاعتبار عند التنبؤ بعملية اهتراء غرسة الورك الصناعي [15]. ونظراً لأن اهتراء المادة الأقل قساوة هو السائد، فإن اهتراء UHMWPE و PEEK فقط يؤخذ في الاعتبار [3].

تصنع مادة البطانة للكوب الحُق من مادتين للمقارنة وهما مادتي UHMWPE ومادة PEEK. بينما تضمنت مادة رأس الفخذ المستخدمة في التحليل الحالي الزركونيا.

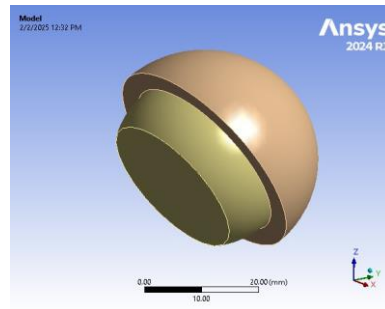
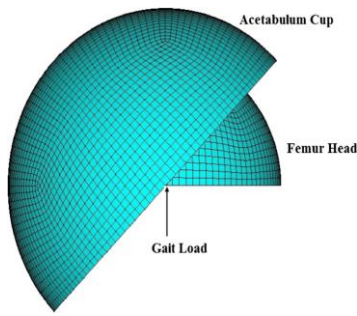
تم إدراج خصائص المواد المختلفة التي تم أخذها في الاعتبار للمحاكاة في الجدول 2. تم أخذ معامل الاهتراء لأربعة أزواج من تمفصل بطانة الكوب الحُق مع رأس الفخذ من الدراسات المرجعية وتم إدراج القيم في الجدول 2.

الجدول 2. معامل اهتراء تركيبات المواد المدروسة

الدراسات ذات الصلة	معامل الاهتراء Wear coefficient (mm ³ /Nm)	تركيبة المواد
[3]	7.4×10^{-9}	Zirconia- UHMWPE
[16]	0.06×10^{-6}	PEEK- Zirconia

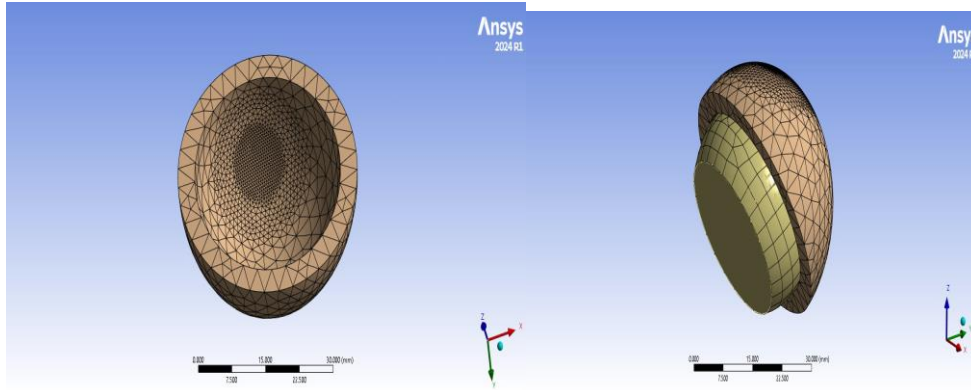
❖ التحليل بالعناصر المنتهية :Finite Element Modeling

من الجوانب الأكثر أهمية لنموذج اهتراء العناصر المنتهية هي الشكل الهندسي، المواد، الشبكة، الشروط الحدية، منطقة الاتصال، روتين الاهتراء والزحف (Creep). تم استيراد التصميم إلى برنامج Ansys 2024 R1 كما هو موضح في الشكل 2. يتأثر اهتراء سطح المحمل بالاحتكاك بين سطح المحمل كما ورد سابقاً. تم أخذ الاحتكاك بين سطحي التمثفصل (Zirconia- UHMWPE) و (Zirconia- PEEK) على أنه 0.07 و 0.06 كما ورد في [17]. تم تقييد الأسطح الخارجية لكوب الحق مقيدة في جميع الاتجاهات، نظرًا لأن كوب الحق مثبت بقوة على عظم الحوض، أي أن الإزاحات في الاتجاهات الثلاثة يتم ضبطها على الصفر بينما يتم تطبيق أحمال المشي (ثلاثية الأبعاد 3D) على العقدة المركزية لرأس عظم الفخذ.



الشكل 2. نموذج العناصر المنتهية

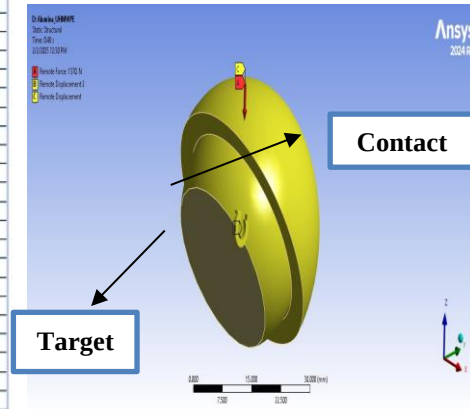
فيما يتعلق بالشبكة (mesh)، فهي تمثل تقسيم المجال الافتراضي الضروري لتحويل الجسم المستمر إلى عدد محدود من العقد والعناصر. حيث بلغ العدد الإجمالي للعقد والعناصر في النموذج، على التوالي، 53656 و 35833. يوضح الشكل 3 شبكة العناصر المنتهية للنموذج.



الشكل 3. شبكة العناصر المنتهية لبطانة الحق ورأس الفخذ باستخدام العناصر الرباعية السطوح

أما بالنسبة لمنطقة التلامس، فإن زوج التلامس هو السطح البيني المفصلي للرأس/ البطانة. يُطلق على أحد السطحين اسم الهدف (target) والآخر يسمى سطح التلامس (contact). السطح الهدف هو سطح المادة الصلبة، على سبيل المثال، الرأس والغلاف الحقي (acetabular head and shell)؛ في حين أن سطح التلامس هو سطح المادة الناعمة، وهي بشكل عام البطانة أو الإدخال [18, 19]. يوضح الشكل 4 عرض إعدادات التلامس في نموذج العناصر المنتهية.

Model (D4) > Connections > Contacts > Contact Regions	
Object Name	Frictional - acetabular_insert To Femoral_head
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	acetabular_insert
Target Bodies	Femoral_head
Protected	No
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	6.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Asymmetric
Trim Contact	Program Controlled
Contact APDL Name	
Target APDL Name	
Suppressed	No
Display	
Element Normals	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Nodal-Normal To Target
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None



الشكل 4. منطقة التلامس وإعدادات خيارات التلامس لاستبدال مفصل الورك

تم تطبيق الشكل العام لقانون Archard ضمن تحليل العناصر المنتهية في برنامج Ansys ® من خلال أمر APDL TB، وإدراج حقيبة الاهتراء WEAR MODULE في بيئة التلامس، وضبطه بشكل صحيح. بتنشيط الخيار ARCH، وذلك من خلال المعادلة التالية:

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

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

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

H: هو قساوة (صلابة) المادة المعرضة للاهتراء.

P: هو ضغط التلامس.

m: هو المعامل الأسّي لضغط التلامس.

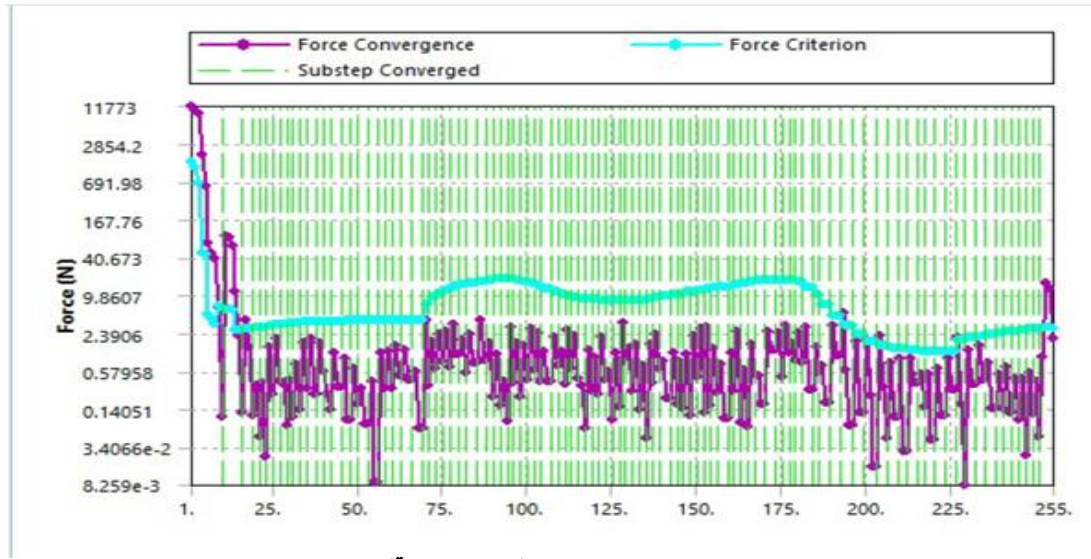
vs: هي سرعة الانزلاق.

n: هو المعامل الأسّي لسرعة الانزلاق [18, 20].

يتم تنفيذ نموذج Archard بإدراج منفذ الأوامر (Command Snippets)، وتحديداً الأمر TB، والأمر WEAR و TBOPT= ARCD.

تؤدي عملية الاهتراء إلى تدهور نوعية العناصر الصلبة الأساسية، مما قد يعيق المحاكاة بسبب تشوه العناصر، كما هو موضح في الشكل 5.

للتغلب على الأخطاء المحتملة بسبب الاهتراء ومواصلة التحليل، تمّ استخدام روتين التكيف غير الخطي للشبكة (mesh nonlinear adaptivity routine) أو إعادة التقسيم يدوياً (manual rezoning) لتحسين الشبكة [21, 22].

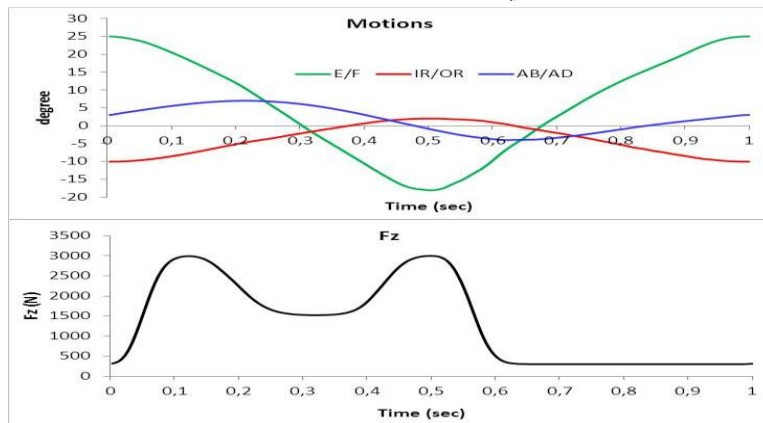


الزمن (دورة حاسوبية)

الشكل 5. اضطراب منحنى تقارب القوة الرقمي الذي ينتجه البرنامج نتيجة حدوث الاهتراء الذي يؤدي إلى تدهور نوعية العناصر الصلبة الأساسية، مما قد يعيق المحاكاة بسبب تشويه العناصر

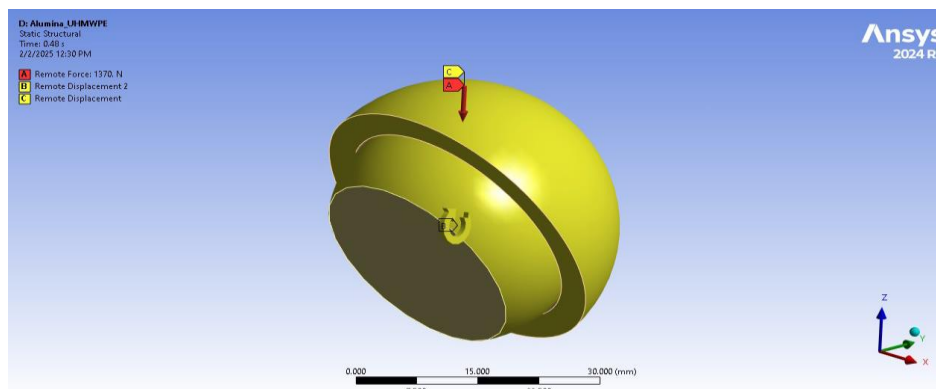
فيما يتعلق بالشروط الحدية (الحمل والمدخلات الحركية) المذكورة في الدراسة نظراً لضرورة جعل مشية الإنسان قابلة للتكرار بسهولة، يحتوي المعيار ISO 14242 أيضاً على قانون الحركة وقانون التحميل المعياريين، والمستند إلى الدراسات السابقة حول المشية الطبيعية للإنسان، وعليه تم تعريف الشروط الحدية كما هو منصوص عليه في المعيار ISO 14242-1 والدراسات المرجعية ذات الصلة [23, 24].

يوضح الشكل 6 الدورانات الزاوية الثلاث المطبقة حول المحاور x و y و z (E/F): الانبساط/الانقباض (extension/flexion)، الدوران للداخل/الخارج (internal/ external)، IR/OR، التبعيد والتقريب ((abduction-adduction)، والحمل المحوري المطبق (F_z).



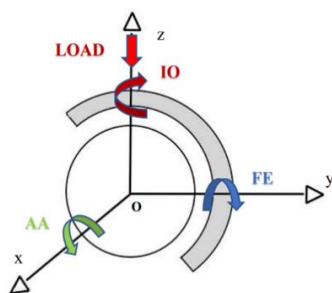
الشكل 6. اتجاهات القوة والدورانات الزاوية وفق مقياس ISO 14242-1

يوضح الشكل 7 ملخص مخطط الشرط الحدية.



الشكل 7. الشروط الحدية لاستبدال مفصل الورك

تم تعريف جملة إحداثيات عناصر مفصل الفخذ الصناعي بإجراء تحويل دوران لجملة إحداثيات البرنامج بمقدار 60° حول المحور x وذلك لمحاكاة الوضعية النسبية الصحيحة للعناصر بشكل مطابق لمفصل الفخذ الطبيعي، كما هو مبين في الشكل 8.



الشكل 8. النظام المرجعي لاستبدال مفصل الورك

أما بالنسبة لإعدادات التحليل (analysis settings) الموضحة في الشكل 9 فهو يتضمن خطوة واحدة مدتها ثانية واحدة. وعلى وجه التحديد، يتميز بمتجه قوة يستخدم لضمان تقارب الحل. بعبارة أخرى، من المفيد ضمان التلامس أثناء المحاكاة بأكملها.

Model (D4) > Static Structural (D5) > Analysis Settings	
Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	5.e-003 s
Minimum Time Step	5.e-003 s
Maximum Time Step	1.e-002 s
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Quasi-Static Solution	Off
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Combine Restart Files	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Program Controlled
Advanced	
Inverse Option	No
Contact Split (DMP)	Program Controlled
Output Controls	
Stress	Yes
Back Stress	Yes
Strain	Yes
Contact Data	Yes
Nonlinear Data	Yes
Nodal Forces	No
Volume and Energy	Yes
Euler Angles	Yes
General Miscellaneous	No
Contact Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Result File Compression	Program Controlled
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\Laptop\mossaab files\5-12-2024\5-12-2024_files\dp0\SYS-2\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

الشكل 9. عملية إعدادات التحليل لمفصل الورك الصناعي

النتائج والمناقشة:

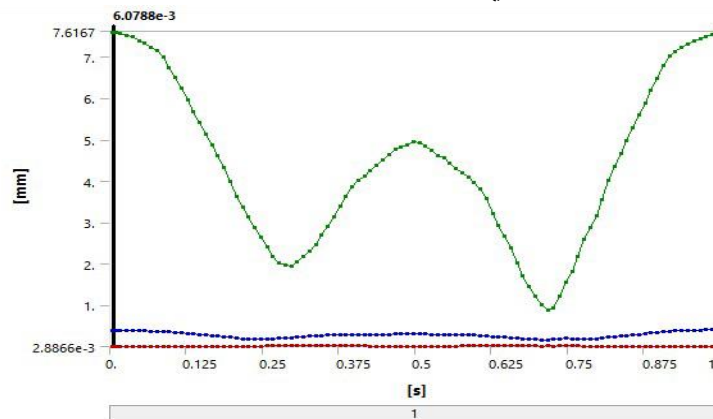
يبين الجدول 3 نتائج المحاكاة الرقمية المستحصلة من برنامج Ansys مع استخدام حقبة الاهتراء Module Corrosion الخاصة بالبرنامج. تم الحصول على تقرير أداء متكامل للتركيبات المستخدمة وهو يحوي شروط التحميل والشبكة وخصائص المواد والقيم الناتجة عنها ولا سيما التشوه الكلي، ضغط التلامس الأعظمي، مسافة الانزلاق، الفراغ (الفجوة)، الاختراق، عمق الاهتراء وحجم الاهتراء على السطح الداخلي للحق الذي تم الحصول عليه من النموذج.

جدول 3. مقارنة نتائج تحليل FEA لمجموعة تركيبات المواد المستخدمة في البحث

Results	Zirconia- PEEK	Zirconia – UHMWPE
Total Deformation [mm]	0.38759	0.38781
Volume [mm ³]	7.0783	7.0784
Pressure [MPa]	7.6656	7.3593
Sliding distance [mm]	12.419	12.42

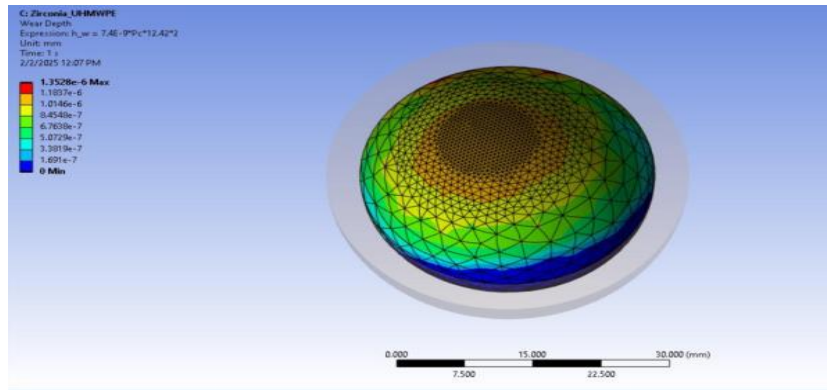
Gap [mm]	-0.14763	-0.14831
Penetration [mm]	1.87×10^{-02}	1.80×10^{-02}
Total Wear depth [mm]	3.15×10^{-02}	3.80×10^{-03}
Wear Volume [mm ³]	8.4006	1.0291

بمقارنة حجم الاهتراء ما بين التركيبتين المدروستين، نلاحظ وبشكل واضح انخفاض قيمته للتركيبة Zirconia-UHMWPE بالمقارنة مع التركيبة Zirconia-PEEK التي أنتجت قيمة عالية نسبياً. بينت النتائج أن التركيبة Zirconia-UHMWPE قد أنتجت أدنى قيم للاهتراء مقارنة بالتركيبة الأخرى، حيث بلغ حجم الاهتراء 1.0291 mm^3 وعمق الاهتراء $3.80 \times 10^{-3} \text{ mm}$. يشير ذلك إلى قدرة تحمل ميكانيكية أعلى مقارنة بالمادة الأخرى، مما يعكس أهمية اختيار المواد الحيوية المناسبة لضمان طول عمر المفاصل الصناعية وتحسين أدائها الميكانيكي في بيئات التشغيل المختلفة. تظهر المخططات الناتجة عن التحليل أن التشوه الكلي لهاتين التركيبتين كان متقارباً، إلا أن مادة Zirconia-PEEK أظهرت القيم الأقل نسبياً، مما يشير إلى كفاءة استخدامها ضمن التطبيقات الطبية، أما بالنسبة لضغط التلامس الأعظمي، فقد تراوحت قيمته بين 7.3593 و 7.6656 MPa. حيث بلغ أقصى ضغط تلامس لتركيبة Zirconia-PEEK وهو 7.6656 MPa كما هو مبين في الشكل 10.

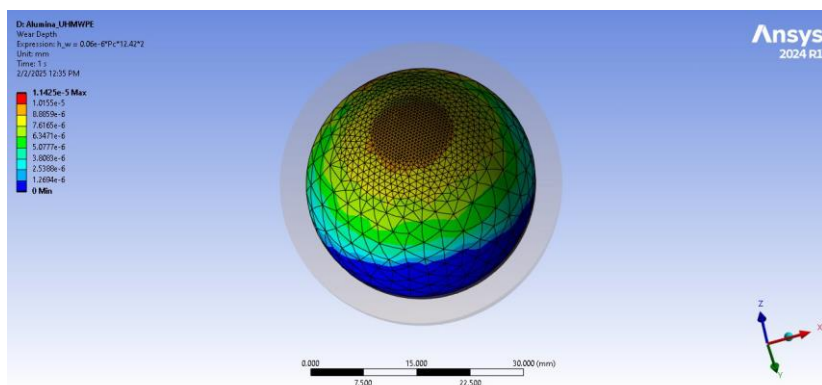


الشكل 10. مقارنة قيم التشوه الأعظمي للتركيبات المدروسة

يظهر الشكلان 11 و 12 توزيعات عمق الاهتراء بين جزئي المفصل. نلاحظ من جهة أن القيم العظمى قد تركزت في مناطق التلامس المباشر بين رأس المفصل والحق، كما أن التركيبة Zirconia-UHMWPE قد سجلت أقل نسبة اهتراء على مدار الزمن من جهة أخرى، فيما أنتجت تركيبة Zirconia-PEEK قيمة أعلى لعمق الاهتراء، مما يشير إلى ضعف استقرارها الميكانيكي تحت الحمولات المطبقة كما هو مبين في الشكل 12.



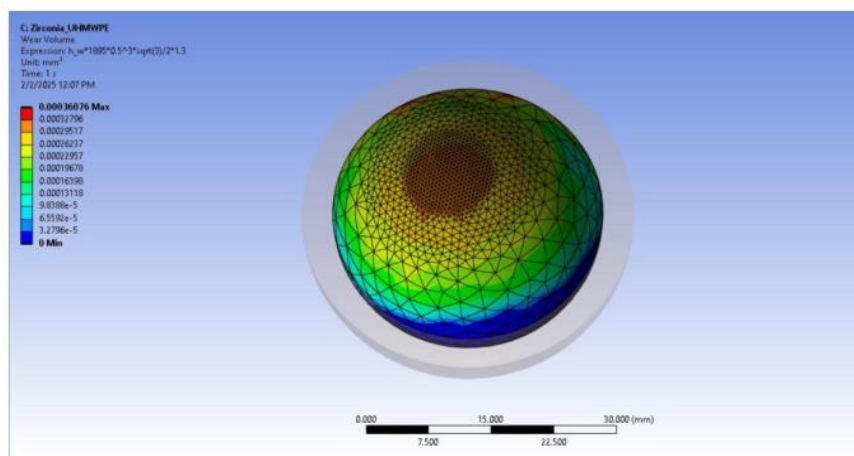
الشكل 11. توزيع قيم عمق اهتراء تركيبة Zirconia-UHMWPE



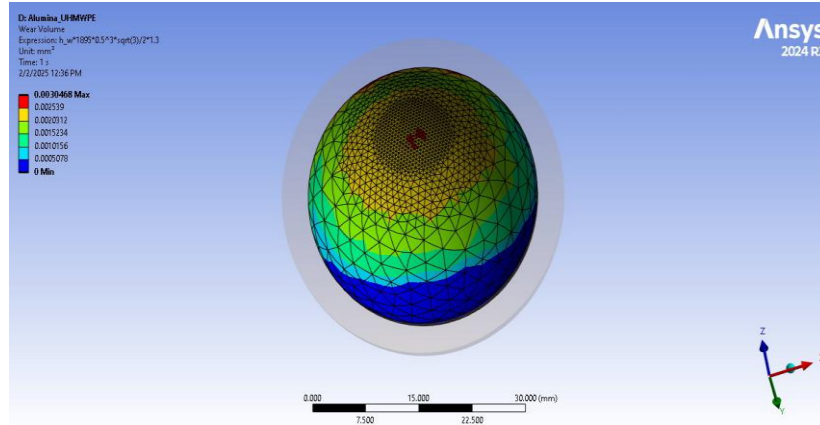
الشكل 12. توزيع قيم عمق اهتراء تركيبة Zirconia-PEEK

فيما يتعلق بحجم الاهتراء، فقد سجل Zirconia-UHMWPE أدنى قيمة، في حين أن Zirconia-PEEK أظهرت قيمة أعلى تصل إلى 8.4 mm^3 ، مما يشير إلى أن مادة PEEK أقل كفاءة في مقاومة الاهتراء عند استخدامها في المفاصل الصناعية.

تُظهر الأشكال الخاصة بالاهتراء أن تركيبة Zirconia-UHMWPE قد أنتجت توزيعاً متجانساً نسبياً لحجم الاهتراء كما هو مبين في الشكل 13، بينما أظهرت مادة Zirconia-PEEK انتشاراً أوسع في القيم الكبيرة للاهتراء، وهو ما يشير إلى احتمالية أعلى للاهتراء بمرور الزمن كما هو مبين في الشكل 14.



الشكل 13. توزيع قيم حجم اهتراء تركيبة Zirconia-UHMWPE



الشكل 14. توزيع قيم حجم اهتراء تركيبة Zirconia-PEEK

نلاحظ أن عمق اهتراء مادة Zirconia- UHMWPE بلغ 3.80×10^{-03} mm وهو الأقل من بين التركيبتين التي تمت دراستهما، يليه عمق الاهتراء لمادة Zirconia- PEEK حيث بلغ عمق اهترائه 3.15×10^{-02} mm. وهذه النتيجة تدل على أن مادة Zirconia- UHMWPE متينة، ويعزى سبب ذلك ربما إلى تكوين مادة UHMWPE المؤلفة من سلاسل طويلة للغاية من البولي إيثيلين ويضيف كل جزيء فردي متانة وقوة إلى التركيب بأكمله من خلال طوله. لذلك نستنتج أن تركيبة Zirconia-UHMWPE تُعد الخيار الأفضل بشكل عام لمفصل الورك الصناعي من حيث متطلبات المقاومة للاهتراء، الأداء البيولوجي، والعمر الافتراضي، خاصة بالمقارنة مع Zirconia-PEEK، الذي لا يُظهر بعد الأداء المماثل من حيث تقليل الاهتراء والاستقرار في التطبيقات طويلة المدى. ويعود ذلك إلى الأداء المتميز لـ UHMWPE في تقليل معدلات الاهتراء بفضل خاصيته المميزة في مقاومة الاهتراء ومرونته، مما يحسن من عمر المفصل ويقلل من تكون جزيئات الاهتراء التي قد تسبب الالتهاب. وكذلك التوافق الممتاز بين سطح الزركونيا الصلب و UHMWPE مما يقلل من الاهتراء الناتج ويضمن استقراراً طويلاً للأمد للمفصل. دعماً لذلك، أظهرت دراسات مثل Hattori et al (2018) و Lozano et al (2020) أن تركيبة Zirconia-UHMWPE يوفر أداءً سريرياً وميكانيكياً متفوقاً، مما يجعله المعيار المفضل في تصميمات وتركيبات مفصل الورك الصناعي. يوفر خصائص احتكاكية منخفضة ومرونة عالية، مما يقلل من إنتاج جزيئات الاهتراء التي تؤدي إلى مضاعفات مثل الالتهاب أو اهتراء العظم. وكذلك مادة الزركونيا تتمتع بصلابة عالية خاصة عند التلامس مع UHMWPE حيث يقل الاهتراء الناتج ويطول عمر المفصل. كما أن تركيبة Zirconia-UHMWPE تحظى بسجل سريري طويل يدعم استقرارها ومتانتها، بحيث تضمن هذه التركيبة عمراً افتراضياً أطول للمفصل، مع تقليل الحاجة لإعادة الجراحة. كذلك رغم الميزات الميكانيكية الممتازة لـ PEEK، إلا أن بيانات الاهتراء الخاصة به عند التلامس مع الزركونيا أقل وضوحاً، مع بعض الدراسات التي تشير إلى معدلات اهتراء أعلى مقارنة بـ UHMWPE في ظل ظروف محاكاة الاستخدام طويل الأمد [25, 26].

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. أظهرت إمكانية استخدام مادة (Zirconia- UHMWPE) في تحسين مقاومة مفصل الورك الصناعي للاهتراء.

2. أن مادة Zirconia- UHMWPE تملك متانة أفضل بالمقارنة مع مادة Zirconia- PEEK.
 3. أن أفضل نتائج اختبار تحليل الاهتراء يمكن الحصول عليها عند استخدام Zirconia- UHMWPE.
- التوصيات:**
1. نوصي للشركات المصنعة للمفاصل الصناعية باستخدام المادة (Zirconia- UHMWPE) في المفاصل الصناعية وذلك لمقاومتها العالية للاهتراء
 2. نوصي بإعادة الدراسة باستخدام مواد أخرى لبطانة الكوب الحقي مثل مزج مادة PEEK مع ألياف الكربون أو ألياف زجاجية المتوافقة حيويًا ومقارنتها بمادة UHMWPE.
 3. نوصي بتكرار الدراسة على أنواع أخرى من مواد البلاستيك مثل: البولي تترافلوروايثيلين (PTFE) أو بولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA).

References:

- [1] B. Sagbas, *Biotribology of artificial hip joints*, InTechOpen, 2016.
- [2] J. Jamari, M. Ammarullah, MI, G. Santoso, S. SUGIHARTO, T. Supriyono, M. Permana, T. Winarni, E. Heide, Adopted walking condition for computational simulation approach on bearing of hip joint prosthesis: Review over the past 30 years, *Heliyon*. 8.12, (2022).
- [3] S. Shankar, R. Nithyaprakash, Predicting the wear of soft-on-hard bearing couples for human hip prosthesis using finite element concepts, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 16.03: 1650020, (2016).
- [4] S. Affatato, Tribological interactions of modern biomaterials used in total hip arthroplasty (THA), *Perspectives in Total Hip Arthroplasty*. 99-116, (2014).
- [5] R. Nithyaprakash, S. Shankar, M. Uddin, Computational wear assessment of hard on hard hip implants subject to physically demanding tasks, *Medical & biological engineering & computing*. 56: 899-910, (2018).
- [6] V.Jangid, A. K. Singh, A. Mishra, Wear simulation of artificial hip joints: effect of materials, *Materials Today: Proceedings*. 18: 3867-3875, (2019).
- [7] B. Lukasz, P. Paweł, O. Piotr, M. Elżbieta, Tribological Tests of Materials for Hip Joint Endoprosthesis Cups, *Tribologia*. (2024).
- [8] A. Choudhari, A. K. Gupta, A. Kumar, A. Kumar, A. Gupta, N. Chowdhury, A. KUMAR, Wear and friction mechanism study in knee and hip rehabilitation: A comprehensive review, *Applications of biotribology in biomedical systems*. 345-432, (2024).
- [9] V. Kumar, R. P. Tewari, A. Rawat, A. Tribological evolution of ultra-high molecular weight polyethylene and its composites for hip and knee replacement implants: A. *Jurnal Tribologi*. 42: 161-197, (2024).
- [10] S. Affatato, A. Ruggiero, M. Merola, Advanced biomaterials in hip joint arthroplasty. A review on polymer and ceramics composites as alternative bearings, *Composites Part B: Engineering*. 83: 276-283, (2015).
- [11] C. Piconi, G. Maccauro, Zirconia as a ceramic biomaterial, *Biomaterials*. 20.1: 1-25, (1999).
- [12] M. Hussain, R.A. Naqvi, N. Abbas, S.M. Khan, S. Nawaz, A. Hussain, N. Zahra, M.W. Khalidet, Ultra-high-molecular-weight-polyethylene (UHMWPE) as a promising polymer material for biomedical applications: A concise review, *Polymers*. 12.2: 323, (2020).
- [13] S. Moharil, A. Reche, K. Durge, S.S. Moharilet, Polyetheretherketone (PEEK) as a biomaterial: an overview. *Cureus*. 15.8, (2023).
- [14] S. Yoon, Y. Kim, J. Lee, H. Kim, R. Murakami, Tribological properties of carbon/PEEK composites, *International Journal of Ocean System Engineering*. 3.3: 142-146, (2013).

- [15] S. Barreto, J. Folgado, P. Fernandes, J. Monteiroet, The influence of the pelvic bone on the computational results of the acetabular component of a total hip prosthesis. (2010).
- [16] R. Heuberger, C. Stöck, J. Sahin, L. Eschbachet, PEEK as a replacement for CoCrMo in knee prostheses: Pin-on-disc wear test of PEEK-on-polyethylene articulations, *Biotribology*. 27: 100189, (2021).
- [17] Y. koh, J. lee, K. kang, Prediction of wear on tibial inserts made of UHMWPE, PEEK, and CFR-PEEK in total knee arthroplasty using finite-element analysis, *Lubricants*. 7.4: 30, (2019).
- [18] F. Giannetti, *Finite Element modelling to predict wear in joint replacements*. (2020).
- [19] S. Wu, J. Hung, C. Shu, J. Chen, The computer simulation of wear behavior appearing in total hip prosthesis, *Computer methods and programs in biomedicine*. 70.1: 81-91, (2003).
- [20] L. Mattei, F. Puccio, How accurate is the Archard law to predict wear of UHMWPE in hard-on-soft hip implants? A numerical and experimental investigation. *Tribology International*. 187: 108768, (2023).
- [21] «Mechanical APDL Contact Technology Guide», pag. 266.
- [22] «Workbench User's Guide», pag. 394, 2019.
- [23] L. Mattei, F. Puccio, E. Ciulli, A. Pauschitz, Experimental investigation on wear map evolution of ceramic-on-UHMWPE hip prosthesis, *Tribology International*. 143: 106068, (2020).
- [24] M. Maru, L. Sena, L. Lidizio, C. Achete, Wear simulation of hip joint prostheses: preliminary results.
- [25] K. Hattori, A. Tonegawa, T. Nakamura, Wear behavior of zirconia femoral head against highly cross-linked polyethylene and ultra-high molecular weight polyethylene, *Journal of Orthopaedic Science*. vol. 23, no. 3, p. 530-535, (2018).
- [26] C. Lozano, G. García, A. Rodríguez, Comparison of wear characteristics in zirconia and PEEK against UHMWPE in hip prostheses, *Materials Science and Engineering*. vol. 112, p. 110832, (2020).
- [27] S. Ghalme, A. Mankar, Y. Bhalerao, Biomaterials in hip joint replacement. *Int. J. Mater. Sci. Eng.* 4.2: 113-125, (2016).
- [28] L. Wang, G. Isaac, R. Wilcox, A. Jones, J. Thompsonet, Finite element analysis of polyethylene wear in total hip replacement: A literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 233.11: 1067-1088, (2019).
- [29] F. Liu, J. Fisher, Z. Jin, Computational modelling of polyethylene wear and creep in total hip joint replacements: effect of the bearing clearance and diameter. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 226.6: 552-563, (2012).