

## Design of Active Prosthetic Knee Adapted with Uneven Terrain

Dr. Neruda Barakat\*

Dr. Nael Daoud\*\*

Alaa Saidi\*\*\*

(Received 13 / 7 / 2021. Accepted 14 / 3 / 2022)

### □ ABSTRACT □

The currently available commercial knees simulate the human knee by performing one rotational movement (extension / flexion), research studies in this field focus also on the same issue, this research aims to design a prosthetic knee that can perform two rotational movements, in addition to getting as close as possible to the kinematic and kinetic characteristics of the intact human knee. The joint in this paper is a U-Joint type that provides two rotational movements., the first (extension/flexion) is controlled by a Series Elastic Actuator SEA, and the second (abduction / adduction) is controlled by a mechanism called gas spring. The design considers the height and weight of an average Syrian male subject. A structure analysis was performed using the finite element method to ensure its ability to do the required job when exposed to different possible loads.

**Keywords:** Prosthetic knee, series elastic actuator, extension/flexion, abduction/adduction, knee biomechanics, FEA study, structural analysis, static study, fatigue study.

---

\*Assistant Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. nerudab@gmail.com

\*\*Assistant Professor, Department of Robotics and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, Manara University, Lattakia, Syria. Nael.daoud@manara.edu.sy

\*\*\*Postgraduate Student (MSc), Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. (ala.saydi@gmail.com)

## تصميم ركبة صناعية فعالة متكيفة مع الأراضي غير المستوية

د. نيرودا بركات\*

د. نائل داود\*\*

آلاء صعيدي\*\*\*

(تاريخ الإيداع 13 / 7 / 2021. قُبِلَ للنشر في 14 / 3 / 2022)

### □ ملخص □

تحاكي الركب الصناعية التجارية المتوفرة حالياً عمل الركبة البشرية من خلال أداء حركة دورانية واحدة (امتداد/انثناء)، كما وتركز الدراسات البحثية في هذا المجال على نفس الأمر، يهدف هذا البحث إلى الوصول لتصميم مفصل ركبة صناعي يقوم بحركتي دوران، ذلك بالإضافة لاقتربه قدر الإمكان من المواصفات الحركية والتحريرية للركبة الطبيعية السليمة. المفصل في هذا البحث هو من نوع U-Joint يؤمن حركتي دوران، يُتحكم بالحركة الدورانية الأولى (الامتداد/انثناء) عن طريق مشغل متسلسل من Series Elastic Actuator SEA، ويُتحكم بالحركة الدورانية الثانية (الإبعاد/ اقتراب) عن طريق الميكانيزم المسمى بنابض الغاز. تم التصميم على أساس المواصفات لشخص متوسط الطول والوزن، وتمت دراسة التصميم ستاتيكيًا وديناميكيًا باستخدام طريقة العناصر المنتهية للتأكد من قدرته على القيام بالوظيفة المطلوبة عند تعرضه للأحمال الممكنة.

**الكلمات المفتاحية:** ركبة صناعية، مشغل متسلسل من، امتداد/ انثناء، إبعاد/ اقتراب، بيوميكانيك الركبة، دراسة عناصر منتهية، الدراسة الإنشائية، دراسة ستاتيكية، دراسة تعب.

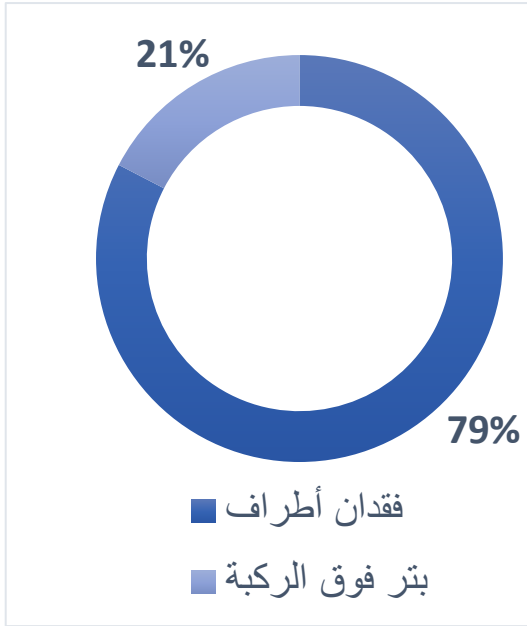
\* مدرس - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
nerudab@gmail.com

\*\* مدرس - قسم علوم الروبوت والأنظمة الذكية - كلية الهندسة - جامعة المنارة - اللاذقية - سورية.  
Nael.daoud@manara.edu.sy

\*\*\* طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية (ala.saydi@gmail.com).

## مقدمة:

تجري في كل عام آلاف من عمليات البتر حول العالم وذلك بسبب مضاعفات مرض السكري، الأمراض الإقفارية<sup>1</sup>، الحوادث وأمراض السرطان، و الأعمال الحربية. شهدت بلادنا في السنوات الأخيرة ازدياداً بحالات البتر بسبب الأزمة والحوادث والطلاقات النارية والشظايا والألغام مما أدى لازدياد الحاجة للأطراف الصناعية، وعلى الرغم من عدم وجود إحصائيات رسمية دقيقة حول عدد الأشخاص المحتاجين إلى أطراف صناعية في سورية حتى الآن إلا أنه وبحسب تقرير لمنظمة Humanity & Inclusion يوجد 80000 شخص في سورية يحتاج طرف صناعي أو جهاز لتقويم العظام [10]، وبحسب الفنيين في مركز إعادة التأهيل والأطراف الاصطناعية في مشفى ابن النفيس في دمشق إن انتشار حالات البتر السفلية أكثر من العلوية بكثير [11]. عالمياً، يبلغ عدد مبتوري الأطراف حوالي



الشكل 1: حالات فقدان الأطراف عالمياً

1.9 مليون شخص، منهم 400 ألف مصابين ببتر فوق الركبة (الشكل 1) [10].

يعرف الطرف الصناعي على أنه جهاز يعمل عمل الطرف المفقود نتيجة البتر. حصلت ثورة تكنولوجية عبر العقود الأخيرة في مجال الأطراف الصناعية وذلك كنتيجة للتطور الكبير الحاصل في مجال المواد، الإلكترونيات، الحساسات والمشغلات. يمكن تقسيم الأطراف الصناعية المتاحة حالياً إلى ثلاث مجموعات أساسية: الأطراف المنفعلة Passive، الأطراف ذات التخميد المتغير Variable-damping، والأطراف الفعالة Active.

تعتمد الأطراف المنفعلة على الأنظمة الميكانيكية، ويتطلب هذا النوع جهداً كبيراً من المريض للسيطرة على الطرف، أما الأطراف ذات التخميد المتغير فيُتحكم بتأثير التخميد عن طريق اسطوانة هيدروليكية، ويراقب انثناء وامتداد الساق عن طريق حساس زاوية. النوع الأكثر تطوراً يتحكم بالتخميد عن طريق المتحكمات الصغيرة، وعلى الرغم من أن هذه الأطراف لها مزايا كثيرة مقارنة مع الأطراف المنفعلة، إلا أنه هناك جانب هام يظهر فيه قصور هذه الأطراف، وهو عندما يكون هناك حاجة لتوليد طاقة ميكانيكية موجبة، يعد هذا القصور أمراً مقبولاً في بعض النشاطات التي يقوم بها الفرد يومياً، مثل هبوط الأدراج، ولكن أغلب الأنشطة اليومية تتطلب توليد طاقة موجبة، أي أن المفصل الذي يستعمل هذا النوع من التخميد يكون غير قادرٍ على محاكاة عمل المفصل الطبيعي خلال نشاطات عديدة مثل الوقوف بعد الجلوس، المشي المستوي، صعود الأدراج أو المنحدرات. أما الأطراف الفعالة التي تفعل عن طريق المحركات الكهربائية فقد حلت هذه المشكلة عن طريق تأمينها للعمل الموجب الذي يحتاجه المفصل.

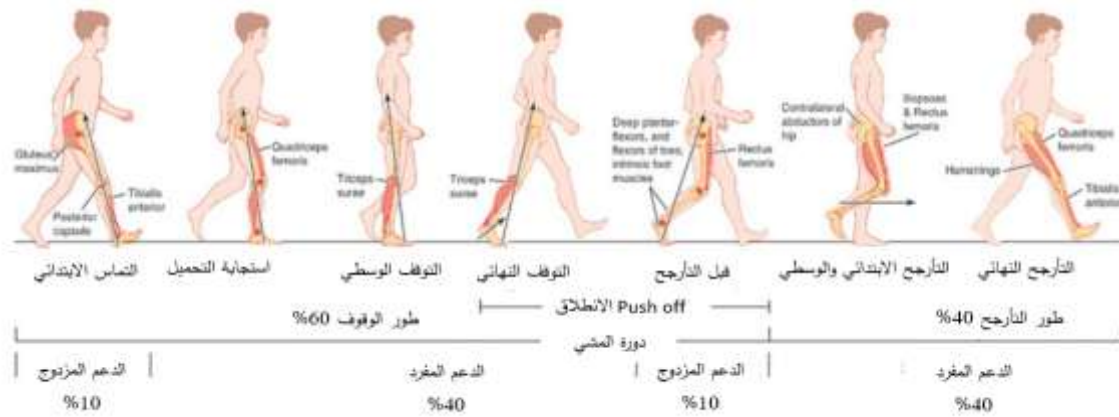
<sup>1</sup> الأمراض الإقفارية هي الأمراض التي لا يحصل فيها عضو ما على حاجته من الدم.

## بيوميكانيك الركبة:

من المهم دراسة بيوميكانيك مفصل الركبة الطبيعي عند الإنسان، إذ تمثل دراسة جسم الإنسان وحركاته أولى الخطوات في عملية تصميم وتصنيع الطرف الصناعي الأمثل الذي يجب أن يكون أقرب ما يكون لشكل وسلوك الطرف الطبيعي.

## دورة المشي:

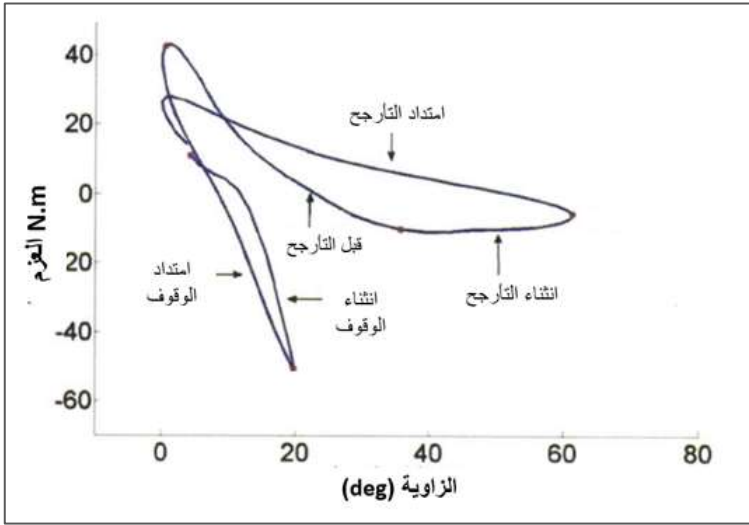
المشي عند الإنسان هو سلوك دوري والفترة التي تمثله تسمى دورة المشي. تعرف دورة المشي على أنها الفترة الزمنية التي تبدأ بالاتصال الأولي بين الكعب والأرض لإحدى الأرجل وتنتهي بالتماس التالي بين الكعب والأرض لنفس الرجل (شكل 2). تعتبر الخطوة هي الوحدة الأساسية لدورة المشي لدى الإنسان والتي تقسم لطورين أساسيين هما طور الوقوف وطور التآرجح [4]



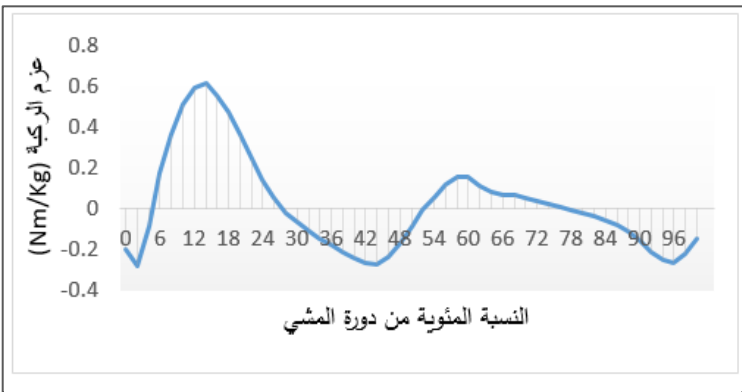
الشكل 2: دورة المشي الطبيعية عند الإنسان

## طور الوقوف (الدعم):

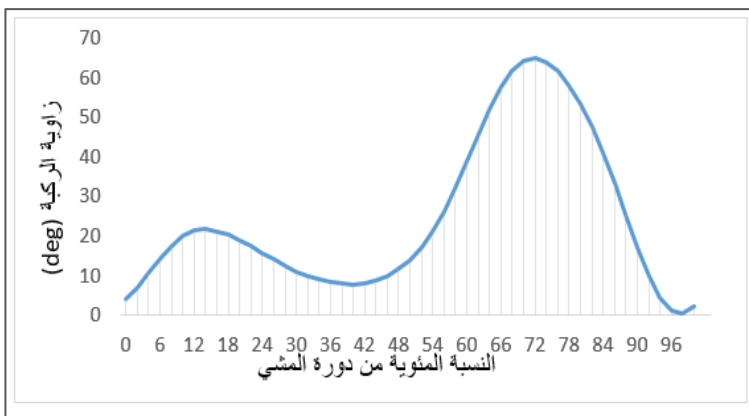
1. التماس الابتدائي (0%) : يحدث عندما يمس الكعب الأرض، يكون مفصل الورك في حالة انثناء، والركبة في حالة امتداد.
2. استجابة التحميل (0-10%) : القدم تلمس الأرض وتستمر بذلك حتى ترتفع القدم الأخرى من أجل خطوة، كامل وزن الجسم يُنقل إلى الرجل الداعمة. دور هذا الطور بشكل أساسي هو امتصاص الصدمة ونقل وزن الجسم والحركة للأمام.
3. التوقف الوسيطى (10-30%) : تبدأ بارتفاع الطرف المقابل وتستمر حتى يُنقل كامل وزن الجسم إلى الطرف الداعم، هنا يكون مفصليّ الورك والركبة للطرف الداعم بوضع الامتداد.
4. التوقف النهائى (30-50%) : يبدأ كعب الطرف الداعم بالابتعاد عن الأرض حتى يلامس كعب القدم المقابلة الأرض.
5. التحضير للخطوة (50-60%) : هذا الطور ينتهي بابتعاد إصبع القدم عن الأرض. بعد أن تلمس القدم المقابلة الأرض يزداد الانثناء الأخمصي للركبة، ينتقل وزن الجسم إلى القدم المقابلة والتي تصبح الطرف الداعم.



الشكل 3: صلابة الركبة



الشكل 4: عزم الركبة خلال دورة المشي بحسب البيانات المقدمة من [7]



الشكل 5: زوايا مفصل الركبة (عزم/ زاوية)

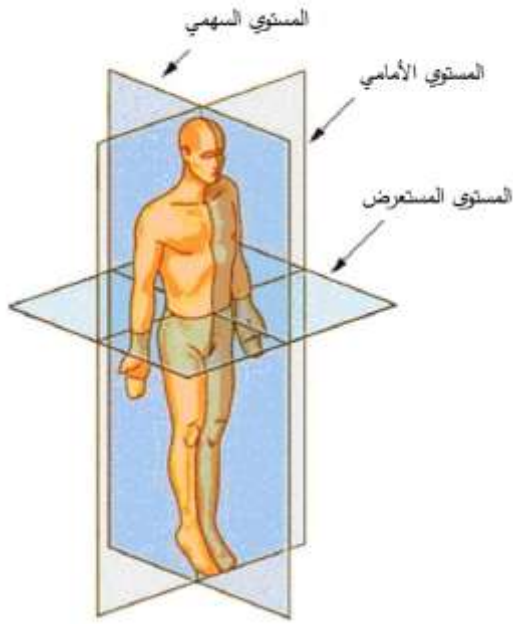
### طور التارجح:

1. التارجح الابتدائي (60-70%): يبدأ بارتفاع القدم عن الأرض، يزداد الانتشاء في الركبة ويكون الانتشاء واضحاً في هذا الطور، يكون الطرف المقابل في مركز طور الوقوف.
2. التارجح الوسطي (70-85%): تستمر الخطوة حتى المرحلة التي يكون عندها طرف التارجح أمام الجسم، تمتد الركبة كرد فعل لقوة الجاذبية.
3. نهاية الخطوة (85-100%): بعد أن تصل الركبة إلى الامتداد الكامل، يلامس الكعب الأرض مرة أخرى، وتبدأ دورة المشي التالية.

### صلابة مفصل الركبة:

تُشبه العضلة عندما تتقبض وتتنبسط بالناض، لأنها تقوم بتخزين وتفرغ الطاقة، وبما أن عمل مفصل الركبة يعتمد على العضلات والأوتار والأربطة المحيطة بها فيمكن تمثيلها خلال طور الوقوف على أنها عنصر ذو سلوك نابضي (الشكل 3). عندما يحدث انتشاء في بداية طور الوقوف يمكن تفسير الرسم البياني على أنه يوجد عنصر مرن يخزن الطاقة تحضيراً للامتداد الذي

سيحدث تالياً. خلال هذا الامتداد تستمر الركبة بالسلوك النابضي وبصلابة مشابهة لتلك التي كانت أثناء الانتشاء، كذلك يستمر هذا السلوك في المرحلة التي تسبق طور التارجح تماماً [3]. توضح الأشكال التالية القيم الطبيعية للعزم والزوايا للركبة خلال دورة المشي (الأشكال 4 و 5 على الترتيب).



الشكل 6: المستويات التشريحية في جسم الإنسان

### زوايا الدوران الرئيسية الثلاث للركبة:

- (1) زاوية امتداد/ انثناء: تقاس نسبة للمستوي السهمي.
- (2) زاوية إبعاد/ اقتراب: تقاس نسبة للمستوي الأمامي.
- (3) زاوية التدوير الداخلي/ الخارجي: تقاس نسبة للمستوي المستعرض.

يوضح الشكل 6 المستويات التشريحية لجسم الإنسان.

### الدراسات المرجعية:

تركز الطرق الحالية في تصميم الأطراف الصناعية الفعالة بشكل أساسي على استخدام نظام نقل يصل المحرك مع المفصل بشكل مباشر، تتطلب هذه التصاميم استهلاكاً عالياً من الطاقة الكهربائية لمحاكاة السلوك الميكانيكي لمفصل الركبة البشرية حتى أثناء المشي المستوي. ربما يكون أحد أسباب هذا النقص في الفعالية الطاقية هو أن مثل هذه التصاميم لا تستفيد بشكل كافٍ من الديناميكيات المنفصلة

للرجل، ومن مخزون الطاقة المرنة الموجود في العضلات البشرية، لأنه بالوضع الطبيعي للمفصل السليم تقوم العضلات عندما تتحرك بتخزين وتفريغ الطاقة، وهو ما يُشبهه بالسلوك النابضي، لذلك سيكون من المفيد إدخال النوابض في الميكانيزمات التي تتحكم بعمل المفصل. هناك العديد من المشغلات التي تدخل النوابض في مكوناتها وتختلف خواصها بحسب توضع النابض بالنسبة للمحرك، منها المشغل المتوازي المرن PEA أحد ميزاته تقليل العزم المطلوب من المحرك، والمشغل المتسلسل المرن SEA [4]، وله العديد من المزايا مثل الأمان عند الاستخدام في التطبيقات المتصلة مع البشر أو في البيئات غير المعروفة، والتحكم الدقيق باندفاع القوة والفعالية الطاقية.

قدّم الباحثان (Martinez-Villalpando, E., Herr, H.) في العام (2009) تصميم لركبة صناعية فعالة مع مشغلين مرنيين متسلسلين، لوحظ في النتائج اندفاع خرجين موجبين للطاقة عند منتصف الوقوف والوقوف المتأخر وهما مشابهين لسلوك الركبة الطبيعية، كما سمح أسلوب التحكم المستخدم المسمى بالممانعة المتغيرة بالتكيف مع الأطوار المختلفة لدورة المشي ومع السرعات المختلفة للمشي، وذلك مع المحافظة على الاستهلاك الأصغر للطاقة الكهربائية. إن أكثر ما يميز هذا النموذج هو التقليل من استهلاك الطاقة، حيث يسمح هذا المفصل بالاستخدام بحسب سلوك المفصل وما يتطلبه من طاقة، ذلك بالإضافة لكون هذا التصميم مماثل من ناحية الوزن والحجم للطرف البشري [3]. وقدّم (Au, S. K., Weber, J., & Herr, H.) في عام (2009) تصميم لطرف صناعي (كاحل وقدم) يزيد من التوفير في الكلفة الأيضية<sup>2</sup>، تم في هذا البحث تقييم الفرضية القائلة بأن الطرف الصناعي الفعال القادر على توفير عمل واستطاعة للكاحل شبيهين بمثيلهما عند الإنسان أثناء طور الوقوف، يمكن أن يقلل الاستهلاك الأيضي مقارنةً بالطرف الصناعي المنفعل المرن التقليدي. لاختبار هذه الفرضية، تم بناء طرف صناعي فعال يشتمل على نابض أحادي الاتجاه، تم وضعه بالتوازي مع مشغل يتحكم فيه عن طريق القوة له نابض موصول على التسلسل، أمّن هذا

<sup>2</sup> الكلفة الأيضية أو الاستهلاك الأيضي: هي مقدار استهلاك الإنسان للطاقة خلال القيام بنشاط ما واحدها (Jou).

الطرف استطاعة عالية وعمل صافي موجب مثل الملاحظ في المشي الطبيعي، ووجد أنه يقلل من معدل الكلفة الأيضية لدى الشخص المبتور بنسبة تساوي 14٪ في المتوسط مقارنة بالأطراف الصناعية المرنة المنفصلة التقليدية التي تم تقييمها. ولكن بالرغم من النتائج الجيدة التي وصلت لها هذا الدراسة إلا أن هذا الطرف الفعال أثقل مرتين من الطرف المنفصل التقليدي الذي تمت المقارنة معه [5].

كما ذكر سابقاً إن الميزة الأساسية في كل من الدراستين السابقتين هو التقليل من الكلفة الأيضية، وتم الوصول لذلك بفضل إدخال نوابض في الميكانيزم المتحكم بالمفصل إضافة لأساليب التحكم المستخدمة (التحكم بالممانعة والتحكم بالقوة)، ولكن هاتين الدراستين لا توفران إلا حركة دوران واحدة لمفصل الركبة (المستوي السهمي)، أي أنهما غير مطابقتين بشكل كامل للمفصل الطبيعي. قام (Masum, H., Bhaumik, S., & Ray, R.) في (2014) بتصميم كاحل يؤمن حركتي دوران (المستوي السهمي والأمامي)، يتكون هذا الطرف من مفصل كروي يؤدي حركة الدوران في المستوي السهمي عن طريق ميكانيزم مكون من مسننات ونابض فتل ومحرك، وحركة الدوران في المستوي الأمامي عن طريق نظام مخمد ونابض [6]، ومع أن هذا التصميم يحاكي حركتي دورانيتين دورانيتين من حركات مفصل الكاحل ومع أنه يستخدم النوابض إلا أنه لا يحاكي المرونة الطبيعية الموجودة في الكاحل البشري بشكل كافي، إذ أن استخدامه للمسننات له العديد من المساوئ منها أنها تسبب الاحتكاك والارتداد لخرج المحرك، كل ذلك يمكن أن يؤدي المفصل نفسه أو البيئة المحيطة.

## أهمية البحث وأهدافه:

### أهمية البحث:

تلعب الأطراف السفلية للإنسان دوراً حيوياً هاماً، فهي تساهم في إبقاء الجسم متوازناً أثناء المشي وتؤمن له الدعم أثناء الوقوف. حالياً تركز الدراسات في مجال الركب الصناعية على محاكاة عمل المفصل الطبيعي ضمن مجال واحد للدوران (امتداد/ انثناء) بينما تقوم الركبة البشرية بثلاث حركات دوران، اثنين من هذه الحركات (امتداد/ انثناء و إبعاد/ تقريب) ضروري جداً من أجل أن يعمل المفصل الصناعي عمل الطبيعي، أي من أجل المشي المستوي والتكيف مع الأراضي غير المستوية.

### هدف البحث:

يهدف هذا البحث لإيجاد التصميم الأمثل لمفصل ركبة صناعية بحيث يحقق المعايير الأربعة التالية:

1. التكيف مع التضاريس: يتحقق هذا المعيار عن طريق استخدام مفصل يؤمن حركتي دوران.
2. المتانة: يتحقق هذا المعيار عند الوصول للتصميم الأمثل من ناحية الشكل الهندسي والمواد المستخدمة.
3. الوزن والحجم المناسبين: يتحكم بهذا المعيار المواد المستخدمة والشكل الهندسي للتصميم ويتحقق عند الوصول لوزن وحجم مشابهين لمثليهما البشريين.
4. استقرار وتوازن دورة المشي: يتحقق هذا المعيار بحال تطابقت البيانات الحركية والتحريرية للتصميم مع مثيلتها للركبة الطبيعية.

### التصميم الميكانيكي:

بعد دراسة كل من بيوميكانيك الركبة البشرية ودورة المشي السليمتين، نستطيع أن نحدد المواصفات الأساسية التي سنعتمدها في التصميم، وقد وضعت على أساس الأبعاد لشخص ذكر سوري له طول ووزن متوسط (طول 170cm ووزن 80Kg) [12]، سنفترض أن هذا الشخص يمشي بسرعة طبيعية<sup>3</sup> حيث أن بيانات دورة المشي الحركية والتحريرية (زوايا، عزوم، رد فعل الأرض وغيرها) تختلف بحال كانت السرعة بطيئة أو سريعة، بالاعتماد على الوزن والطول المفترضين يكون وزن وحجم الطرف الصناعي كما في الجدول (1) [7] أما مجال الزوايا والعزوم للمفصل الصناعي فتكون كما في الجدول (2).

جدول 1: الحد الأقصى لطول ووزن المفصل الصناعي

| الحد الأقصى | طول الطرف | الوزن  |
|-------------|-----------|--------|
|             | 35cm      | 3.72Kg |

جدول 2: مجال الزوايا والعزوم للمفصل الصناعي

| الامتداد/ انثناء | الزوايا                      | العزوم                  |
|------------------|------------------------------|-------------------------|
|                  | [0°, 64.86°] <sup>[10]</sup> | 49.2 N.m <sup>[7]</sup> |
| ابعد/ اقتراب     | [-3°, +6°] <sup>[8]</sup>    | 20 N.m <sup>[12]</sup>  |

### التصميم المقترح:

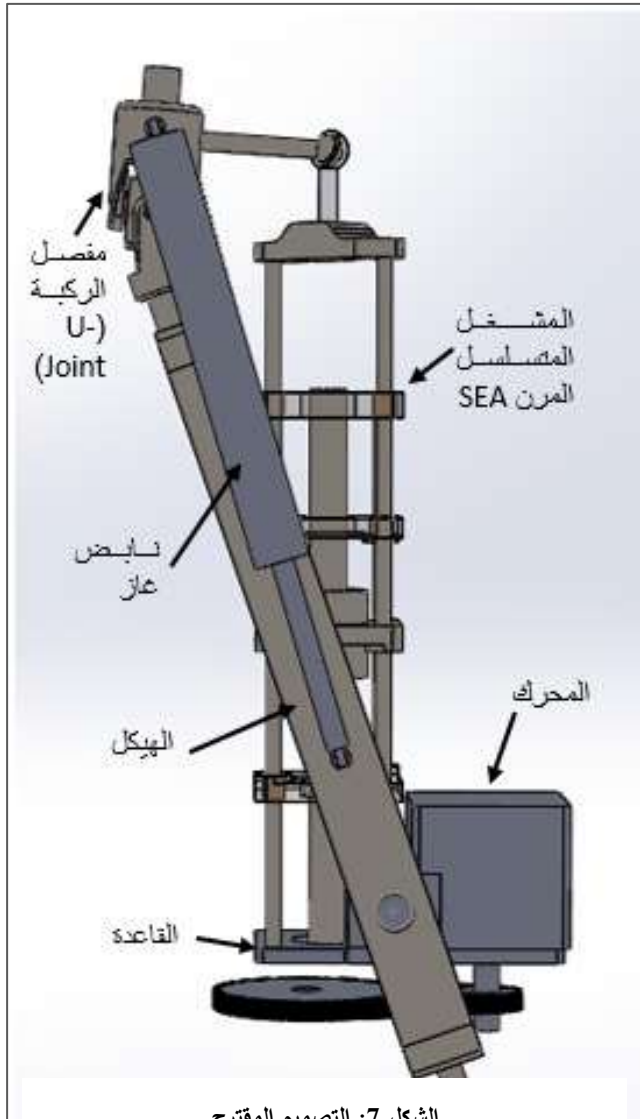
بعد الاطلاع على عدد من التصميمات السابقة، وُضع تصميم جديد من نوعه لركبة صناعية تؤمن حركتي دوران وهما انثناء/امتداد الضرورية لتنفيذ دورة المشي الطبيعية، وحركة الإبعاد/ اقتراب من أجل التكيف مع الأراضي غير المستوية. اعتمد التصميم على المواصفات السابقة. ويتألف من مشغل متسلسل مرن يتوضع خلف مفصل الركبة، هذا المشغل يؤمن حركة الامتداد/ انثناء. بالإضافة لنابضي غاز (مكبسن هوائيين) يؤمنان حركة الإبعاد/ اقتراب يستجيبان لخسونة الأرض بحال المشي على أرض غير مستوية ويتوضع هذان المكبسان على طرفي الركبة (الشكل 7).

### المفصل المستخدم:

يجب على المفصل المستخدم أن يؤمن حركتي دوران حول محورين متعامدين، من أجل ذلك سنستخدم مفصل من نوع U-Joint.

<sup>3</sup> السرعة الطبيعية (خطوة/دقيقة): وهي سرعة المشي الاعتيادية للشخص (أي أن هذه القيمة تتغير بحسب الأشخاص)، اعتمدنا في هذا البحث السرعة 100 خطوة/دقيقة.





الشكل 7: التصميم المقترح

### ميكانيزم حركة الامتداد/ انثناء:

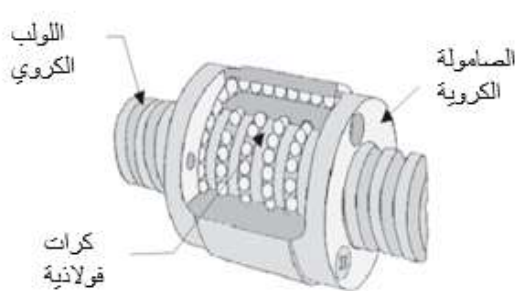
#### المشغل:

يتألف المشغل المتسلسل المرن من محرك وعنصر مرن، متصلان ببعض عن طريق ميكانيزم نقل حركة، وتكون حركته منفصلة عن حركة الإبعاد / اقتراب.

#### مواصفات المشغل المتسلسل المرن:

#### آلية النقل:

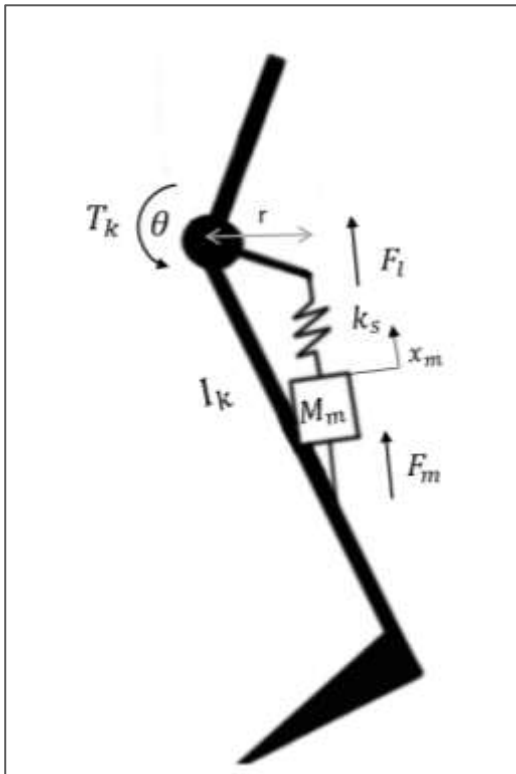
تتألف آلية النقل من ميكانيزم بكرات يتصل من خلال سير مع لولب كروي. خلال أول مرحلة من النقل يقود المحرك ميكانيزم بكرة - سير بشكل مباشر، هذا الميكانيزم له نسبة نقل مساوية لـ 1;4، في المرحلة الثانية، يقوم ميكانيزم بكرة التوقيت-سير بتدوير اللولب الكروي (الشكل 8) وهو من نوع Power Trac (8×2mm) وتم اختياره اعتماداً على الجداول في المرجع [13] وذلك باستخدام بيانات الحمل المتوقع والعمر الأعظمي والشوط. عندما يدور اللولب الكروي تحدث إزاحة خطية للصامولة الكروية الموصولة وما يحيط بها من دعامة. هذه الصامولة الكروية والدعامة الموجودة حولها تتصل مباشرة مع النابض التسلسلي المرن فتسبب بانضغاطه ومن ثم حركة العربة المتصلة معه.



الشكل 8: مكونات اللولب الكروي

#### المحرك:

من الشكل (9) يكون عزم الركبة:  $T_k = I_k \ddot{\theta} + rF_l$



الشكل 9: العزم الخارجي الكلي للركبة

حيث:  $T_k$  العزم الخارجي الكلي ،  $I_k$  عزم عطالة القدم تحت المفصل،  $\theta$  التسارع الزاوي للركبة،  $r$  ذراع القوة المؤثرة،  $F_i$  قوة الحمل المؤثرة، باعتبار أن المحرك يتصل مباشرة مع مفصل الركبة، أي باعتبار أن النابض وصلة صلبة، يمكن الحصول على قيمة القوة التي يجب أن يطبقها المحرك على المفصل أي نعتبر أن  $F_i = F$ ، لدينا جداول خاصة بعزوم الركبة الطبيعية خلال دورة المشي [7]، وبحساب التسارع الزاوي خلال هذه الدورة بالاعتماد على البيانات المكانية والزمانية للركبة [7] (الزوايا والتوقيت لدورة المشي مع افتراض أن زمن الدورة يساوي 1.2sec)، ولحساب عزم العطالة للرجل السفلية، استخدم برنامج SolidWorks وتم تمثيل المشغل على أنه كتلة اسطوانية بقطر يساوي 40mm وارتفاع 150mm وهي الأبعاد التقديرية للمشغل مصنوعة من مادة الحديد المقاوم للصدأ (Stainless Steel) و يبلغ وزنها حوالي 1.5 Kg (شكل 10)، تتصل هذه الكتلة بالساق التي مثلناها بأنبوب PVC مفرغ بقطر داخلي 21mm و قطر خارجي 25mm وارتفاع 220mm ويتصل هذا الأنبوب مع قدم من نوع

1C30 Trias OttoBock حيث تم رسمها على البرنامج واستخدمت فيها مادة stainless steel، بلغ عزم العطالة حول محور الدوران

$142177.78 \text{Kg.mm}^2$ ، والقيمة  $r$  تساوي 25.4mm

و بتطبيق المعادلة السابقة نحصل على قيم  $F$  خلال كامل فترة دورة المشي.

وبما أن علاقة عزم المحرك مع القوة الخطية الناتجة عنه:  $F_m = T_m R$ ، حيث أن نسبة النقل:  $R =$

$\frac{N2\pi\eta}{l}$ ، فيكون العزم المطلوب من المحرك:

$$T_m = \frac{Fl}{N2\pi\eta}$$

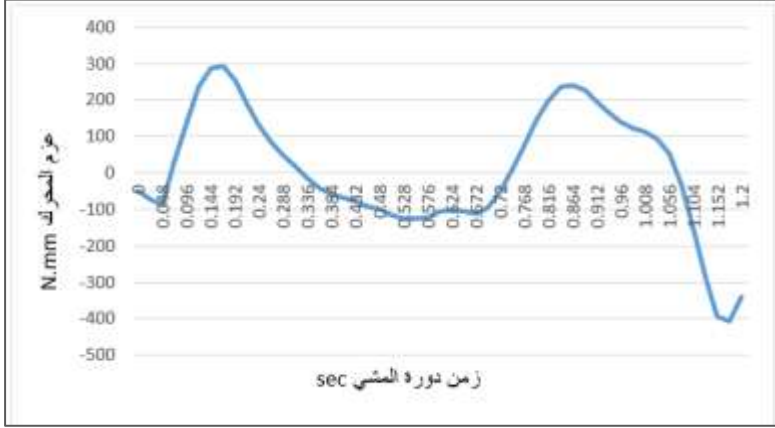
حيث  $T$  هو عزم دوران المحرك،  $F$  هي القوة المحسوبة



الشكل 10: تمثيل المشغل بشكل كتلة اسطوانية

سابقاً،  $l$  هو دليل اللولب الكروي ويساوي 2mm،  $N$

نسبة نقل البكرات وتساوي 1:4، و  $\eta$  هي كفاءة ميكانيك اللولب الكروي نعتبرها 1. بتطبيق هذه المعادلة على القيم التي حصلنا عليها للقوة  $F$  نحصل على قيم العزم المطلوب من المحرك خلال فترة دورة المشي (الشكل 11).



الشكل 11: العزم المطلوب من المحرك خلال دورة المشي

بناء على ذلك تكون قيمة العزم الأعظمي

المطلوب من المحرك:  $T =$

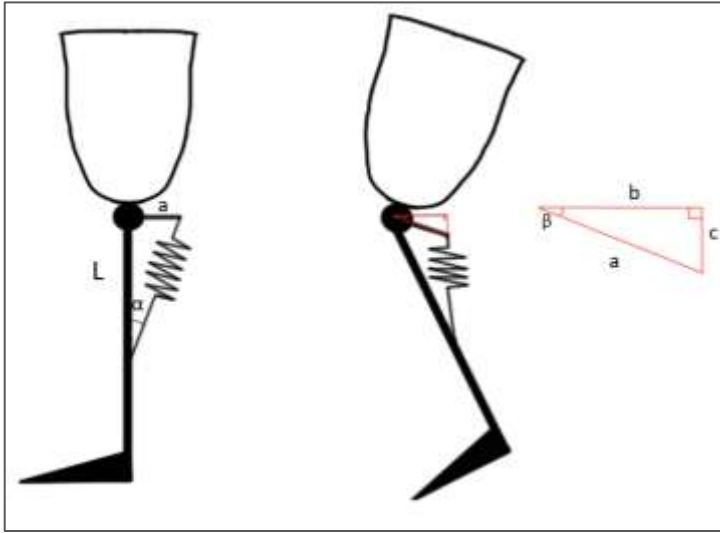
$$400 \text{ N.mm}$$

أي أنه يلزمنا محرك يستطيع أن يؤمن العزم السابق على الأقل، ويجب مراعاة عدة عوامل أخرى منها الدقة في التحكم والوزن. تم اختيار محرك خطوي من نوع NEMA 17 يمكن أن يوفر عزم دوران مرتفع مقداره

520 N.mm، له زاوية خطوة تساوي 1.8 درجة أي أنه يتمتع بالدقة، وهو خفيف الوزن 0.356Kg.

### النوابض:

تم اختيار النوابض لتكون مناسبة لشخص ذو وزن متوسط قدره 80 كغ. طول ذراع العزم مقاسة من المشغل لمفصل الركبة 25.4 mm. باستخدام زوايا الدوران العظمي التي تتعرض لها الرجل (زوايا الركبة والورك) خلال دورة المشي بسرعات طبيعية [7] تم تقدير الانضغاط الأعظمي لمثل تلك النوابض. هذا ما سمح بتحديد الطول الأصغري للنوابض من أجل اختيار نابض يمكنه المحافظة على معدل عمل مثالي. من الشكل 12 نلاحظ أن البعد  $c$  والذي يمثل الانضغاط الأعظمي للنابض يتعلق بكل من الزاوية  $\beta$  المساوية



الشكل 12: اختيار النوابض

لزاوية دوران الورك والبعد  $a$ ، وبما أن قيمة  $a$  ثابتة فيكون الانضغاط الأعظمي للنابض يتعلق فقط بزاوية دوران الورك، ويكون أعظما عندما تكون هذه الزاوية أعظمية. تبلغ القيمة الأعظمية لزاوية دوران الورك عند المشي بسرعة طبيعية 21.87 درجة [7].

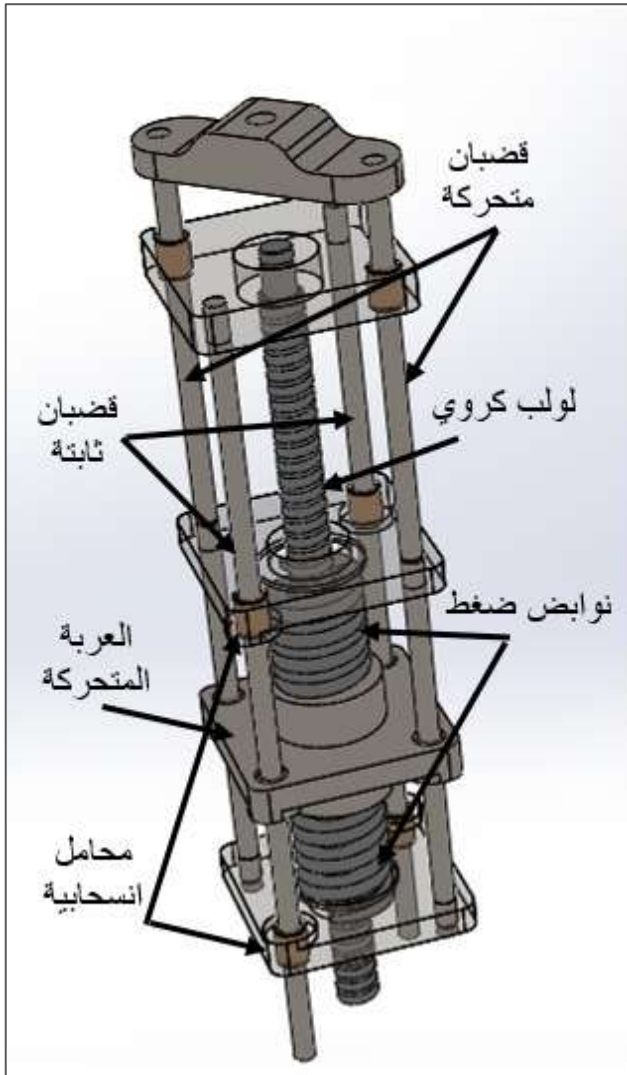
$$c = \sin(21.87) \times 25.4 = 9.46 \text{ mm}$$

وهي القيمة الأعظمية لانضغاط النابض، وبشكل عام فإن النابض لا يمكنه أن ينضغط لأكثر من 40% من الطول الحر الأصلي، أي أن طول النابض كاملا يجب أن يكون 23.7 mm.

أما بالنسبة لصلابة النابض تم حسابها على أساس العزم الأعظمي للركبة، وبحسب علاقة صلابة الركبة المساوية

$$Z = \frac{T_k}{\theta}$$

للعزم على الزاوية



الشكل 13: مكونات المشغل المتسلسل المرن

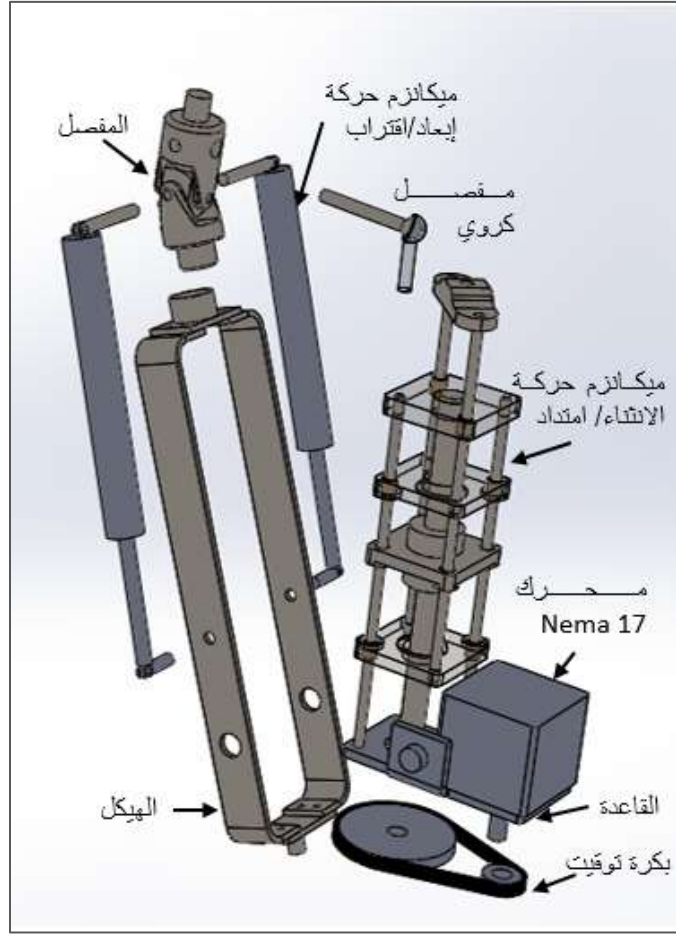
بتعويض العزم الأعظمي للركبة ويساوي  $49.2 \text{ N.m}$  [7] وتكون الزاوية عند هذا العزم الأعظمي  $0.378 \text{ rad}$ . بذلك تكون قيمة صلابة الركبة  $130.15 \text{ N.m/rad}$  وهي الصلابة الأعظمية للركبة. بناء على ما سبق يجب اختيار نابض بطول  $23.7 \text{ mm}$  تقريباً، وله صلابة تساوي تقريباً  $130.15 \text{ N.m/rad}$  تم اختيار النابض Century Spring (D-1328) له طول يساوي  $25.4 \text{ mm}$  وصلابة  $189 \text{ KN/m}$  أو  $126 \text{ Nm/rad}$ . ميكانزم حركة إبعاد/ اقتراب:

اعتماداً على البيانات الواردة في [12] حيث طبق على المفصل عزم مقداره  $20 \text{ N.m}$  وذلك من أجل توليد حركة التقريب والتباعد، بالأخذ بعين الاعتبار هذه القيمة وبافتراض ذراع عزم بقيمة  $50 \text{ mm}$  تكون القيمة التي يجب أن يتحملها العنصر الذي سيتحكم بهذه الحركة  $400 \text{ N}$ .

بما أن الغرض من حركة التقريب والتباعد هو التكيف مع الأراضي غير المستوية، أي أنها حركة منفصلة لذلك سيكون الميكانزم المتحكم بهذه الحركة منفعل أيضاً،

بعد الاطلاع على عدد من الحلول وُجد أنه من المناسب استخدام ما يسمى بنابض الغاز Gas

Spring أو المكبس الهوائي (الشكل 7). الغالبية العظمى من نوابض الغاز المتوفرة هي من نوع نوابض الضغط (الدفع)، مما يعني أنها تكون بحالة الامتداد في وضع الراحة، ويتم دفع القضيب إلى الأسطوانة أثناء تطبيق الضغط. بعد الاطلاع على عدة نشرات من شركات مصنعة لهذه الاسطوانات تم اختيار نابض الغاز من شركة ROC-9057 وهو نابض قياسي يستخدم للأغراض العامة يتمتع بأبعاد ملائمة لأبعاد المفصل المستخدم والمشغل المتسلسل المرن، حيث بلغ الطول الممتد حوالي  $197 \text{ mm}$ ، بسرعة امتداد تبلغ  $0.3 \text{ m/sec}$  ووزن  $0.077 \text{ kg}$ . يوضح الشكل 14 مكونات الركبة الصناعية:



الشكل 14: مكونات الركلة الصناعية

#### الدراسة الإنشائية:

تهدف الدراسة الإنشائية إلى التأكد من متانة النظام تحت تأثير القوى المؤثرة، وحساب الإجهادات والانتقالات التي يتعرض لها لضمان عدم انهياره وتحقيقه للوظائف المطلوبة بشكل سليم، ويتعرض المفصل لنوعين من الأحمال: ستاتيكي وديناميكي. استبعدت في هذه الدراسة الأجزاء الجاهزة مثل المفصل U-joint و اللولب الكروي لأنه تم اختيارها منذ البداية على أساس أنها تتحمل القوى التي تتعرض لها وذلك بحسب بيانات الشركات المصنعة. أُجريت الدراسة باستخدام برنامج SolidWorks 2018 وطبقت على مجموعتين وهما: مجموعة هيكل الركلة، ومجموعة هيكل المشغل، تم تعريف الروابط بين قطع المجموعة الواحدة وتطبيق الأحمال بعدة حالات.

#### الدراسة الستاتيكية:

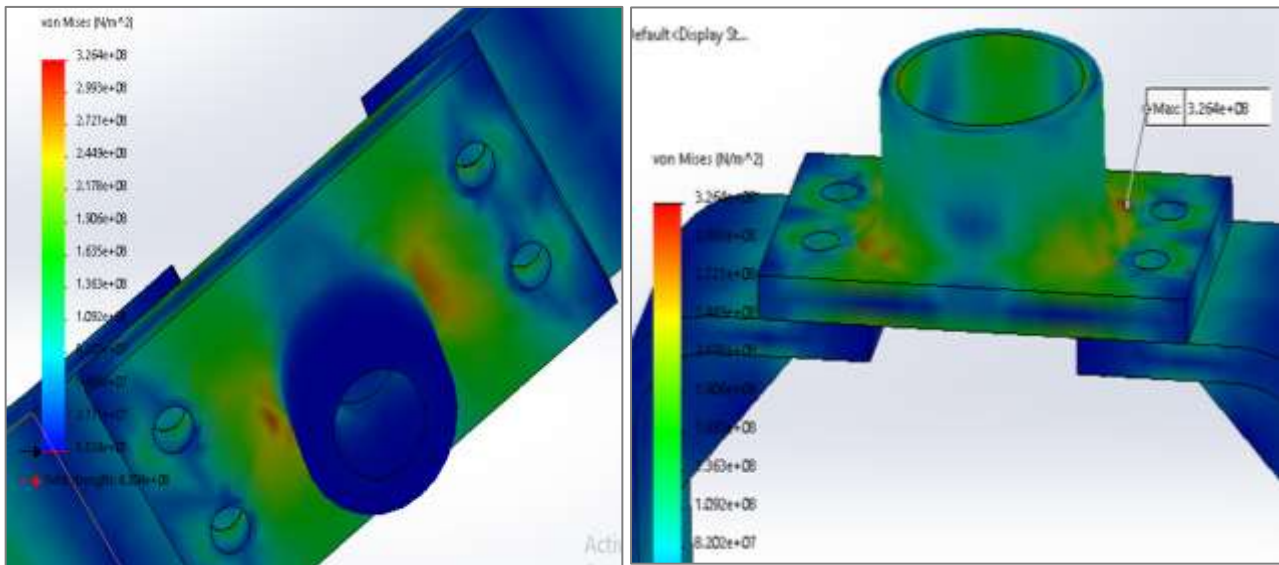
أجريت الدراسة على أجزاء التصميم التي تتعرض لأحمال ستاتيكية كبيرة، وبافتراض حالات منظرية بغاية التأكد من متانة التصميم، مثال عن هذه الحالات:

- تطبيق كامل وزن الجسم على الركلة الصناعية.
- افتراض أن الشخص يحمل وزن إضافي.
- عمل المحرك بالعزم الأعظمي مع تثبيت نهاية المشغل.



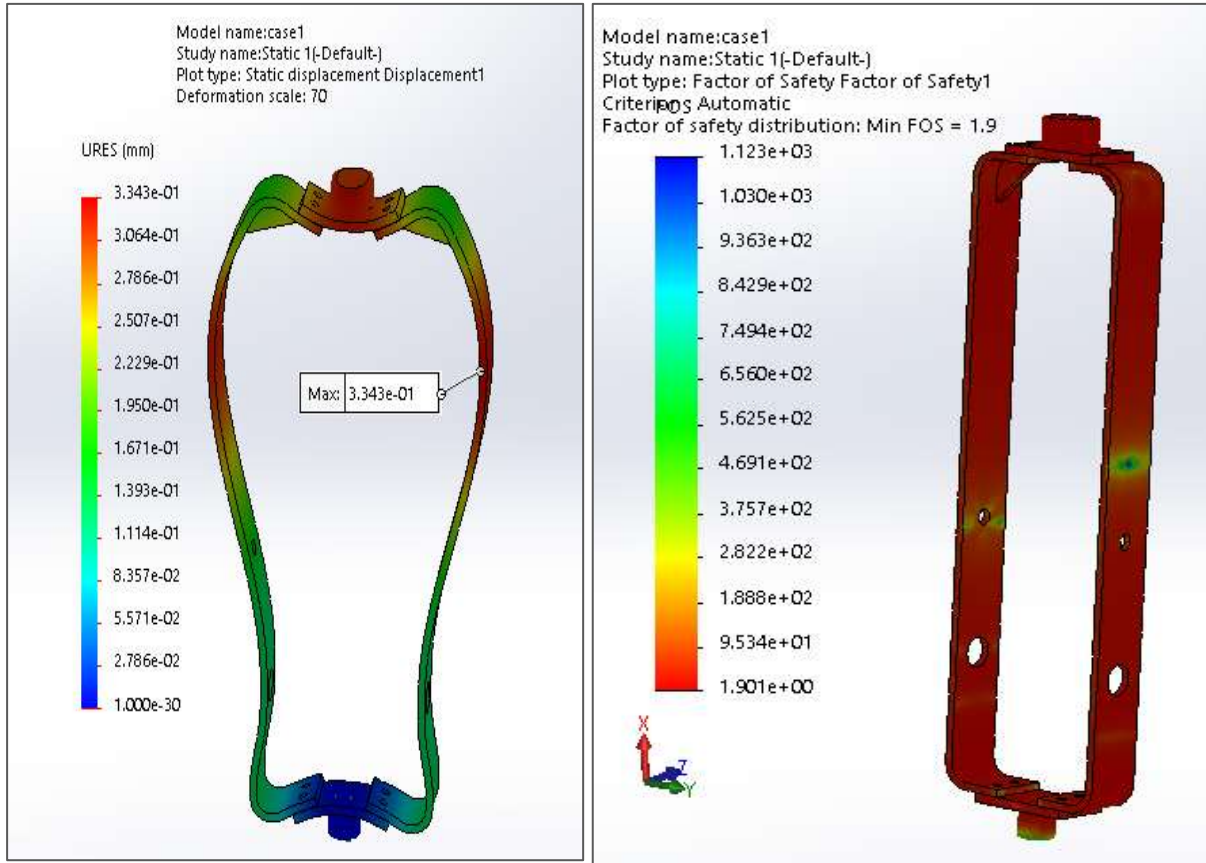
## المجموعة الأولى (هيكل الركبة):

تمت الدراسة بعدة حالات وبافتراض أحمال متطرفة فيما يلي نعرض الحالة ذات نتائج الإجهادات الأعظمية: افتراضنا أن الشخص يقف على أرض مستوية ويؤثر بكامل وزنه 80Kg على القدم الصناعية ومن أجل اعتبارات الأمان افتراضنا أن الشخص يحمل وزناً إضافياً مقداره 20Kg، أي طبقنا قوة مقدارها 1000N على الهيكل وهو من مادة Alloy Steel، وافترضنا أن رد فعل الأرض الشاقولي أعظمي ومقداره 1100N [7]، وفي هذه الحالة كان المفصل بحالة الامتداد الكامل أي أن زاوية الامتداد/ انثناء تساوي الصفر وبما أن الأرض مستوية تكون زاوية إبعاد/ اقتراب مساوية للصفر أيضاً، تم إضافة قوة على هذا الهيكل مقدارها 20N وهو الوزن التقديري للمشغل مع المحرك والبطارية، تؤثر هذه القوة في مركز ثقل هذه المكونات وبالوضع الذي يكون فيه المفصل بالامتداد الكامل. بينت نتائج هذه الدراسة أن الإجهادات الأعظمية تركزت بالجهة العلوية من الهيكل بالقرب من مكان اتصاله مع المفصل u-joint (الشكل 16) وبالجهة السفلية منه بالقرب من مكان تثبيته (اتصاله مع الأرض) (الشكل 15)، كما كانت الإجهادات مرتفعة عند منطقة براغي التثبيت، وكانت قيمة الإجهاد الأعظمي  $3.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  وهو تحت حد الخضوع الخاص بالمادة المستعملة، وكانت قيم معامل الأمان جيدة، وبلغت القيمة الصغرى له 1.9 (الشكل 17)، أما الانتقالات فكانت قيمها صغيرة، يوضح الشكل 18 القيمة لعظمي لها باستخدام مقياس تشوه 70.



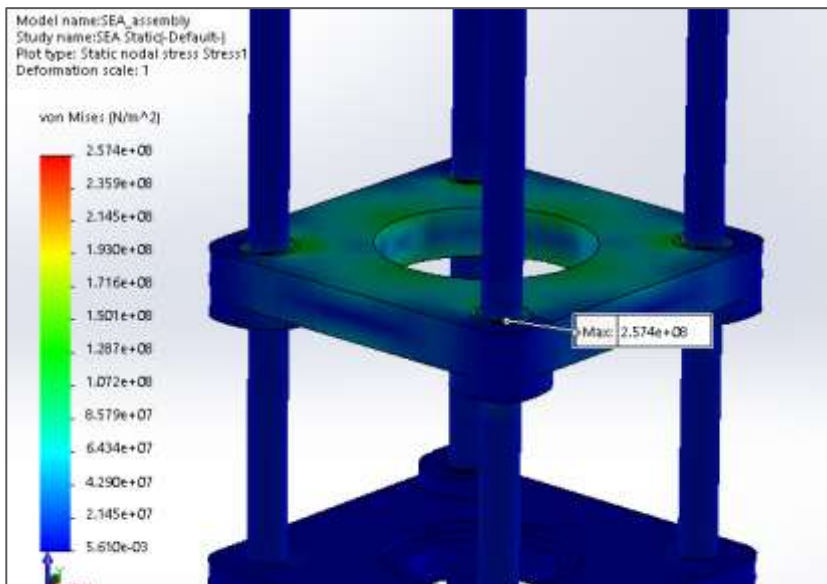
الشكل 15: الإجهاد الأعظمي في المنطقة السفلى لهيكل الركبة

الشكل 16: الإجهاد الأعظمي في المنطقة العليا لهيكل الركبة:



الشكل 18: الانتقالات في هيكل الركبة

الشكل 17: معامل الأمان لهيكل الركبة

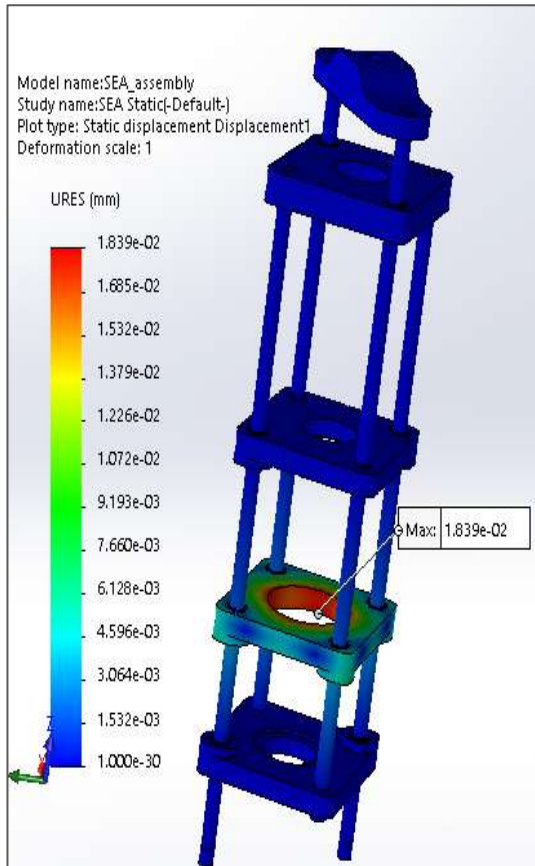


الشكل 19: الإجهادات الأعظمية لهيكل المشغل

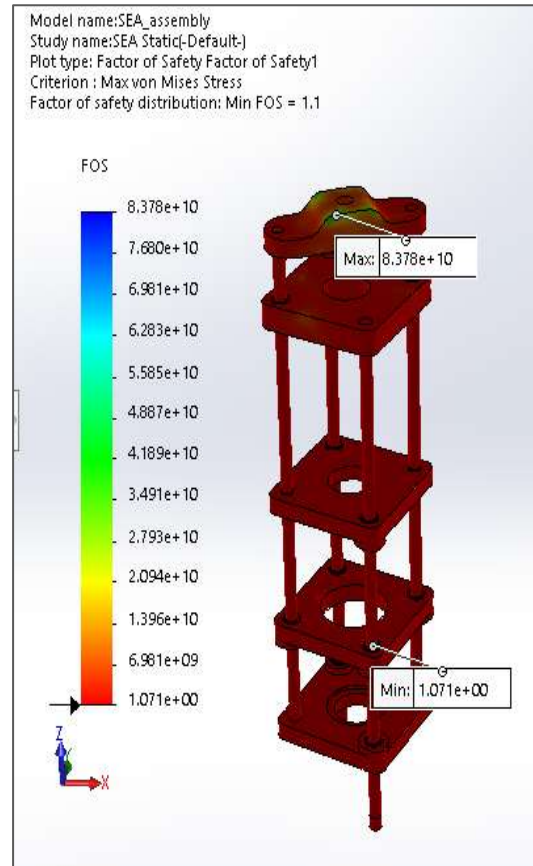
### المجموعة الثانية ( هيكل المشغل):

تمت الدراسة بحالة عمل المشغل بالعزم الأعظمي وتطبيقه للقوة الأعظمية ومقدارها 5000N- (بالاتجاه السفلي) مع افتراض أن النهاية العليا للهيكل مثبتة وذلك للتأكد من متانته في الظروف الغير اعتيادية (خرج المشغل مثبت بسبب وجود عائق يمنع تحركه)، كما أضيفت قوة مقدارها 1000N على افتراض أن الشخص يؤثر بكامل وزنه بالإضافة لحمله وزناً إضافياً كما في الحالة الأولى من الدراسة الستاتيكية لهيكل

الركبة. وبينت النتائج أن الإجهاد الأعظمي كان مساوياً لـ  $2.6 \times 10^8 \text{N/m}^2$  وتركزت الإجهادات الأعظمية في العربة وتحديدًا عند منطقة اتصالها بالفضبان أي عند أماكن المحامل الانزلاقية (كما موضح في الشكل 19) ، وكانت قيمة معامل الأمان عند نفس المكان أصغرية ومقدارها 1.1 تقريباً (الشكل 20)، أما الانتقالات فكانت أعظمية عند مكان تطبيق قوة المحرك لكنها ذات قيم مهملة ( $18\mu\text{m}$ ) (الشكل 21).



الشكل 21: الانتقالات في هيكل المشغل



الشكل 20: معامل الأمان لهيكل المشغل

#### دراسة التعب (حالة الأحمال الديناميكية المتغيرة):

تؤدي الأحمال المتكررة لنتائج خطيرة، إذ من الممكن أن تتحمل المادة حملاً معيناً في الحالة الستاتيكية بينما تنهار تحت تأثير نفس الحمل إذا كان تكرارياً. وبسبب أن الركبة تتأثر بمجموعة من الأحمال المتكررة فإنه لابد من إجراء دراسة التعب، أجريبت الدراسة على المجموعتين السابقتين وباستخدام نتائج الدراسة الستاتيكية الخاصة بكل مجموعة، وتم تعريف المتطلبات الخاصة بدراسة التعب وهي نوع الحمل، وعدد دورات التحميل، ومجال الإجهاد  $\Delta\sigma$  ، بالنسبة لنوع الحمل فهو Axial محوري في كلا الحالتين، وبالنسبة لعدد دورات التحميل فهو  $10^6$  دورة في كلا الحالتين، وهذا



العدد يؤهل الركبة الصناعية للمشي لمدة عامين تقريباً باعتبار أن القيمة المتوسطة لعدد خطوات الإنسان خلال اليوم هي 3000 خطوة مفردة<sup>4</sup>، أما بالنسبة لمجال الإجهاد فيختلف بين الحالتين.

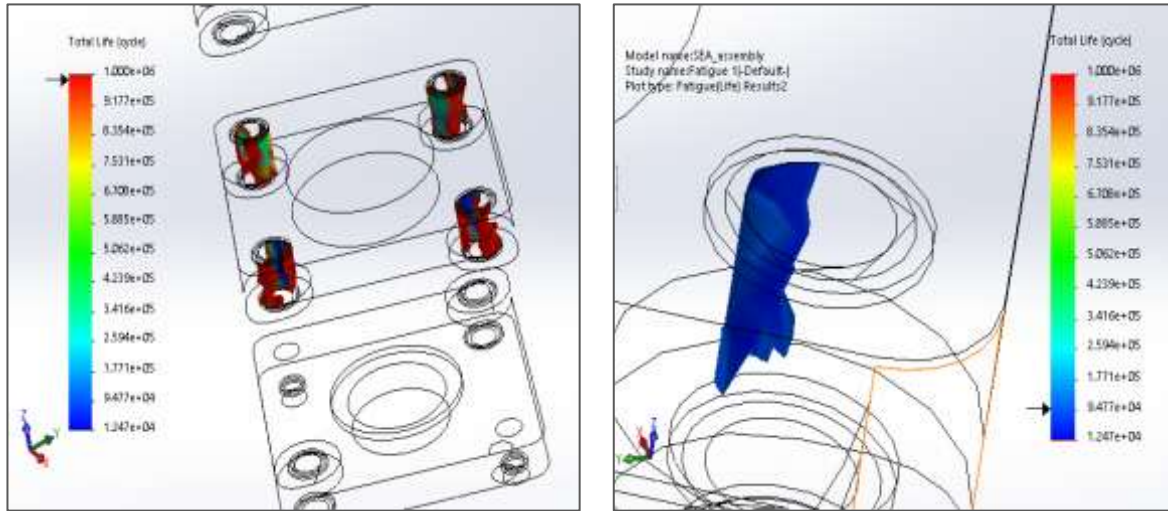
#### المجموعة الأولى (هيكل الركبة):

يتعرض هيكل الركبة لأحمال متكررة خلال دورة المشي وهي وزن الجسم ورد فعل الأرض، وتتغير قيمة رد فعل الأرض والتي تتجه للأعلى بين الصفر والقيمة الأعظمية (+1100N)، أما وزن الجسم الذي يتجه للأسفل فتتغير قيمته بين الصفر والقيمة الأعظمية له (-1000N)، تم تطبيق هاتين القوتين على شكل حدثين منفصلين (Events) بنفس الدراسة، واستخدم مجال الإجهاد من النوع  $R = 0$  Zero-based Load، وهو المجال الذي تتغير قيمة الحمل فيه بين الصفر والقيمة الأعظمية المحددة، بينت نتائج هذه الدراسة أن جميع الإجهادات المتكررة كانت تحت منحنى الإجهاد - عدد الدورات S-N، وذلك يعني أن هيكل الركبة يتحمل الحمولات المطبقة ولا يتعرض أي جزء منه للضرر عند عدد مرات التحميل المفترضة.

#### المجموعة الثانية (هيكل المشغل):

اعتمدت هذه الدراسة على الدراسة الستاتيكية لهيكل المشغل والتي طبقت بها القوة 5000N - (أي بالاتجاه السفلي) واستخدم خيار معامل التحميل Loading Ratio وهو الحالة التي تكون الحمولة عندها ليست معكوسة بشكل كامل Fully-Reversed,  $R = -1$  وليست ذات أساس يساوي الصفر  $R = 0$  Zero-based Load، وبما أن هذه الدراسة اعتمدت على الدراسة الستاتيكية التي طبقت فيها الحمولة 5000N - تم تحديد قيمة معامل الحمل  $-0.6$  وبذلك أصبح الحمل الدوري بشكل موجة جيبية بين القيمتين 5000N - و 3000N +، وهي القوة الأعظمية والأصغرية الناتجة عن المحرك كما وتم إزالة التثبيت عن خرج المشغل. بينت نتائج الدراسة أن التعب يبدأ على السطح الداخلي للمحامل الانزلاقية Bushing للعبية وذلك عند عدد دورات  $10^5$  دورة أي بعد أقل من ثلاثة شهور من الاستخدام، وتتعرض للتلف التام بنهاية العاميين (الشكل 23 و الشكل 22)، لذلك ينصح بعمل صيانة دورية لهذا الجزء كل شهرين وتزييت المحامل أو تبديلها عند اللزوم.

<sup>4</sup> كما ذكرنا سابقاً تبدأ دورة المشي بالاتصال الأولي بين الكعب والأرض لإحدى الأرجل وتنتهي بالتماس التالي بين الكعب والأرض لنفس الرجل، وبنفس الوقت تكون الرجل الأخرى تقوم بخطوة أيضاً مع وجود فارق زمني بين طوري المشي للرجلين، لذلك يقوم الإنسان بخطوتين مفردتين خلال دورة المشي.

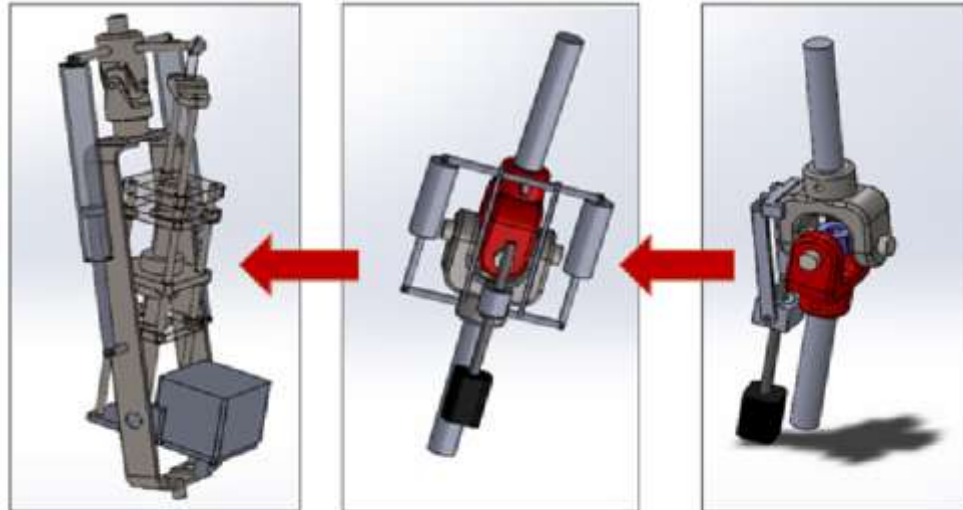


الشكل 23: التلف التام للمحامل بنهاية عدد دورات التشغيل المفترضة (عامين من التشغيل)

الشكل 22: التعب على السطح الداخلي للمحامل بعد فترة 3 شهور من الاستخدام

### النتائج والمناقشة:

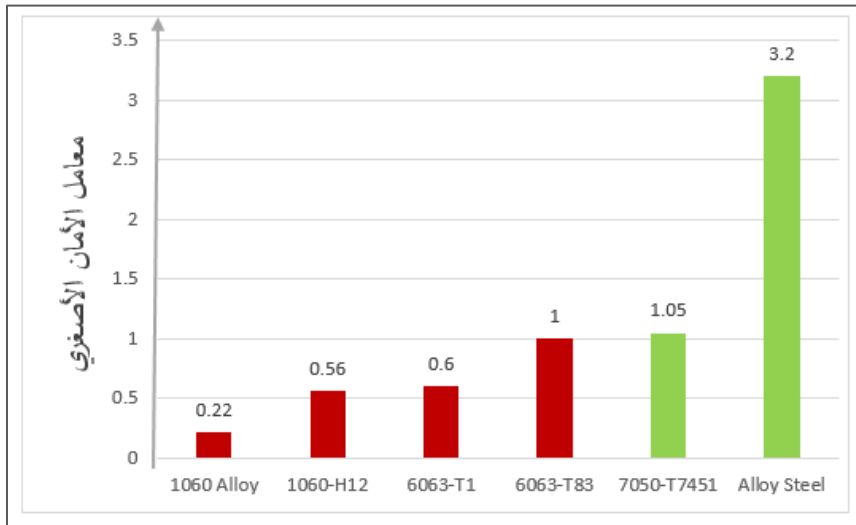
بينت نتائج الدراسة السنتاتيكية أن قيم الإجهادات الأعظمية كانت ضمن الحدود المسموح بها (تحت حد الخضوع) وتركزت هذه الإجهادات في المناطق التي يوجد فيها نوع من أنواع التثبيت (برغي أو محمل انزلاقي أو وصلة ثابتة) وكانت جميع قيم معامل الأمان جيدة (أكبر من الواحد)، أما الانتقالات الأعظمية فتركزت في أماكن تطبيق القوى ومع ذلك كانت قيمها صغيرة جداً (مهملة).



الشكل 24: مراحل التصميم

يعتبر التصميم الأمثل أحد مخرجات الدراسة الإنشائية، حيث يطرأ على التصميم المقترح عدة تغيرات من ناحية الشكل والأبعاد والمواد وذلك بناء على نتائج هذه الدراسة (الشكل 24). على سبيل المثال عند إجراء دراسة التعب على هيكل

الركبة لأول مرة كانت نسبة الضرر في الزاويتين العلويتين للهيكل مرتفعة، لذلك تمت إضافة أعصاب لهذه الأماكن، وبعدها أُعيدت كافة الدراسات للتأكد من متانة التصميم بعد إضافة الأعصاب.

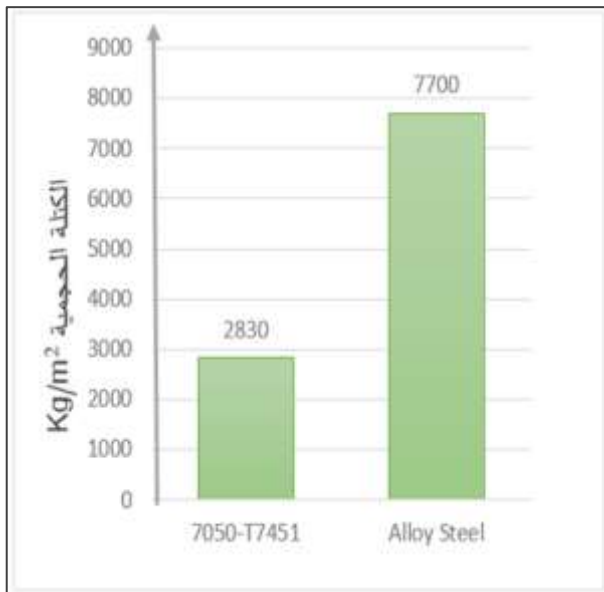


كما وتم تجريب عدة مواد على قطع التصميم واختلفت قيم معامل الأمان عند إجراء الدراسة الستاتيكية على هيكل المشغل كما في الشكل (الشكل 25)، حيث نلاحظ أن المواد (Alloy Steel و 7050-T7451) لها معاملات أمان جيدة (أكبر من الواحد) لذلك فإنها مقبولة لأنها تؤمن

الشكل 25: اختلاف معاملات الأمان لهيكل المشغل باختلاف المواد المستخدمة

للتصميم المتانة اللازمة، والأفضل من بينها بالنسبة لقيمة لمعامل

الأمان هو الـ Alloy Steel كما أن سعره هو الأرخص، ولكن من جانب آخر عند مقارنته مع الـ 7050-T7451 من ناحية الكتلة الحجمية (الشكل 26) نلاحظ أن كتلته الحجمية هي الأكبر وبذلك فهو لا يمثل الخيار الأفضل من ناحية الوزن، إذ سيتضاعف وزن الهيكل ما يقارب الثلاث مرات عند استخدامه مقارنة مع المادة الأخرى، وبسبب أهمية تحقيق المعيار الثالث للتصميم وهو معيار الوزن تم اختيار الـ 7050-T7451 لجميع قطع هيكل المشغل (معدا العربة) لأنها تتمتع بمعامل أمان كافي بالإضافة للوزن الخفيف، وتم اختيار مادة Alloy Steel للعربة لأنها تتعرض لإجهادات أعلى من بقية أجزاء التصميم، كنتيجة نهائية كان معامل الأمان لهيكل المشغل 1.1 وهي قيمة مقبولة.



بالنسبة لدراسة التعب لهيكل المشغل والتي بينت ظهور اهتراء على السطح الداخلي للمحامل بعد أقل من ثلاثة شهور من الاستخدام، على الأرجح أن النتائج ظهرت بهذا الشكل لأن المحاكاة التي أجريت لم تأخذ بعين الاعتبار كامل البيانات الخاصة بالمحامل (مثل التسامحات بين المحمل والقضيب ومعامل الاحتكاك). من الضروري عمل دراسة خاصة بالمحامل بحيث يتم اعتبار كامل التفاصيل المتعلقة به، ومن الممكن أن تؤدي هذه الدراسة لتغيير نوع المحمل أو إيجاد حل لمشكلة اهتراء السطح الداخلي مثل طلاءه بمادة ما تقلل الاحتكاك.

الشكل 26: مقارنة بين الكتل الحجمية للمواد المستخدمة

## الاستنتاجات والتوصيات:

- بناء على نتائج الدراسة يمكننا استنتاج أنه تم تحقيق ثلاثة من أصل أربعة معايير تم وضعها في فقرة أهداف البحث، حيث:
  - تم الوصول لمعيار التكيف مع الأراضي غير المستوية عن طريق استخدام نوعية مفصل ملائمة (يؤمن حركتي دوران).
  - أكدت نتائج الدراسة الإنشائية متانة التصميم وهو المعيار الثاني.
  - تحقق معيار الوزن والحجم المناسبين عن طريق عمل مفاضلة بين عدة مواد واختيار المادة الأمثل بناء على تحقيقها لمعيار الوزن وذلك بعد التأكد من أن هذه المادة حققت معيار المتانة.
  - بلغ وزن التصميم 2Kg بدون البطارية، وحجمه 300\*70\*100mm وتقع هذه القيم تحت الحدود القصوى التي وضعت في الجدول 1.
- في الخطوات اللاحقة يجب العمل على عدة أمور، وهي:
  - بالنسبة للمعيار الرابع وهو استقرار وتوازن دورة المشي فيطلب تحقيقه التأكد من مواصفات دورة المشي الخاصة بهذا التصميم (زاوية، سرعة، تسارع، عزوم وقوى رد فعل الأرض) ومقارنتها مع القيم الطبيعية ويتم ذلك عن طريق عمل تحليل حركة Motion Analysis ضمن برنامج SolidWorks.
  - العمل على إعادة توزيع بعض قطع التصميم بحيث يصبح الشكل الخارجي له مماثل قدر الإمكان للرجل الطبيعية، حيث أن شكله الحالي أقرب لشكل متوازي مستطيلات.
  - إجراء دراسة منفصلة للمحامل الانزلاقية التي ظهر عندها التعب، ويجب أن تأخذ هذه الدراسة جميع التفاصيل المتعلقة بالمحامل (معامل الاحتكاك، التسمحات بين العناصر، المواد) بعين الاعتبار.

## References:

1. Dabiri, Y., Najarian, S., Eslami, M. R., Zahedi, S., & Moser, D. (2013). A powered prosthetic knee joint inspired from musculoskeletal system. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33(2), 118-124.
2. Rajtůková, V., Michalíková, M., Bednarčíková, L., Balogová, A., & Živčák, J. (2014). Biomechanics of lower limb prostheses. *Procedia Engineering*, 96, 382-391.
3. Martinez-Villalpando, E. , Herr, H. (2009). Agonist-antagonist active knee prosthesis: A preliminary study in level-ground walking. *Journal of rehabilitation research and development*, 46.3, 361-374.
4. Pratt, G. A., Williamson, M. M., Dillworth, P., Pratt, J., & Wright, A. (1997). Stiffness isn't everything. In *experimental robotics IV* (pp. 253-262). Springer, Berlin, Heidelberg.
5. Au, S. K., Weber, J., & Herr, H. (2009). Powered ankle-foot prosthesis improves walking metabolic economy. *IEEE Transactions on robotics*, 25(1), 51-66.
6. Masum, H., Bhaumik, S., & Ray, R. (2014). Conceptual Design of a Powered Ankle-foot Prosthesis for Walking with Inversion and Eversion. *Procedia Technology*, 14, 228-235.
7. Winter, D. The biomechanics and motor control of human gait. 1987.
8. Ben Nouma, B., Mitiche, A., Ouakrim, Y., & Mezghani, N. (2018). Knee kinematic curve representation and application to knee pathology classification. *Journal of Biomedical Engineering and Informatics*, 4(1), 32-39.

9. Zhang, L. Q., & Wang, G. (2001). Dynamic and static control of the human knee joint in abduction–adduction. *Journal of biomechanics*, 34(9), 1107-1115.
10. “[https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/handicapinternational/pages/1950/attachments/original/1421270083/Syria\\_January\\_2015.pdf?1421270083](https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/handicapinternational/pages/1950/attachments/original/1421270083/Syria_January_2015.pdf?1421270083)” 9/5/2020.
11. “[http://archive.thawra.sy/\\_archive.asp?FileName=39490148220190408112714](http://archive.thawra.sy/_archive.asp?FileName=39490148220190408112714)” 12/6/2020.
12. “<https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php>” 2/12/2020
13. “[http://www.motionusa.com.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/nook/BallScrews/PowerTrac\\_Full\\_Catalog.pdf](http://www.motionusa.com.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/nook/BallScrews/PowerTrac_Full_Catalog.pdf)” 6/1/2021.