التصميم الميكانيكي لركبة صناعية فعالة متكيفة مع الأراضي غير المستوية

د.م. نيرودا بركات[1]

د.م. نائل داؤد[2]

م.آلاء صعيدي[3]

الملخص

تحاكي الركب الصناعية التجارية المتوافرة 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 جديد من نوعه وقابل للتطبيق لمفصل ركبة صناعي يقوم بدورانين، ذلك بالإضافة لقدرته على الاقتراب قدر الإمكان من المواصفات الحركية والتحريكية للركبة البشرية السليمة خلال المشي المستوي. المفصل في هذا البحث هو من نوع U–Joint يؤمن حركتي دوران، يُتحكم بالدوران الأول المسؤول عن المشي المستوي(حركة الامتداد/انثناء) عن طريق مشغل متسلسل مرن Series Elastic Actuator (SEA)، ويُتحكم بالدوران الثاني المسؤول عن التكيف مع تعرجات الأراضي (حركة الإبعاد/ تقريب) عن طريق نابض غاز منفعل. تم التصميم على أساس المواصفات لشخص ذكر سوري متوسط الطول والوزن، ووُضع أربعة معايير يجب على التصميم تحقيقها وهي معيار التكيف مع تعرجات الأراضي، والمتانة، والوزن والحجم المناسبين، ومطابقة المواصفات الحركية والتحريكية للركبة البشرية السليمة ، تم تحقيق المعايير الثلاثة الأولى، أما بالنسبة للمعيار الرابع فيتطلب تحقيقه وجود نظام تحكم قادر على محاكاة عمل الركبة السليمة ويفضل أن يكون من نوع التحكم بالممانعة.

كلمات مفتاحية:

ركبة صناعية، مشغل متسلسل مرن، امتداد/ انثناء، إبعاد/ اقتراب، دراسة عناصر منتهية، الدراسة الإنشائية، دراسة ستاتيكية، دراسة تعب.

[1] مدرس- قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية - سورية.

[2] مدرس – قسم علوم الروبوت والأنظمة الذكية - كلية الهندسة - جامعة المنارة – اللاذقية – سورية.

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

Mechanical Design of Active Prosthetic Knee Adapted with Uneven Terrain

Dr. Neruda Barakat[4]

Dr. Nael Daoud[5]

Alaa Saidi[6]

Abstract

The currently available commercial prosthetic knees simulate the human knee by performing a single rotational movement (extension/flexion), also, research studies in this field focus on the same thing, this research aims to reach an applicable new design of prosthetic knee joint that performs two rotations, in addition to its ability to get as close as possible to the kinematic and kinetic specifications of the intact human knee during level-ground walking. The joint in this research is U-Joint type which provides two rotational movements, the first rotation (extension/flexion) which is responsible for level-ground walking is controlled by a Series Elastic Actuator SEA, and the second rotation (Abduction/adduction) which is responsible for adapting to uneven terrain is controlled by a passive gas spring. The design was made to be convenient for a Syrian male of average height and weight, four criteria were determined for the design to achieve: adapting with uneven terrain, strength, appropriate weight and size, and matching the kinematic and kinetic specifications of the intact human knee, the first three criteria have been achieved. As for the fourth criterion, its achievement requires a control system capable of simulating the work of a healthy knee, preferably of the type of impedance control.

Keywords:

prosthetic knee, series elastic actuator, extension/flexion, abduction / adduction, finite element study, structural study, static study, fatigue study.

[4] Assistant Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

[5] Assistant Professor, Department of Robotics and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, Manara University, Lattakia, Syria

[6] Postgraduate student (MSc), Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. (ala.saydi@gmail.com)

مقدمة:

تجري في كل عام آلاف من عمليات البتر حول العالم وذلك بسبب مضاعفات مرض السكري، الأمراض الإقفارية[7]، الحوادث وأمراض السرطان، و الأعمال الحربية. شهدت سورية في السنوات الأخيرة ازدياداً بحالات البتر بسبب الأزمة 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 [8]، وبحسب الفنيين في مركز إعادة التأهيل والأطراف الاصطناعية في مشفى ابن النفيس في دمشق إن انتشار حالات البتور السفلية أكثر من العلوية بكثير[9]. عالمياً، يبلغ عدد مبتوري الأطراف حوالي 1.9 مليون شخص، منهم 400 ألف مصابين ببتور فوق الركبة [1].

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، الالكترونيات، 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 الصغرية، 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 أمرا 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 تفعّل عن طريق المحركات الكهربائية فقد حلت هذه المشكلة عن طريق تأمينها للعمل الموجب الذي يحتاجه المفصل.

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 استهلاكًا 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 المنفعلة للرجل، ومن مخزون الطاقة المرنة الموجود في العضلات البشرية، لأنه بالوضع الطبيعي للمفصل السليم تقوم العضلات عندما تتحرك

[7] الأمراض الإقفارية هي الأمراض التي لا يحصل فيها عضو ما على حاجته من الدم.

بتخـزين وتفريـغ الطاقـة، وهـو مـا يُشـبّه بالسـلوك النابضـي، لـذلك سيكون من المفيد إدخال النوابض في الميكانزمات التي تتحكم بعمل المفصل. هناك العديـد مـن المشـغلات التـي تـدخل النـوابض فـي مكوناتها وتختلف خواصها بحسب توضـع النـابض بالنسـبة للمحـرك، منهـا المشـغل المتـوازي المـرن Parallel Elastic Actuator (PEA) أحد ميزاته تقليـل العـزم المطلـوب مـن المحـرك، والمشـغل المتسلسل المرن Series Elastic Actuator (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.

فـي العـام (2012) قـدّم الباحثـان (Martinez-Villalpando, E. , Herr, H.) تصـميم لركبـة صناعية فعالة مع مشغلين مرنين متسلسلين، لوحظ فـي النتـائج انـدفاع خـرجين مـوجبين للطاقـة عنـد منتصف الوقوف والوقوف المتأخر وهما مشابهين لسلوك الركبة الطبيعية، كما سمح أسلوب التحكم المستخدم المسمى بالممانعة المتغيرة بالتكيف مع الأطـوار المختلفـة لـدورة المشـي ومـع السـرعات المختلفـة للمشـي، وذلـك مـع المحافظـة علـى الاستهلاك الأصغري 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]. في عام (2013) ألف (Elliott J. Rouse) وآخرون مقالاً يدرس تصميم ركبة روبوتية تحقق استهلاك طاقة أصغري. يناقش هذا المقال الدراسة النظرية لتعديل جديد على بنية المشغل المتسلسل المرن وذلك بإضافة قابض clutch على التوازي مع المحرك ضمن المشغل المتسلسل المرن. يسمح هذا التعديل بأن يكون هناك ديناميك ثنائي بحيث أن النظام يتصرف كمشغل متسلسل مرن عندما يكون القابض غير معشقا، ويتصرف كنابض منفعل عند تعشيق القابض، وفقا لنتائج النمذجة، فإن الركبة ذات المشغل المتسلسل المرن مع قابض تطلبت طاقة كهربائية أقل بـ 70% من مثيلتها ذات المشغل المتسلسل المرن SEA التقليدي، مما يسم باستخدام بطاريات أصغر وبالتالي تخفيض الوزن الكلي للطرف، يوجد أمر سلبي في هذا المشغل وهو أن زاوية انثناء الركبة يمكن أن تكون أكبر بشكل كبير منها في كينماتيك الجسم السليم (وذلك عند ازدياد سرعة المشي وازدياد وزن الجسم)، كذلك من عيوبه زيادة العطالة المنعكسة بسبب القابض الذي تمت إضافته مما يسبب بزيادة تعقيد النظام [5].

كما ذكر سابقاً إن الميزة الأساسية في كل من الدراستين السابقتين هو التقليل من استهلاك الطاقة، وبشكل رئيسي تم الوصول لذلك بفضل إدخال نوابض في الميكانزم 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.) وآخرون في (2014) بتصميم كاحل يؤمن حركتي دوران (المستوي السهمي والأمامي)، يتكون هذا الطرف من مفصل كروي يؤدي حركة الدوران في المستوي السهمي عن طريق ميكانزم مكون من مسننات ونابض فتل ومحرك، وحركة الدوران في المستوي الأمامي عن طريق نظام مخمد ونابض [6]، ومع أن هذا التصميم يحاكي حركتين 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 يؤذي المفصل نفسه أو البيئة المحيطة.

أهمية البحث:

تلعب الأطراف السفلية للإنسان دوراً حيوياً هاماً، فهي تساهم في إبقاء الجسم متوازناً أثناء المشي وتؤمن له الدعم أثناء الوقوف. حالياّ 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 قابل للتطبيق لمفصل ركبة صناعية بحيث يحقق المعايير الأربعة التالية:

1. **التكيف مع التضاريس:** يتحقق هذا المعيار عن طريق استخدام مفصل يؤمن حركتي دوران وميكانزمين مناسبين للتحكم بهذين الدورانين.
2. **المتانة:** يتحقق هذا المعيار عند الوصول للتصميم الأمثل أي أنه يتعلق بالشكل الهندسي والمواد المستخدمة.
3. **الوزن والحجم المناسبين:** يتحكم بهذا المعيار المواد المستخدمة والشكل الهندسي للتصميم ويتحقق عند الوصول لوزن وحجم مشابهين لمثيليهما البشريين.
4. **استقرار وتوازن دورة المشي:** يتحقق هذا المعيار بحال تطابقت البيانات الحركية والتحريكية 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) [10]، سنفترض أن هذا الشخص يمشي بسرعة طبيعية[8] حيث أن بيانات دورة المشي الحركية والتحريكية (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) أما مجال الزوايا والعزوم للمفصل الصناعي فتكون كما في الجدول (2) [2].

جدول 1: الحد الأقصى لطول ووزن الركبة

	طول الطرف	الوزن
الحد الأقصى	35cm	3.72Kg

جدول 2: مجال الزوايا والعزوم للمفصل الصناعي

	الزوايا	العزم
الامتداد/انثناء	[0°,64.86°]	49.2 N.m
إبعاد/تقريب	[−3°,+6°]	20 N.m

[8] السرعة الطبيعية : وهي سرعة المشي الاعتيادية للشخص ، اعتمدنا في هذا البحث القيمة 80 m/min.

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 لخشونة الأرض بحال المشي على أرض غير مستوية ويتوضع هذان المكبسان على طرفي الركبة (**Error! Reference source not found.**).

المفصل المستخدم:

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

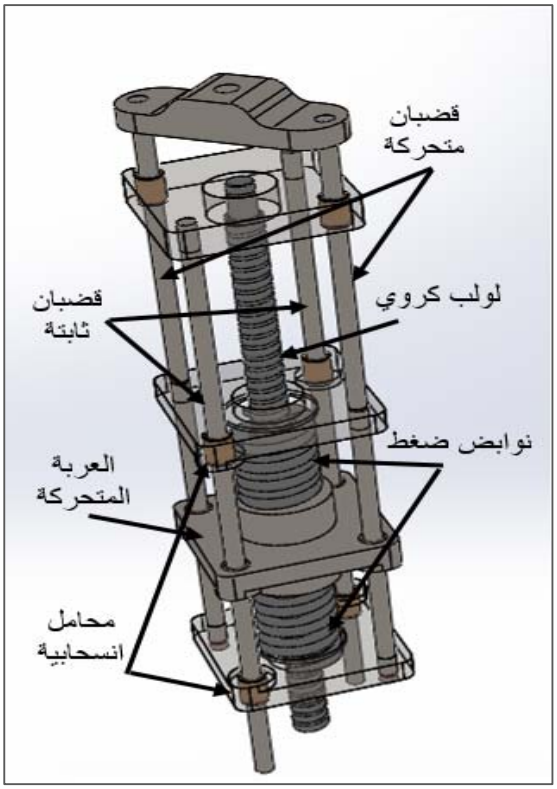
ميكانزم حركة الامتداد/ انثناء (المشغل):

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

مواصفات المشغل المتسلسل المرن:

آلية النقل:

تتألف آلية النقل من نظام بكرات يتصل من خلال سير مع لولب كروي. خلال أول مرحلة من النقل يقود المحرك ميكانزم بكرة – سير بشكل مباشر، هذا الميكانزم له نسبة نقل مساوية لـ 1:3، في المرحلة الثانية، يقوم ميكانزم بكرة –سير بتدوير اللولب كروي وهو من نوع(8×2mm) Power Trac وتم اختياره اعتماداً على 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 1**).



الشكل 1: مكونات المشغل المتسلسل المرن (بدون المحرك ونظام البكرات)

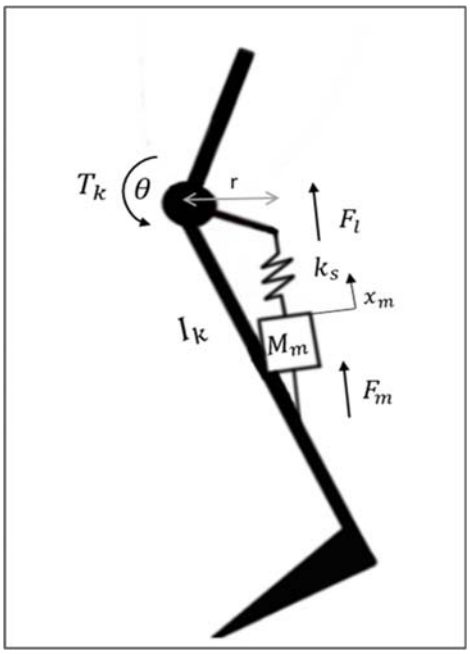
المحرك:

من الشكل (**الشكل 2**) يكون عزم الركبة:

$$T_k = I_k\ddot{\theta} + rF_l \ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث: T_k العزم الخارجي الكلي ، I_k عزم عطالة الرجل تحت المفصل، $\ddot{\theta}$ التسارع الزاوي للركبة، r

ذراع القوة المؤثرة، F_l 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 $F_l = F$.



الشكل 2: العزم الخارجي للركبة

لدينا جداول خاصة بعزوم الركبة الطبيعية خلال دورة المشي [2]، وبحساب التسارع الزاوي خلال هذه الدورة بالاعتماد على البيانات المكانية والزمانية للركبة [2] (الزوايا والتوقيت لدورة المشي مع افتراض أن زمن الدورة يساوي 1.2sec)، وتم حساب عزم العطالة بشكل تقريبي باستخدام برنامج SolidWorks وذلك بعمل نمذجة تقريبية للرجل السفلية (قدم من نوع 1C30 Trias OttoBock مع مفصل الركبة بالأبعاد والوزن المتوقعين)، وعوضنا عن r بالقيمة 40mm وهو طول الذراع الذي سنعتمده، وبتطبيق المعادلة السابقة معادلة (1) نحصل على قيم F خلال كامل فترة دورة المشي وكانت القيمة الأعظمية لهذه القوة 3300N.

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:

$$T_m = \frac{Fl}{N2\pi\eta} \ldots\ldots(2)$$

حيث T_m هو عزم دوران المحرك، F هي القوة المحسوبة سابقاً، l هو دليل اللولب الكروي ويساوي 2mm، N نسبة نقل البكرات وتساوي 1:3 ، و η هي كفاءة ميكانزم اللولب الكروي نعتبرها 1. بتطبيق هذه المعادلة على القيمة الأعظمية للقوة F نحصل على قيمة العزم الأعظمي المطلوب من المحرك:

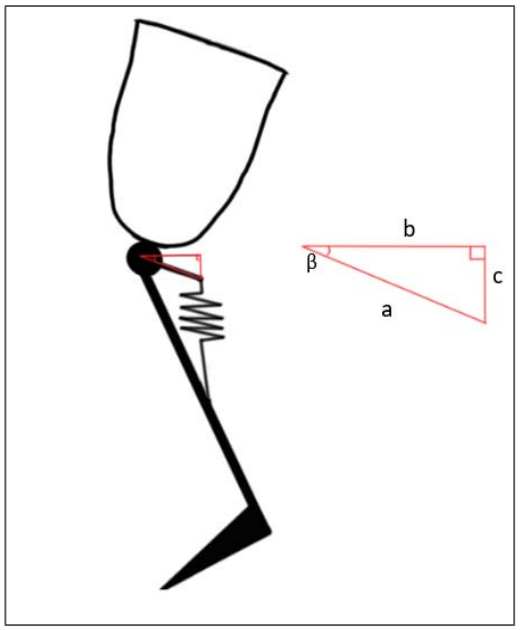
$$T = 260\ N.mm$$

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 317 N.mm، له زاوية خطوة تساوي 1.8 درجة، 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 40mm. باستخدام زوايا الدوران العظمى التي تتعرض لها الرجل (زوايا الركبة والورك) خلال دورة المشي بسرعات طبيعية [2] 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 3** نلاحظ أن البعد c والذي يمثل الانضغاط الأعظمي للنابض يتعلق بكل من الزاوية β المساوية لزاوية دوران

الـورك والبعـد a، وبمـا أن قيمـة a ثابتـة فيكـون الانضـغاط الأعظمـي للنـابض يتعلـق فقـط بزاويـة دوران الـورك، ويكـون أعظميـا عنـدما تكـون هـذه الزاويـة أعظميـة. تبلـغ القيمـة الأعظميـة لزاويـة دوران الـورك عنـد المشـي بسـرعة طبيعيـة 21.87 درجـة [2].



الشكل 3: اختيار النابض

$$c = \sin(21.87) \times 40 = 14.8\ \text{mm}$$

وهـي القيمـة الأعظميـة لانضـغاط النـابض، وبشـكل عـام فـإن النـابض لا يمكنـه أن ينضـغط لأكثـر مـن 40% مـن الطـول الحـر الأصـلي، أي أن طـول النابض كاملا يجب أن يكون 37mm.

أما بالنسبة لصلابة النابض تم حسابها على أساس العـزم الأعظمـي للركبـة، وبحسـب علاقـة صـلابة الركبة المساوية للعزم على الزاوية

$$Z = \frac{T_k}{\theta} \ldots\ldots(3)$$

تم افتراض أن الحساب على أساس العزم الأعظمي للركبة (وبالتالي القوة الأعظمية) ينتج عنه الصلابة المطلوبة للنابض. بتعويض العزم الأعظمي للركبة لشخص وزنه 80 Kg ويساوي 49.2 N.m وتكون الزاوية عندها 0.378 rad في المعادلة (2). بذلك تكون قيمة صلابة الركبة عندها 130.15 N.m/rad وهي الصلابة الأعظمية للركبة، ستؤمن هذه الصلابة تحملاً جيداً للصدمات وبنفس الوقت تمثل قيمة واقعية تماثل مقابلتها البيولوجية. بناء على ما سبق يجب علينا تم اختيار النابض HEFTY Spring (LHL 1000C 03) له طول يساوي 38mm وصلابة 160KN/m.

بالنسبة لتحمل الصدمات وهو ميزة هامة جدا للمشغل المتسلسل المرن، فإن هذا النابض سيحمي المحرك ونظام النقل من حمل مفاجئ قدره الأعظمي يحسب بالمعادلة:

$$F_{max} = k.\Delta x \ldots\ldots(4)$$

حيث: F_{max} الحمل الأعظمي الذي يتحمله النابض قبل أن يتضرر أو يسبب الضرر لبقية أجزاء المشغل، k صلابة النابض وتساوي 160 N/mm، Δx الانضغاط الأعظمي للنابض ويساوي 14.8mm، بتعويض هذه القيم ي المعادلة السابقة:

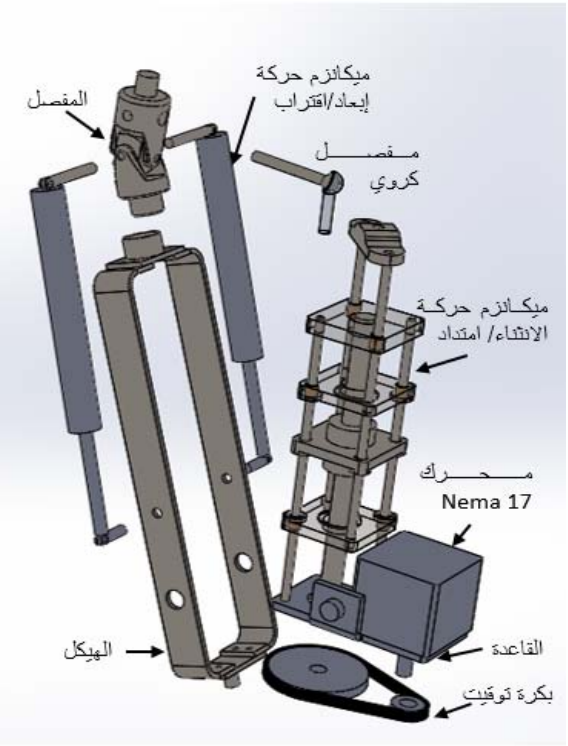
$$F_{max} = 160 \times 14.8 \approx 2370N$$

ميكانزم حركة إبعاد/ تقريب:

اعتمـادا علـى البيانـات الـواردة فـي [7] حيـث طبـق علـى المفصـل عـزم مقداره 20N.m وذلك من أجل توليد حركة التقريب والتبعيد، بالأخذ بعين الاعتبار هذه القيمة وبافتراض ذراع عزم بقيمة 40mm تكون القيمة التي يجب أن يتحملها العنصر الذي سيتحكم بهـذه الحركـة 500N. بمـا أن الغـرض مـن حركـة التقريـب والتبعيـد هـو التكيـف مـع الأراضـي غيـر المسـتوية، أي أنهـا حركـة منفعلـة لـذلك سـيكون

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. الغالبية العظمى من نوابض الغاز المتوافرة 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 197mm، بسرعة امتداد تبلغ 0.3m/sec ووزن 0.077kg.

يمثل الشكل التالي مكونات التصميم كاملة (**الشكل 4**).



الشكل 4: مكونات الركبة 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. 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 وتم تقسيم التصميم لثلاث مجموعات لتسهيل الدراسة، حيث تم حساب ردود الأفعال بينها وطبقت في أماكن اتصال هذه المجموعات، تم تعريف الروابط بين قطع المجموعة الواحدة وتطبيق الأحمال الممكنة بافتراض حالات متطرفة للتأكد من متانة التصميم مثل:

1. تطبيق كامل وزن الجسم (80Kg) على الركبة الصناعية مع افتراض أن الشخص يحمل وزن إضافي (20Kg).
2. عمل المحرك بالعزم الأعظمي.
3. تثبيت نهاية المشغل لمحاكاة وجود عائق يمنع حركة امتداده.

أوضحت نتائج الدراسة الستاتيكية أن الإجهادات العالية تركزت بشكل عام بالقرب من أماكن التثبيت مثل المناطق العلوية والسفلية للقضبان الثابتة والمتحركة وأيضا مناطق التثبيت بالبراغي والمحامل الانزلاقية، وكانت جميع الإجهادات تحت حد الخضوع الخاص بالمواد المستخدمة، ومعامل الأمان الأصغري 1.6.

تتعرض الركبة لأحمال متكررة حيث يمشي الإنسان الطبيعي خلال اليوم حوالي 3000 خطوة مفردة،

ولأنه من الممكن أن تتحمل المادة حملاً معيناً في الحالة الستاتيكية بينما تنهار تحت تأثير نفس الحمل إذا كان تكراريا لذلك كان لابد من إجراء دراسة التعب. أجريت الدراسة على نفس المجموعات السابقة وباستخدام نتائج الدراسة الستاتيكية الخاصة بكل مجموعة، وتم تعريف المتطلبات دراسة التعب الخاصة بكل مجموعة وهي نوع الحمل، وعدد دورات التحميل، ومجال الإجهاد $\Delta\sigma$ ، بالنسبة لنوع الحمل فهو Axial محوري لكل المجموعات، وبالنسبة لعدد دورات التحميل فهو 10^6 دورة، وهذا العدد يؤهل الركبة الصناعية للمشي لمدة عامين تقريباً باعتبار أن القيمة المتوسطة لعدد خطوات الإنسان خلال اليوم هي 3000 خطوة مفردة[9]، أما بالنسبة لمجال الإجهاد فتم تحديده بشكل يناسب كل قوة مطبقة على حدى. القوى المؤثرة على المجموعات وهي قوة المحرك ومجال هذه القوة بين 3300N− و 66.5N+ لذلك تم تحديد معامل التحميل بالقيمة 0.02− ، أما قوة الوزن مجالها بين 1000N− والصفر وقوة رد فعل الأرض ومجالها بين القيمتين 1100N+ والصفر لذلك تم تحديد قيمة معامل التحميل لهاتين القوتين بالقيمة 0. أوضحت نتائج دراسة التعب وجود تعب يظهر على السطح الخارجي للقضيبين الثابتين عند عدد دورات 8×10^5 أي بعد فترة سنة ونصف من الاستخدام، أما بالنسبة لباقي قطع التصميم فقد أوضحت نتائج دراسة التعب أن جميع الإجهادات المتكررة كانت تحت منحني S–N (إجهاد – عدد دروات).

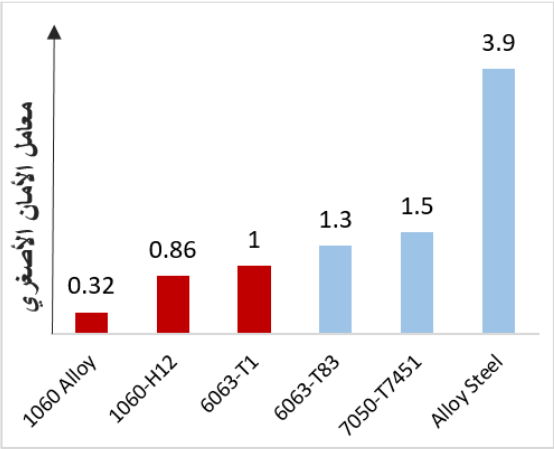
أيضا تم حساب الترددات الطبيعية للتصميم باستخدام البرنامج ومقارنتها مع تردد الحمل وهو هنا التردد الذي يعمل به المحرك (Hertz 5) وكانت جميع الترددات بعيدة بشكل كافي عن تردد الحمل حيث كان أقرب تردد طبيعي Hertz 80 أي أن التصميم آمن ضد ظاهرة الطنين.

النتائج والمناقشة:

بينت نتائج الدراسة الستاتيكية أن قيم الإجهادات الأعظمية كانت ضمن الحدود المسموح بها (تحت حد الخضوع) وتركزت هذه الإجهادات بشل رئيسي في المناطق التي يوجد فيها نوع من أنواع التثبيت، وأحيانا في الأماكن التي يوجد فيها تغير بالأبعاد الهندسية كالزوايا والانحناءات، وكانت جميع قيم معامل الأمان جيدة (أكبر من الواحد)، أما الانتقالات الأعظمية فتركزت غالباً في أماكن تطبيق القوى، وبالنسبة لدراسة التردد فكانت الترددات الطبيعية للنظام بعيدة بشكل كافي عن تردد الحمل أي أن التصميم آمن ضد ظاهرة الطنين.

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. على سبيل المثال عند إجراء دراسة التعب على مجموعة هيكل الركبة لأول مرة كانت نسبة الضرر في الزاويا العلوية والسفلية للهيكل مرتفعة، لذلك تمت إضافة أعصاب لهذه الأماكن، وبعدها أُعيدت كافة الدراسات الخاصة بهذه المجموعة للتأكد من متانة التصميم بعد إضافة الأعصاب.

[9] 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 5: معاملات الأمان للمواد المختلفة

كما وتم تجريب عدة مواد على قطع التصميم، نتيجة لذلك اختلفت قيم معامل الأمان على سبيل المثال بالنسبة لهيكل المشغل كانت قيم معامل الأمان كما في الشكل السابق (الشكل 5)، حيث نلاحظ أن المواد (Alloy Steel و 7050–T7451 و 6063-T83) لها معاملات أمان جيدة (أكبر من الواحد) لذلك فإنها مقبولة لأنها تؤمن للتصميم المتانة اللازمة، والأفضل من بينها بالنسبة لقيمة لمعامل الأمان هو الفولاذ السبائكي كما أن سعره هو الأرخص، ولكن من جانب آخر عند مقارنته مع المادتين الأخريين من ناحية الكتلة الحجمية نلاحظ أن كتلته الحجمية هي الأكبر وبذلك فهو لا يمثل الخيار الأفضل من ناحية الوزن، إذ سيتضاعف وزن الهيكل مايقارب الثلاث مرات عند استخدامه مقارنة مع المواد الأخرى، وبسبب أهمية تحقيق المعيار الثالث للتصميم وهو معيار الوزن تم اختيار مادة الألمنيوم 7050 لجميع قطع هيكل المشغل (ماعدا العربة المتوسطة) لأنها تتمتع بمعامل أمان كافي بالإضافة للوزن الخفيف، وتم اختيار مادة الفولاذ السبائكي للعربة المتوسطة وزيادة سماكتها لأنها تتعرض لإجهادات أعلى من بقية أجزاء التصميم، كنتيجة نهائية كان معامل الأمان لهيكل المشغل 1.6 وهي قيمة مقبولة. وبشكل عام تنوعت مواد التصميم بين الفولاذ السبائكي والألمنيوم 7050.

الاستنتاجات والتوصيات:

بناء على نتائج الدراسة يمكننا استنتاج أنه تم تحقيق ثلاثة من أصل أربعة معايير تم وضعها في فقرة أهداف البحث، حيث:

1. تم الوصول لمعيار التكيف مع الأراضي غير المستوية عن طريق استخدام نوعية مفصل ملائمة (يؤمن حركتي دوران).
2. أكدت نتائج الدراسة الإنشائية متانة التصميم وهو المعيار الثاني.
3. 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. حيث بلغ وزن التصميم 2Kg بدون البطارية، وارتفاعه 30cm وتقع هذه القيم تحت الحدود القصوى المعتمدة.

في الخطوات اللاحقة يجب العمل على عدة أمور، وهي:

1. العمل على إعادة توزيع بعض قطع التصميم بحيث يصبح الشكل الخارجي له مماثل قدر الإمكان للرجل الطبيعية.
2. بالنسبة لدراسة التعب للمجموعة الأولى والتي بينت تعرض جزء من القضيبين الثابتين لتعب سطحي، من المفضل زيادة أقطار هذين القضيبين، أو تغيير مادة التصنيع.

3. بالنسبة للمعيار الرابع وهو استقرار وتوازن دورة المشي فيتطلب تحقيقه التأكد من مواصفات دورة المشي الخاصة بهذا التصميم (زاوية، سرعة، تسارع، عزوم وقوى رد فعل الأرض) ومقارنتها مع القيم الطبيعية ويلزم لذلك عمل نظام تحكم مناسب للتصميم، يفضل أن يكون من نوع التحكم بالممانعة.
4. من الضروري إدخال مخمد لتركيبة المشغل المتسلسل المرن وذلك لضمان التطبيق الصحيح لخاصية المشغل المتعلقة بحمايته للبيئة المحيطة من أثر التصادمات المفاجئة.

Reference:

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. Winter, D. The biomechanics and motor control of human gait. 1987.
3. Martinez Villalpando, E. C. (2012). *Design and evaluation of a biomimetic agonist-antagonist active knee prosthesis* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
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. Rouse, E. J., Mooney, L. M., Martinez-Villalpando, E. C., & Herr, H. M. (2013, June). Clutchable series-elastic actuator: Design of a robotic knee prosthesis for minimum energy consumption. In *2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp. 1-6). IEEE.
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. 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.

المواقع الاكترونية:

8. "https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/handicapinternational/pages/1950/attachments/original/1421270083/Syria_January_2015.pdf?1421270083" 9/5/2020.
9. "http://archive.thawra.sy/_archive.asp?FileName=39490148220190408112714" 12/6/2020.
10. "https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php" 2/12/2020