

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم هندسة النظم الإلكترونية والميكانيكية

العام الدراسي 2022/2021

## مشروع سنة رابعة اختصاص ميكاترونكس

# تصميم وتنفيذ روبوت تفرّعي بثلاث درجات حرّية واختباره Design and Implementation of a 3 DOF Parallel Robot

تقديم

زين العابدين زريق

إشراف

م. نزار فليون – م. علي العباس

8/9/2022



## الإهداء

إلى معلمي التي تحملت مني الكثير

أمي سهى زريق

إلى روح الغائب الحاضر في كل عمل

أبي الشاعر محمد منذر زريق

إلى مسندي وصديقي الذي سأستأنه إليه

أخي المهندس هيب زريق

إلى أساتذتي الذين تركوا الأثر الجميل

أساتذتي في المدرسة المحسنة

إلى المرزني والأخ الكبير

الشهيد محمد رضا الشامي

إلى صديقتي ورفيقتي في الدرب

يارا العلي

إلى صديقتي وأخي

الزميل محمد نور الكرم

إلى الزميل والشريك في النجاح

عبد الرحمن هوراني

إلى وطني المرحع سوريا ومدنيتي مدينة الياسمين دمشق



## الشكر

أُتوجّه بالشكر إلى كلّ من ساهم في إنجاز هذا المشروع من زملاء ومهندسين ودكاترة، وأخصّ بالشكر رئيس قسم النظم الإلكترونيّة والميكانيكيّة الدكتور ميشيل السبع لدعمه المستمرّ. كما أخصّ بالشكر السيّدة عبير السيوفي على دعمها ومساعدتها واهتمامها الكبير في كلّ ما يخصّ الدارات الإلكترونيّة وعاملي الورشات بالأخصّ الأستاذ محمود عرابي على مساعدتهم الكبيرة في عمليّة التجميع.

والشكر الكبير لمشرفي المشروع الذين قدّموا الكثير من الجهد والوقت لإتمام هذا العمل والوصول لأفضل النتائج الممكنة:

م. نزار فليون - م. علي العباس

## الملخص

تم في هذا المشروع تصميم وتنفيذ ذراع روبوتية تفرعية بثلاث درجات حرية دورانية باستخدام ميكانيزم Spherical Parallel Manipulator تعمل عمل مفصل المعصم وتحاكي حركته، حيث تم استعمال محرّكات Dynamixel XL320 صغيرة الحجم وتصميم دائرة مطبوعة للتحكم بهذه المحركات باستخدام بطاقة Arduino Nano وطباعة قطع التصميم باستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد. تم اختبار الذراع عن طريق تصميم واجهة تخاطبية على برنامج Matlab تسمح بالتواصل مع المتحكم المذكور ليتم التحكم بمواضع المحركات وإعطاء الأوامر الموافقة للنموذج الهندسي العكسي المبني على Matlab أيضاً، ومن ثم قياس العزم المنقول عبر الميكانيزم ومقارنته مع النتائج النظرية المحسوبة من النموذج الديناميكي المباشر.

## Abstract

In this project a 3 rotational Degrees of Freedom (DoFs) robot arm using the Spherical Parallel Manipulator (SPM) mechanism that works as a wrist joint has been designed and implemented using a 3d printer for manufacturing the pieces. A printed circuit has been designed to control the Dynamixel XL320 smart servo motors using the Arduino Nano chip. A Graphical User Interface (GUI) has been designed and implemented on Matlab in order to test the mechanical design and the torque transmission of the mechanism in certain positions found from the inverse kinematics of the mechanism and then compare the results to the theoretical ones calculated from the forward dynamic kinematics.

# المحتويات

|     |  |  |
|-----|--|--|
| v   | المحتويات  |  |
| vii | قائمة الأشكال  |  |
| ix  | قائمة الجداول  |  |
| x   | مقدمة عامة   |  |
| 1   | 1. التعريف بالمشروع                                      |  |
| 2   | 1.1 هدف المشروع  |  |
| 3   | 1.2 دفتر الشروط الوظيفية                                 |  |
| 4   | 2. الدراسة المرجعية                                      |  |
| 5   | 2.1 درجات الحرية في مفصل الرسغ عند الإنسان               |  |
| 5   | 2.2 مجالات حركة كل من درجات الحرية الثلاث                |  |
| 5   | 2.3 العزوم الأعظمية في كل وضع                            |  |
| 5   | 2.4 تطبيقات أخرى للميكانيزم                              |  |
| 6   | 2.5 مشاريع سابقة مشابهة                                  |  |
| 8   | 2.6 الخلاصة  |  |
| 9   | 3. التحليل الوظيفي                                       |  |
| 10  | 3.1 الوظيفة الرئيسية للذراع                              |  |
| 10  | 3.2 تحليل النظام لوظائفه الجزئية                         |  |
| 10  | 3.3 اختيار الحلول المناسبة لتحقيق الوظائف الجزئية للنظام |  |
| 15  | 4. الدراسة النظرية                                       |  |
| 16  | 4.1 مقدمة  |  |
| 16  | 4.2 النموذج الهندسي العكسي                               |  |
| 17  | 4.3 النموذج الهندسي المباشر                              |  |
| 18  | 4.4 فضاء العمل للميكانيزم                                |  |
| 18  | 4.5 نقل العزم عبر ميكانيزم SPM                           |  |
| 19  | 4.6 النمذجة على برنامج Matlab                            |  |
| 23  | 5. التصميم الميكانيكي                                    |  |
| 24  | 5.1 التصميم النهائي بعد التجميع                          |  |
| 24  | 5.2 المخطط الانفجاري للتصميم                             |  |
| 25  | 5.3 القطع الإفرادية                                      |  |
| 29  | 5.4 تصميم المسننات                                       |  |
| 30  | 5.5 اختيار الرولمانات                                    |  |
| 32  | 5.6 الدراسة العددية باستخدام برنامج ANSYS                |  |

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 37 | الدارة الإلكترونية.....                       | 6.  |
| 38 | المتحكم الأساسي.....                          | 6.1 |
| 38 | التواصل مع المحركات.....                      | 6.2 |
| 38 | التغذية.....                                  | 6.3 |
| 39 | الدارة الكلية.....                            | 6.4 |
| 41 | الكود البرمجي.....                            | 7.  |
| 42 | تقسيم الكود البرمجي.....                      | 7.1 |
| 42 | برمجة المتحكم Arduino Nano.....               | 7.2 |
| 42 | برمجة واجهة المستخدم ونموذج الميكاتزم.....    | 7.3 |
| 44 | التنفيذ العملي.....                           | 8.  |
| 47 | الاختبارات والنتائج.....                      | 9.  |
| 48 | الوزن الكلي للقطع.....                        | 9.1 |
| 48 | دقة التوضع للميكاتزم على المحاور الثلاثة..... | 9.2 |
| 50 | الخطأ السكوني للميكاتزم.....                  | 9.3 |
| 50 | نقل العزم للميكاتزم على المحاور الثلاثة.....  | 9.4 |
| 52 | الخاتمة والآفاق المستقبلية.....               |     |
| 53 | المراجع.....                                  |     |
| 54 | الملاحق.....                                  |     |
| 55 | الملحق - أ -.....                             |     |
| 61 | الملحق - ب -.....                             |     |
| 63 | الملحق - ج -.....                             |     |
| 65 | الملحق - د -.....                             |     |
| 66 | الملحق - هـ -.....                            |     |



## قائمة الأشكال

|    |   |
|----|---|
| xi | الشكل 1 استخدام ميكانيزم SPM في معصم اصطناعي                                |
| 5  | الشكل 2 درجات الحرية الثلاث لمفصل الرسغ عند الإنسان                         |
| 6  | الشكل 3 تصميم مشروع Agile Eye الكلي   |
| 6  | الشكل 4 استخدام ميكانيزم SPM في عمليات التنظير                              |
| 7  | الشكل 5 المخطط الانفجاري لتصميم المعصم الاصطناعي لذراع Naranjo              |
| 8  | الشكل 6 التنفيذ العملي للمعصم المنفذ في المعهد العالي بميكانيزم Coaxial SPM |
| 10 | الشكل 7 الوظيفة الرئيسية للنظام   |
| 10 | الشكل 8 المكونات الجزئية للنظام   |
| 11 | الشكل 9 ميكانيزم SPM في الحالة العامة                                       |
| 11 | الشكل 10 ميكانيزم Coaxial SPM   |
| 12 | الشكل 11 تصميم المشروع المقترح في حالة الوصل المباشر                        |
| 12 | الشكل 12 تصميم المشروع المقترح بحالة الوصل باستخدام السيور                  |
| 14 | الشكل 15 محرك Dynamixel XL320   |
| 14 | الشكل 16 المتحكم Arduino Nano   |
| 16 | الشكل 17 شكل توضيحي لميكانيزم SPM   |
| 18 | الشكل 18 مثال عن فضاء عمل رابطة من ميكانيزم SPM                             |
| 20 | الشكل 19 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور x        |
| 20 | الشكل 20 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور y        |
| 21 | الشكل 21 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور z        |
| 24 | الشكل 22 التصميم النهائي بعد التجميع  |
| 24 | الشكل 23 مقطع طولي في التصميم   |
| 25 | الشكل 24 المخطط الانفجاري للتصميم مع أرقام الكتل                            |
| 26 | الشكل 25 التصميم النهائي للقاعدة  |
| 26 | الشكل 26 قاعدة الطبقة الأولى  |
| 27 | الشكل 27 مسنن الطبقة الأولى   |
| 27 | الشكل 28 قاعدة كل من الطبقتين الثانية والثالثة                              |
| 28 | الشكل 29 تصميم قطعة الغطاء  |
| 28 | الشكل 30 محور المحرك  |
| 29 | الشكل 31 الرابطة في ميكانيزم SPM  |
| 29 | الشكل 32 منصّة الخرج في ميكانيزم SPM  |
| 30 | الشكل 33 تصميم المسننين وتعشيقهما معاً                                      |
| 31 | الشكل 34 توضع الرولمانات في قطعة الوصل بين المنصّة والمفصلات                |
| 31 | الشكل 35 مضاجع الرولمانات في الغطاء   |
| 32 | الشكل 36 آلية تحقيق الرابطة الدورانية في طبقة من الطبقات الثلاث             |
| 32 | الشكل 37 القوة ومكان تثبيت قطعة الوصل عند الدراسة على ANSYS                 |
| 33 | الشكل 38 نتائج الإجهادات على قطعة الوصل                                     |
| 33 | الشكل 39 نتائج التشوه على قطعة الوصل  |
| 33 | الشكل 40 نتائج عامل الأمان على قطعة الوصل                                   |
| 34 | الشكل 41 العزم ونقاط التثبيت في محور مسنن المحرك                            |
| 34 | الشكل 42 نتائج الإجهادات على محور المحرك                                    |
| 34 | الشكل 43 نتائج التشوه على محور المحرك                                       |
| 35 | الشكل 44 نتائج عامل الأمان على محور المحرك                                  |
| 35 | الشكل 45 نقطة التثبيت والحمل على مسنن الطبقة الأولى                         |
| 35 | الشكل 46 نتائج الإجهادات على مسنن الطبقة الأولى                             |

|  |    |
|--|----|
| الشكل 47 نتائج التشوّه على مسنّن الطبقة الأولى.....              | 36 |
| الشكل 48 نتائج عامل الأمان على مسنّن الطبقة الأولى.....          | 36 |
| الشكل 49 دائرة التحكّم بجهة إشارة التواصل مع المحرّكات.....      | 38 |
| الشكل 50 دائرة 3S - BMS المستخدمة لشحن البطاريّات.....           | 39 |
| الشكل 51 مخطط الدارة المستعملة للتحكّم بالمحرّكات وتغذيتهم.....  | 39 |
| الشكل 52 ملفّ الدارة المطبوعة على برنامج CadStar.....            | 40 |
| الشكل 53 واجهة المستخدم المستعملة للتحكّم بتوجّه الميكانيزم..... | 43 |
| الشكل 54 القطع المطبوعة قبل التجميع.....                         | 45 |
| الشكل 55 الذراع بعد تجميعها عمليّاً.....                         | 45 |
| الشكل 56 الدارة المطبوعة عمليّاً.....                            | 46 |
| الشكل 57 الدارة المستخدمة عمليّاً.....                           | 46 |
| الشكل 58 قياس وزن القطع الإجمالي بعد التركيب.....                | 48 |
| الشكل 59 اختبار الموضع حول المحور z.....                         | 49 |
| الشكل 60 اختبار الموضع حول المحور y.....                         | 49 |
| الشكل 61 اختبار الموضع حول المحور x.....                         | 50 |

## قائمة الجداول

|          |   |    |
|----------|---|----|
| الجدول 1 | دفتر الشروط الوظيفية للمشروع              | 3  |
| الجدول 2 | بارامترات الميكانيزم المستخدمة في النمذجة | 19 |
| الجدول 3 | أرقام الكتل مع أسمائها ووظائفها           | 25 |

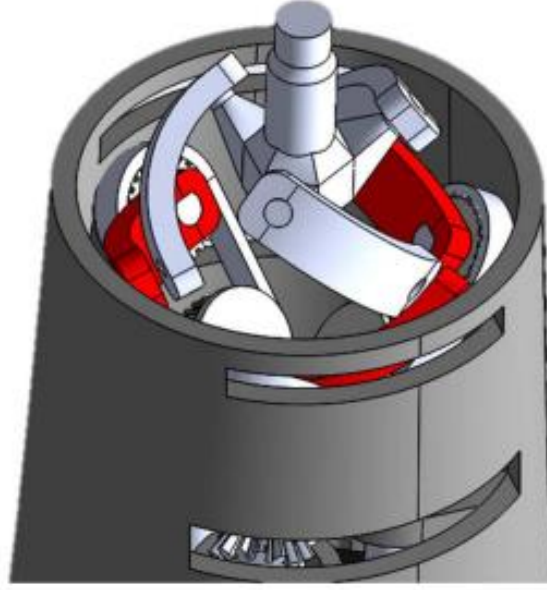
## مقدمة عامة

لطالما سعى الإنسان منذ العصور القديمة إلى إيجاد حلول لمشاكل الأطراف المبتورة، حيث يعود أول دليل لوجود طرف بديل إلى ما قبل 3000 عام بأحد الموميوات المصرية القديمة التي كانت تحمل اصبعاً مصنوعاً من الخشب والجلد. أمّا في عصرنا هذا ومع ازدياد الحاجة للأطراف البديلة بسبب ازدياد الحروب والأزمات فكان لا بدّ من إيجاد طرق فعّالة لتعويض الأطراف المبتورة ليستطيع المصاب إكمال حياته بشكل طبيعيّ.

خلال تطوّر صناعة الأطراف البديلة أوجد الإنسان العديد من الحلول التي تتنوّع من حلول ميكانيكيّة بحتة بدأت باستخدام القطع الخشبيّة وأنواع الخطّافات وغيرها وتطوّرت لتأمين بعض المفاصل كالركبة والقدم. إلّا أنّه وبتطوّر العلم وإمكانيّات التصنيع المتاحة وخاصّة بالمجالين الإلكترونيّ والمعلوماتيّ تمّ الانتقال إلى نوع آخر من الأطراف الاصطناعيّة وهي الأطراف المفعّلة. والتي تعتمد على المفعّلات والحساسات ودارات التحكّم لتأمين حركة هي أقرب ما يكون لحركة الطرف المبتور لدى المريض ومحاكاة عمل الأطراف البشريّة ممّا أدّى لنقلة كبيرة في هذا المجال.

تمّ تصميم وتطوير العديد من الميكانيزمات والمفاصل المختلفة في سبيل الحصول على طرف صناعي فعّال ويؤديّ الوظيفة بالشكل المطلوب. تنقسم هذه الميكانيزمات بشكل عام إلى نوعين أساسيين وهما الميكانيزمات التسلسليّة والميكانيزمات التقرّعيّة وقد شاع استخدام الميكانيزمات التسلسليّة كثيراً في مجال صناعة الأذرع والمفاصل الاصطناعيّة لما تتميّز به من سهولة النمذجة والتصميم بالإضافة إلى القدرة على تأمين مجالات حركة واسعة. إلّا أنّ هذه الميّزات تأتي مع مشاكل عديدة خصوصاً في القدرة على التحقيق ضمن حيّز صغير والقدرة على نقل العزم بالإضافة إلى مشكلات تحميل أوزان المفعّلات على بعضها الآخر ممّا يؤديّ للحاجة لمحرّكات ذات استطاعات أكبر لتأمين العزم المطلوب منها.

أمّا الروبوتات التفرّعية من جهةٍ أخرى فيتمّ تفعيلها من القاعدة مباشرةً، وهو ما يوفّر عمليّة تحميل وزن بعض المفعّلات على بعضها الآخر. كما أنّ ذلك يكسبها رشاقّة عاليةً في الحركة بالمقارنة مع الروبوتات التسلسليّة. وقد تطرّقت الأبحاث الحديثة للعديد من الحلول لتصميم مفاصل الأطراف الصناعيّة، كاستخدام ميكانيزم **Spherical Parallel Manipulator (SPM)** فيها كما هو موضح في الشكل (1)، حيث يمكن تمثيل بعض مفاصل الإنسان كالرسغ والكتف وكذلك الفخذ برابطة كرويّة مفعّلة. تشترك المفاصل السابقة مع ميكانيزم SPM بمحدوديّة الحركة. إلّا أنّه يتطلّب دقّة عالية في التصنيع والتجميع، لذلك كان لا بدّ من التحقّق من نتيجة كل مرحلة من مراحل التنفيذ على حدة، كما يتطلب هذا النوع من الميكانيزمات الإبداع في إيجاد حلول تصميميّة لتحقيق الأبعاد الوظيفيّة والتسامحات الهندسيّة بأقل التكاليف.



الشكل 1 استخدام ميكانيزم SPM في معصم اصطناعي

سنقوم في هذا المشروع بتصميم وتنفيذ رابطة كروية باستخدام الميكانيزم التفرعي SPM بشكل وحجم مناسبين لمعصم اصطناعي يؤمن ثلاث درجات حرة دورانية يؤمن توجه الكف أو الأداة الطرفية لهذه الذراع وفق المحاور الثلاثة ومن ثم نقوم بدراسة العزوم المنقولة وفق الميكانيزم لمحاولة تأمين عزوم توافق متوسط عزوم المعصم عند الإنسان. وأخيراً سنستعرض النتائج العملية للتنفيذ ونقوم بمقارنتها مع الدراسات النظرية لنتوصل بعدها إلى الخاتمة والآفاق المستقبلية لتطوير المشروع مستقبلاً.

## الفصل الأول

### 1. التعريف بالمشروع

## 1.1 هدف المشروع

يهدف المشروع إلى التحقق من النتيجة التي توصلنا إليها من خلال حلقة البحث التي قمنا بها هذه السنة بعنوان "فعالية استخدام الميكانيزمات التفرعية في مفاصل الأطراف الصناعية". والتي بينا فيها إمكانية استخدام هذا النوع من الميكانيزمات بناءً على دراسة مرجعية. تم التركيز في حلقة البحث على نسبة نقل العزم بين الدخل والخرج على كامل فضاء العمل عبر هذا الميكانيزم. في هذا المشروع سيتم التحقق من النتيجة التي توصلنا لها عملياً، وذلك باستخدام وصل غير مباشر للمحركات يؤمن شكل أسطواني مضغوط مناسب لبناء معصم اصطناعي.

## 1.2 دفتر الشروط الوظيفية

| نوع الشرط | الشرط  | أهمية الشرط                      |
|-----------|--|----------------------------------|
| وظيفي     | تحقيق مجالات حركة مفصل الرسغ   | مطلوب                            |
| حركي      | يؤمن الحركة بثلاث درجات حرية وفق رابطة كروية                               | Pronation/Supination:<br>76°/85° |
|           |  | Flexion/Extension:<br>75°/75°    |
|           |  | Abduction/Adduction:<br>20°/45°  |
|           | تحقيق سرعات دورانية عظمية على المحاور الثلاثة لا تقل عن 15 دورة في الدقيقة | مطلوب                            |
| هندسي     | عدم تجاوز قطر ساعد الإنسان الوسطي بضعفين                                   | مطلوب                            |
|           | يقع ضمن أسطوانة قطرها 200 mm   |                                  |
|           | مقترح الاهتمام بالناحية الجمالية للتصميم                                   |                                  |
|           | وزن لا يتجاوز وزن ساعد الإنسان   | مقترح                            |
|           | أقل من 1.5 Kg  | مقترح                            |
| حدي       | يؤمن عزوم لا تقل عن متوسط العزوم التي تؤمنها رسوغ البالغين                 | مطلوب                            |
|           | يؤمن عزوم 6.5 Nm في كل من الاتجاهات الثلاث                                 | مطلوب                            |
| الطاقة    | التغذية عن طريق بطاريات قابلة للشحن  | مقترح                            |

الجدول 1 دفتر الشروط الوظيفية للمشروع

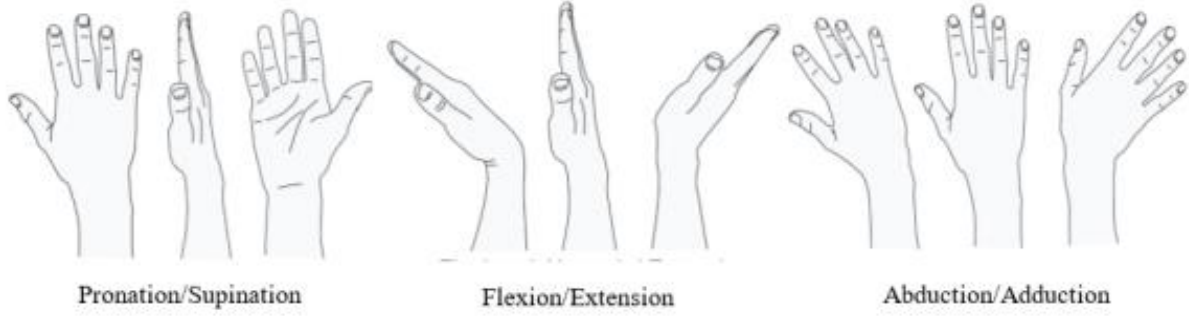


## الفصل الثاني

### 2. الدراسة المرجعية

## 2.1 درجات الحرية في مفصل الرسغ عند الإنسان

يمكن اعتبار مفصل الرسغ عند الإنسان تبسيطاً كرابطة كروية تتألف من ثلاث درجات حرية يمكن اعتبارها رابطة كروية مفعلة ودرجات الحرية هذه هي: pronation/supination flexion/extension abduction/adduction كما هو موضح في الشكل (2).



الشكل 2 درجات الحرية الثلاث لمفصل الرسغ عند الإنسان

## 2.2 مجالات حركة كل من درجات الحرية الثلاث

حسب ما ورد في [1] فإن المجال الأعظمي لحركة كل من درجات الحرية السابقة هي كالتالي:

- Pronation/Supination:  $76^\circ/85^\circ$
- Flexion/Extension:  $75^\circ/75^\circ$
- Abduction/Adduction:  $20^\circ/45^\circ$

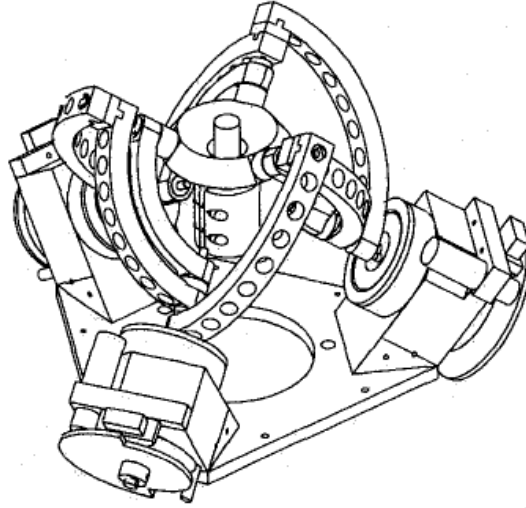
## 2.3 العزوم الأعظمية في كل وضع

حسب ما ورد في [2] فإن العزوم المطبقة في مفصل الرسغ تختلف حسب وضعية اليد، فكان العزم الأعظمي في حالة الراحة عند الإنسان  $4.6 \pm 1.0 N.m$  وفي حالة pronation فكان العزم الأعظمي  $6.5 \pm 1.4 N.m$  أما في حالة supination فكان  $5.5 \pm 1.2 N.m$  ومنه نجد أن العزم الأعظمي يكون في حالة pronation وقيمته وسطيّاً  $6.5 N.m$  وهي القيمة التي سنحاول الوصول إليها.

## 2.4 تطبيقات أخرى للميكانزم

### 1. مشروع Agile Eye [3]:

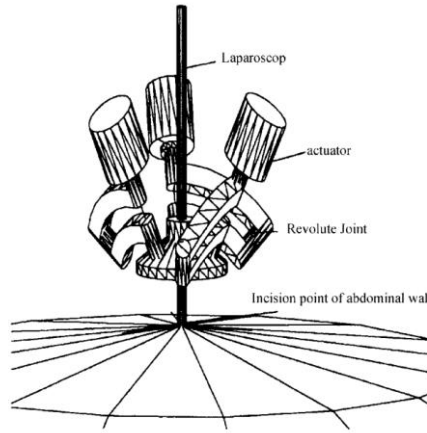
هذا المشروع هو عبارة عن منصة لكاميرا متحركة تؤمن رؤية بمجال عمل أوسع من العين البشرية تتحرك وفق ثلاث درجات حرية، الميزة الأساسية لاستخدام هذا الميكانزم من أجل الوظيفة المطلوبة هي الدقة العالية المطلوبة في توجيه الكاميرا لأغراض الملاحقة وبنفس الوقت السرعة العالية في الحركة مما يقود إلى ميكانزم رشيق ودقيق وخفيف الوزن. يوضح الشكل (3) تصميم المشروع.



الشكل 3 تصميم مشروع Agile Eye الكلي

## 2. مشروع تطبيق ميكانيزم SPM في عمليات التنظير [4]:

من التطبيقات المهمة لهذا الميكانيزم استخدامه في المجال الطبي، حيث يستخدم هذا الميكانيزم لتوجيه رأس أداة المنظار في عمليات التنظير. حيث أنّ هذا الميكانيزم يؤمن درجات الحرية الثلاث المطلوبة بدقة وخفة وزن عاليين، ولكن تعقيد النموذج الحركي بالإضافة إلى محدودية مجال الحركة كان من أهم المشاكل التي واجهت هذا التصميم. يبين الشكل (4) آلية عمل الميكانيزم.



الشكل 4 استخدام ميكانيزم SPM في عمليات التنظير

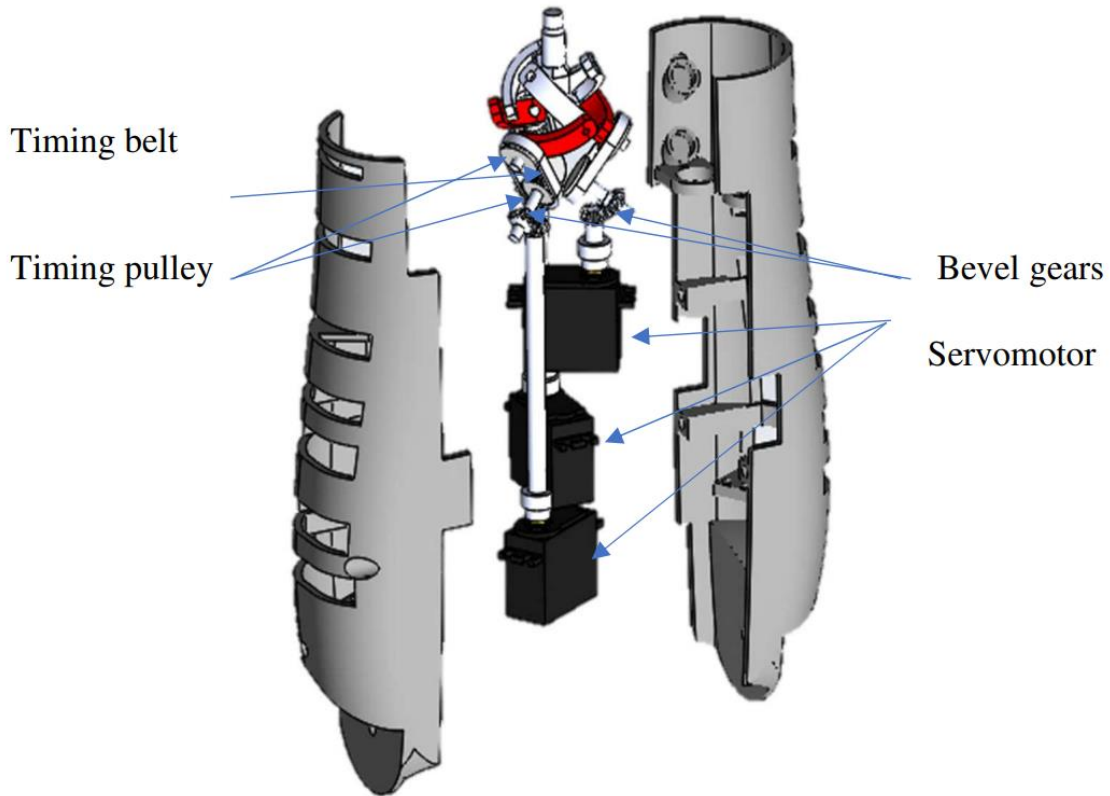
## 2.5 مشاريع سابقة مشابهة

عالمياً لم يكن هناك سوى مشروع واحد استخدم ميكانيزم SPM في بناء مفصل لمعصم اصطناعي، أمّا في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا فكان هناك محاولة سابقة لتنفيذ هذا الميكانيزم ليعمل كمعصم في ذراع اصطناعية. فيما يلي سنستعرض هذين التصميمين ونحاول معرفة نقاط القوة والضعف فيهما للحصول على نتيجة أفضل في عملنا.

3. مشروع Naranjo في سنة 2017 [5]: كان هذا المشروع عبارة عن أطروحة دكتوراه بعنوان “Design and Experimental Evaluation of a New Prosthetic Arm”

تتناول تصميم واختبار لذراع اصطناعية كاملة وتم استخدام ميكانزم SPM لتحقيق مفصل الرسغ فيها.

اعتمد هذا التصميم على الوصل غير المباشر للمحركات على الميكانزم عن طريق مسننات مائلة وسيور كما هو موضح في الشكل (5). من المميزات التي كانت في هذا المشروع تأمين عزوم كافية لتحقيق الوظيفة حسب دفتر الشروط بالإضافة إلى تحقيق مجال عمل مقبول، كان لهذا التصميم مشكلة في تركيب المحركات من حيث عدم التناظر في الشكل والطول الزائد الذي يحتاجه هذا التركيب وتوزيع الوزن على كامل طول الذراع، بالإضافة للتعقيد بوجود المسننات المائلة وما تجلبه من مشاكل في الخلو.



الشكل 5 المخطط الانفجاري لتصميم المعصم الاصطناعي لذراع Naranjo

4. مشروع "تصميم وتنفيذ ذراع صناعية بديلة ذكية من فوق المرفق" في المعهد العالي [6]: والذي كان مشروع تخرج للطالبين نبيل سمعان وعبد المسيح سابا استخدمنا فيه حالة خاصة من الميكانزم التفرعي SPM تدعى Coaxial SPM والتي تعتمد على ثلاثة محاور متمحورة مع بعضها البعض لتفعيل الميكانزم كما هو موضح في الشكل (6). الميزة الأساسية لهذا الميكانزم كان مجال الحركة الكبير بسبب استخدام النمط Coaxial من الميكانزم، من أهم المشاكل التي

واجهت هذا التصميم كانت مشكلة تعجّن المحاور والمستنّات التي حصلت في مادّة الألمنيوم ممّا أدّى لمشاكل في المستنّات المستخدمة لنقل الحركة بالإضافة إلى مشاكل في المحاور المتداخلة.



الشكل 6 التنفيذ العملي للمعصم المنقذ في المعهد العالي بميكانيزم Coaxial SPM

## 2.6 الخلاصة

يمكننا من خلال ما درسناه من محاولات سابقة ومن مفصل الإنسان أن نقول أنّ الميكانيزم SPM سيكون مناسباً لتأمين الحركة المطلوبة ولكن المحاولات السابقة كانت تعاني من بعض المشاكل التي قد نستطيع تجاوزها باستخدام طريقة الوصل التي سننبّعها في هذا المشروع.

## الفصل الثالث

### 3. التحليل الوظيفي

### 3.1 الوظيفة الرئيسية للذراع

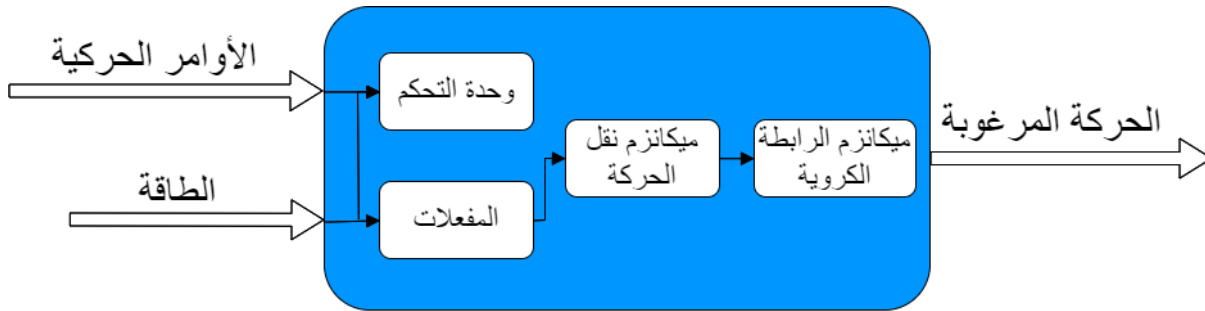
إنّ الوظيفة الرئيسية للذراع هي توجيه الكفّ بثلاث درجات حرّية، فيكون دخل المنظومة هو الطاقة والأوامر الحركيّة الآتية من المستخدم عن طريق الواجهة التخابيّة، أمّا خرجها فهو حركة دورانيّة وفق المحاور الثلاثة. كما هو موضّح في الشكل (7).



الشكل 7 الوظيفة الرئيسية للنظام

### 3.2 تحليل النظام لوظائفه الجزئية

تنقسم الوظيفة الأساسيّة للنظام إلى ثلاث وظائف جزئيّة وهي تأمين الحركة وفق كل من درجات الحرّية الثلاث ولتأمين هذه الوظائف نستطيع تحليل النظام إلى المكوّنات الجزئيّة الموضّحة بالشكل (8).



الشكل 8 المكوّنات الجزئيّة للنظام

### 3.3 اختيار الحلول المناسبة لتحقيق الوظائف الجزئيّة للنظام

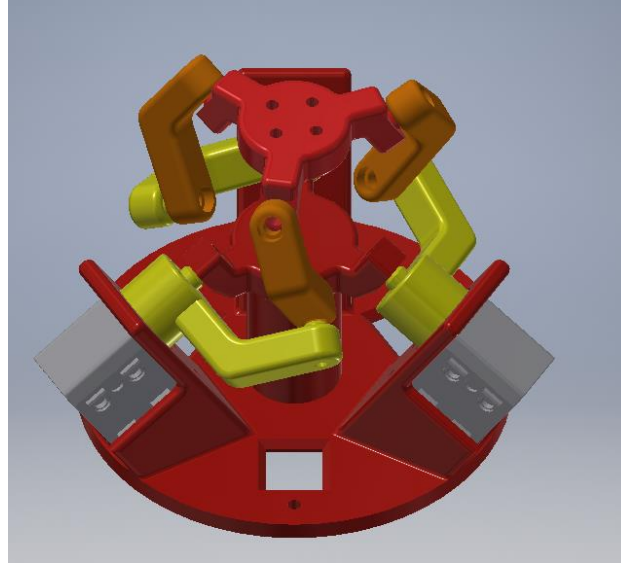
#### • ميكانيزم الرابطة الكروية

يوجد حلّين مقترحين لتأمين ميكانيزم الرابطة الكرويّة باستخدام الميكانيزم SPM:

- ❖ ميكانيزم SPM في الحالة العامّة: تتميّز هذه الحالة من الميكانيزم بتصميم أبسط وحاجة أقلّ للدقّة في التصنيع لعدم وجود محاور متداخلة مع بعضها البعض إلّا أنّ هذا النموذج لا يؤمّن مجال الحركة المطلوب لدرجة الحرّية الأولى Pronation/Supination حسب مشروع Naranjo [5]. الشكل (9) يوضّح نموذج هذا الميكانيزم.

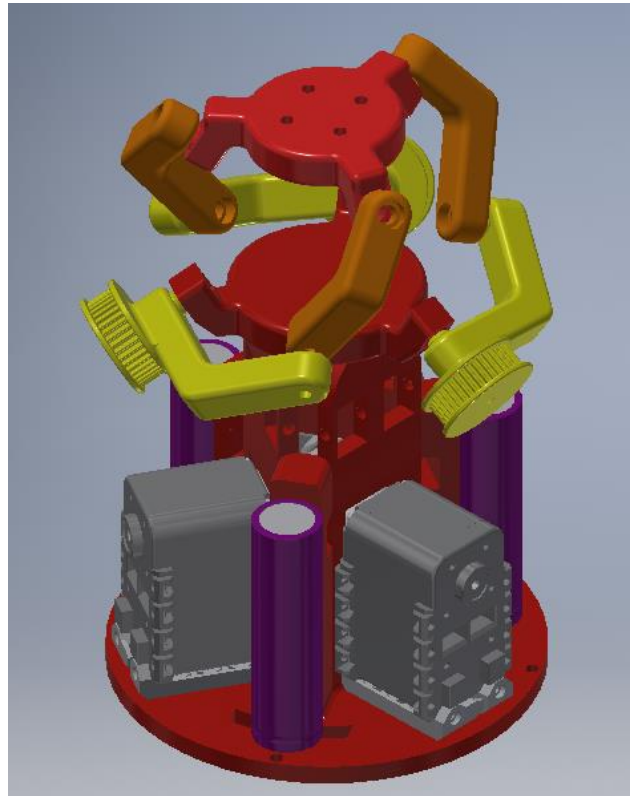






الشكل 11 تصميم المشروع المقترح في حالة الوصل المباشر

❖ **الوصل باستخدام السيور:** تعتمد هذه الطريقة على وضع المفعلات في قاعدة التصميم ونقل العزم إلى الميكانزم عن طريق سيور مفتوحة ترتبط ببكرات موصولة مع روابط الميكانزم من جهة وبكرات على محور المحرك من جهة أخرى بالإضافة إلى بكرات موجهة لتأمين شكل السير المطلوب بالزاوية المرغوبة كما هو موضح في الشكل (12). كانت المشكلة الأساسية بهذا الحل هي ضيق المساحة الموجودة عند المحركات لمحدودية قطر القاعدة، مما يسبب مشكلة عملية التجميع.



الشكل 12 تصميم المشروع المقترح بحالة الوصل باستخدام السيور

❖ **الوصل باستخدام مستنّات:** تستعمل هذه الطريقة بالوصل مع الميكانيزم SPM إمّا باستخدام مستنّات مخروطيّة لنقل المحور أو يمكن استخدام مستنّات داخلية مع ميكانيزم Coaxial SPM حصراً وهو ما سنستعمله في حالتنا. وذلك لسهولة تجميع القطع في هذه الطريقة بالإضافة إلى الأسباب التي سنذكرها لاستخدام ميكانيزم Coaxial SPM لاحقاً. الشكل (13) يوضّح استخدام المستنّات في عملية الوصل.



الشكل 13 تصميم يوضّح طريقة الوصل المستخدمة

#### • **المفعلات**

يمكن استخدام العديد من أنواع المفعلات سنهتم بالمحرّكات منها وسنستعرض بعضاً من أنواع المحرّكات التي قد تكون مناسبة لأداء الوظيفة المطلوبة:

❖ **محرّكات التيار المستمر DC Motor:** تتميز بسهولة التحكم بالسرعة، وبإضافة Encoder مناسب يمكن التحكم بالموضع بدقة.

❖ **المحرّكات الخطوية Stepper Motor:** المشكلة الأساسية باستخدام هذا النوع من المحرّكات هو وزنها الكبير نسبياً عادةً، بالإضافة إلى أن التحكم بالموضع فيها نسبيّ يتحدّد بالموضع الذي تمّ تشغيل المحرّكات فيه.

❖ **محرّكات Smart Servo:** تؤمّن هذه المحرّكات القدرة على التحكم بالموضع و السرعة بالإضافة إلى العزم، كما تعطي مجال حركة مناسب يصل لـ  $270^\circ$ .

❖ **محرّكات Brushless DC Motor:** هذه المحرّكات هي الأنسب لتطبيقنا بعد إضافة Encoder مناسب لتأمين التحكم بالسرعة والموضع المطلوبين. حيث تؤمّن هذ المحرّكات استطاعة أعلى من أجل حجم أصغر ووزن أقل، الأمر المهم تواجهه في هذه الذراع لتحقيق المتطلبات الوظيفية لها.

من هذه المحرّكات تم اختيار نوع Maxon EC45 Flat الموضح في الشكل (14) مع علبة سرعة بنسبة تخفيض سرعة  $\frac{1}{100}$ ، وذلك لحجمه المناسب بقطر خارجي 43.2 mm وطول 26.7 mm. مع استطاعة 70 Watt وسرعة اسمية 4860 RPM ووزن كلي 110 g.



الشكل 14 المحرك Maxon EC45 Flat

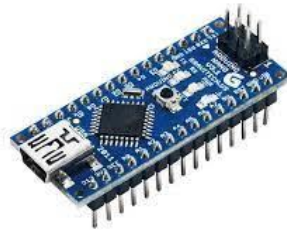
**ملاحظة:** المحرك المذكور لم يتوافر ولذلك تمّ استخدام محرك Dynamixel XL320 من نوع Smart Servo والموضّح بالشكل (15).



الشكل 13 محرك Dynamixel XL320

#### • وحدة التحكم

بما أنّ المحركات التي سنستخدمها Dynamixel XL320 فنحن بحاجة لمتحكم يؤمّن التواصل من نمط Serial، بالإضافة إلى الحاجة للتخاطب مع واجهة للمستخدم على الحاسب. فكانت دائرة Arduino مناسبة لهذه الوظيفة. تم اختيار متحكم Arduino Nano الموضّح في الشكل (16) لصغر حجمه ومناسبته لأداء التحكم المطلوب بالمحركات. حيث يؤمّن تواصل تسلسلي بسرعة تصل لـ 1Mbps بالإضافة إلى القدرة على إضافة Bluetooth Module لمراحل قادمة.



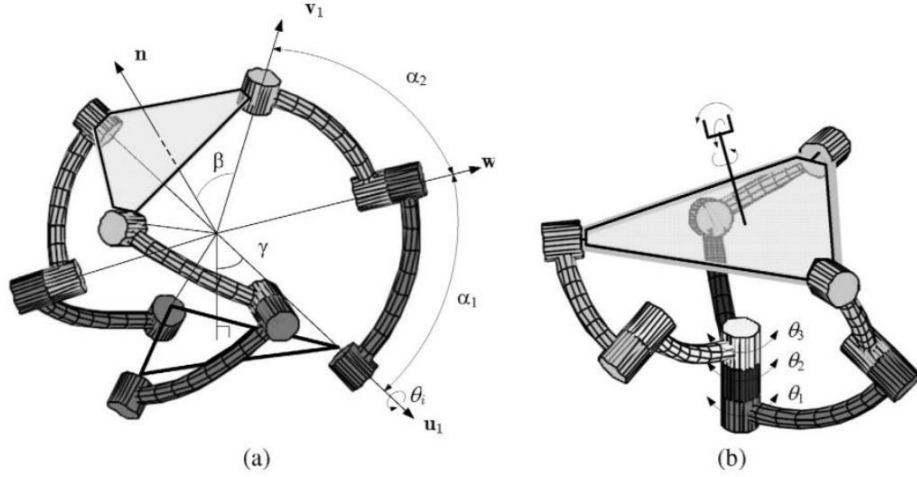
الشكل 14 المتحكم Arduino Nano

## الفصل الرابع

### 4. الدراسة النظرية

#### 4.1 مقدمة

إنّ ميكانزم SPM المقترح لتنفيذ المعصم يتألف من منصّتين هرميّتين متقابلتين بالرأس، القاعدة السفلى ثابتة و العلوية متحركة حول رأس الهرم مشكّلةً رابطة كروية كما هو موضّح بالشكل (17). يمكن لهذا الميكانزم أن يكون متناظراً حيث يكون الهرمان منتظمين أو غير متناظر ويتألف عندها الميكانزم من هرمين متناظرين زاويتا رأسيهما  $\beta$  للمنصة المتحركة و  $\gamma$  للثابتة ويسمى الميكانزم Coaxial SPM عندما تكون الزاوية  $\gamma = 0^\circ$ . أمّا في حالتنا فسنعتمد  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$  حيث يكون الميكانزم Coaxial SPM مع زاوية قائمة لرأس الهرم العلوي.



الشكل 15 شكل توضيحي لميكانزم SPM

نعرّف من الشكل (17) كلّ من:

- $u_i$  شعاع واحدة الزاوية الأولى للرابطة  $i$
- $w_i$  شعاع واحدة الزاوية الثانية للرابطة  $i$
- $v_i$  شعاع واحدة الزاوية الثالثة للرابطة  $i$
- $\alpha_1$  الزاوية بين  $u_i, w_i$
- $\alpha_2$  الزاوية بين  $v_i, w_i$
- $\beta$  زاوية رأس الهرم الثابت (السفلي)
- $\gamma$  زاوية رأس الهرم المتحرك (العلوي)

#### 4.2 النموذج الهندسي العكسي

على عكس ما قد نفعله في دراسة ميكانزم تسلسلي فإننا في هذه الحالة سنبدأ من النموذج العكسي الذي يعتبر إيجاد أبسط في حالة الميكانزمات التفرعية، وبعدها من النموذج العكسي سننتقل للنموذج الحركي المباشر والذي بدوره سيساعدنا في إيجاد فضاء عمل الميكانزم بالإضافة إلى علاقة نقل العزم داخل فضاء العمل.

لاستخراج النموذج الهندسي العكسي نريد معرفة الزوايا  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  التي تعبر عن زوايا المحركات الثلاث الموافقة لتوجّه معيّن للنهاية الطرفية، لإيجاد هذه الزوايا نوجد  $u_i, v_i, w_i$  ونحلّ مجموعة المعادلات (1) ...  $w_i \cdot v_i = \cos \alpha_2$  حيث  $i = 1, 2, 3$ . وذلك بملاحظة أنّ الزاوية  $\alpha_2$

هي الزاوية بين الشعاعين  $w_i, v_i$ . تقود هذه المعادلات بالحل إلى مجموعة المعادلات التربيعية التالية:

$$A_i t_i^2 + 2B_i t_i + C_i = 0, \quad i = 1, 2, 3 \dots (2)$$

ويكون عندها الحل:

$$\theta_i = 2 \arctan t_i \dots (3)$$

حيث أن كلاً من  $A_i, B_i, C_i$  يعطى بالعلاقة:

$$A_i = (\sin \gamma \cdot v_{i2} - \cos \gamma \cdot v_{i3}) \cos \alpha_1 - (\cos \gamma \cdot v_{i2} + \sin \gamma \cdot v_{i3}) \sin \alpha_1 - \cos \alpha_2$$

$$B_i = \sin \alpha_1 \cdot v_{i1}$$

$$C_i = (\sin \gamma \cdot v_{i2} - \cos \gamma \cdot v_{i3}) \cos \alpha_1 + (\cos \gamma \cdot v_{i2} + \sin \gamma \cdot v_{i3}) \sin \alpha_1 - \cos \alpha_2$$

وكلاً من  $u_i, v_i, w_i$  يعطى بالعلاقة:

$$u_i = [-\sin \eta_i \sin \gamma, \cos \eta_i \sin \gamma, -\cos \gamma]^T$$

$$v_i = Q[-\sin \eta_i \sin \beta, \cos \eta_i \sin \beta, \cos \beta]^T$$

$$w_i = \begin{bmatrix} (\cos \eta_i \sin \theta_i - \sin \eta_i \cos \gamma \cos \theta_i) \sin \alpha_1 - \sin \eta_i \sin \gamma \cos \alpha_1 \\ (\sin \eta_i \sin \theta_i + \cos \eta_i \cos \gamma \cos \theta_i) \sin \alpha_1 + \cos \eta_i \sin \gamma \cos \alpha_1 \\ \sin \gamma \cos \theta_i \sin \alpha_1 - \cos \gamma \cos \alpha_1 \end{bmatrix}$$

حيث:

$$\eta_i = 2(i-1) \frac{\pi}{3}$$

و  $Q$  مصفوفة الدوران.

فنجد بحل المعادلة (3) النموذج الهندسي العكسي للميكانيزم. من الممكن الاطلاع على حل أكثر تفصيلاً للمعادلات في [7].

### 4.3 النموذج الهندسي المباشر

حسب ما ورد في المرجع [7] فإن النموذج الهندسي المباشر لهذا الميكانيزم لا يعطي حلاً وحيداً بل من الممكن أن يعطي ما يصل إلى ثمانية حلول مختلفة، لذلك وبملاحظة أنه يمكننا الاكتفاء بالنموذج الحركي المباشر لن نتعرض لحل النموذج الهندسي المباشر.

تعبّر مصفوفة جاكوبي عن النموذج الحركي المباشر للميكانيزم، ويمكن إيجاد المصفوفة من العلاقة (1) باشتقاق الطرفين وملاحظة أن  $\dot{\theta}_i = u_i \times w_i$  و  $\dot{v}_i = \omega v_i$  حيث أن شعاع السرعة

الثالث  $v_i$  ينتج عن جداء شعاع الزاوية بالسرعة الزاوية على الخرج  $w$  أما شعاع السرعة الثاني  $w_i$  فينتج عن جداء خارجي بين شعاع السرعة في الدخل  $u_i \cdot \theta_i$  وشعاع الزاوية  $w_i$  مما يوصلنا للنتيجة الموضحة في المعادلة (4) بعد عزل الخرج  $w$  بدلالة الدخل  $\theta_i$ :

$$J_i = \frac{(w_i \times v_i)^T}{(u_i \times w_i) \cdot v_i}, \quad i = 1, 2, 3 \dots (4)$$

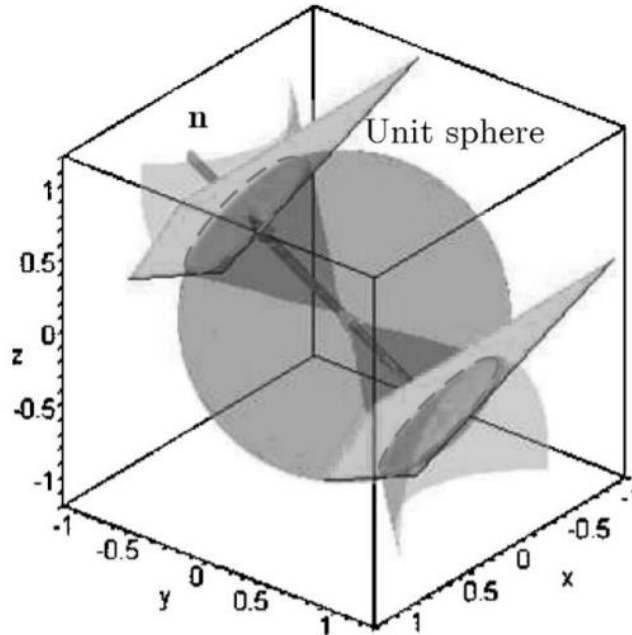
وهي العلاقة التي سنستخدمها في نمذجتنا لاحقاً.

#### 4.4 فضاء العمل للميكانزم

لإيجاد فضاء العمل للميكانزم علينا حل معادلات النموذج العكسي مما يقودنا إلى مجموعة المعادلات التالية والتي تعبر عن ست مستويات كل اثنين منها يعرفان فضاء عمل واحدة من الروابط الثلاثة:

$$x_i \sin \eta_i \sin \gamma - y_i \cos \eta_i \sin \gamma + z_i \cos \gamma - \cos(\alpha_1 \pm \alpha_2) = 0, \\ i = 1, 2, 3 \dots (5)$$

حيث أن فضاء العمل الموافق لكل رابطة يعرف بمستويين متوازيين يحددان السطح الفاصل بين منطقة العمل والمنطقة التي لا تصل لها الرابطة كما هو موضح في الشكل (18). أما فضاء العمل للميكانزم ككل فيحدد بتقاطع كل من الفضاءات الثلاثة.



الشكل 16 مثال عن فضاء عمل رابطة من ميكانزم SPM

#### 4.5 نقل العزم عبر ميكانزم SPM

بفرض شعاع العزم الذي تقدّمه المحركات  $\tau$ ، و  $M$  شعاع العزم المنقول إلى النهاية الطرفية للميكانزم فتكون العلاقة بين العزمين كالتالي [8]:

$$M = G\tau \dots (6)$$

حيث أن  $G$  هي المصفوفة الجاكوبية للقوة وتعطى بالعلاقة:

$$G = (J^{-1})^T$$

ومن الجدير بالذكر هنا أن نسبة نقل العزم حول كل محور من المحاور الثلاثة حسب هذه العلاقة تتعلّق بالموضع، الأمر الذي لا نجده عادة في الميكانيزمات التسلسلية – حيث نجد أن العزم المنقول في رابطة واحدة يتعلّق بنسبة النقل لهذه الرابطة فقط ولا يتعلّق بالموضع الحالي لها – ممّا يشير إلى ضرورة دراسة نقل العزم في هذا النوع من الميكانيزمات.

#### 4.6 النمذجة على برنامج Matlab:

تمّ بناء النموذج الهندسيّ العكسيّ للميكانيزم المستخدم على برنامج *Matlab* من أجل التحكّم بموضع الميكانيزم حيث يكون الدخّل للبرنامج التوجّه المطلوب وخرج البرنامج الزوايا المطلوبة من كلّ من المحركات الثلاث. وذلك باعتبار البارامترات المبينة في الجدول (2) للميكانيزم والموافقة للتصميم المنقذ.

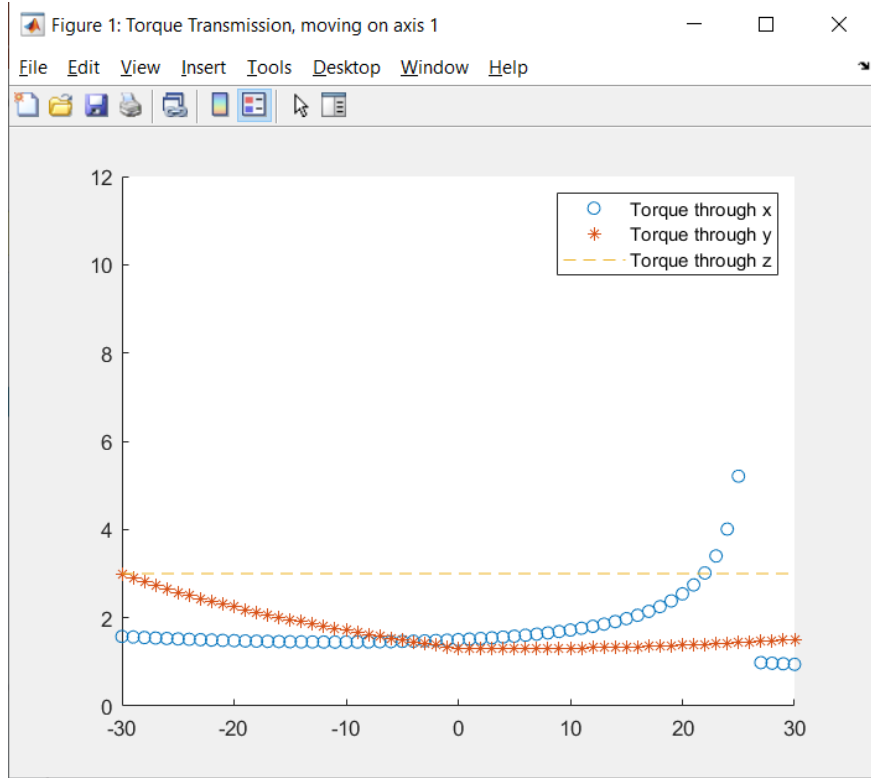
| البارامتر  | القيمة        |
|------------|---------------|
| $\alpha_1$ | $60^\circ$    |
| $\alpha_2$ | $56.33^\circ$ |
| $\beta$    | $90^\circ$    |
| $\gamma$   | $0^\circ$     |

الجدول 2 بارامترات الميكانيزم المستخدمة في النمذجة

بالإضافة إلى النموذج الهندسيّ العكسيّ تمّ أيضاً بناء النموذج الحركي المباشر لإيجاد نسبة نقل العزم خلال حركة الميكانيزم حول كلّ من المحاور الثلاثة وبثبات الزاويتين الأخريين. وفي كلّ الحالات سنقوم بتطبيق عزوم دخل  $1 Nm \approx 2.6 \times 0.39$  وهي قيمة عزم المحركات المستعملة مضروبة بنسبة النقل 2.6 التي سنتطرق إليها لاحقاً.

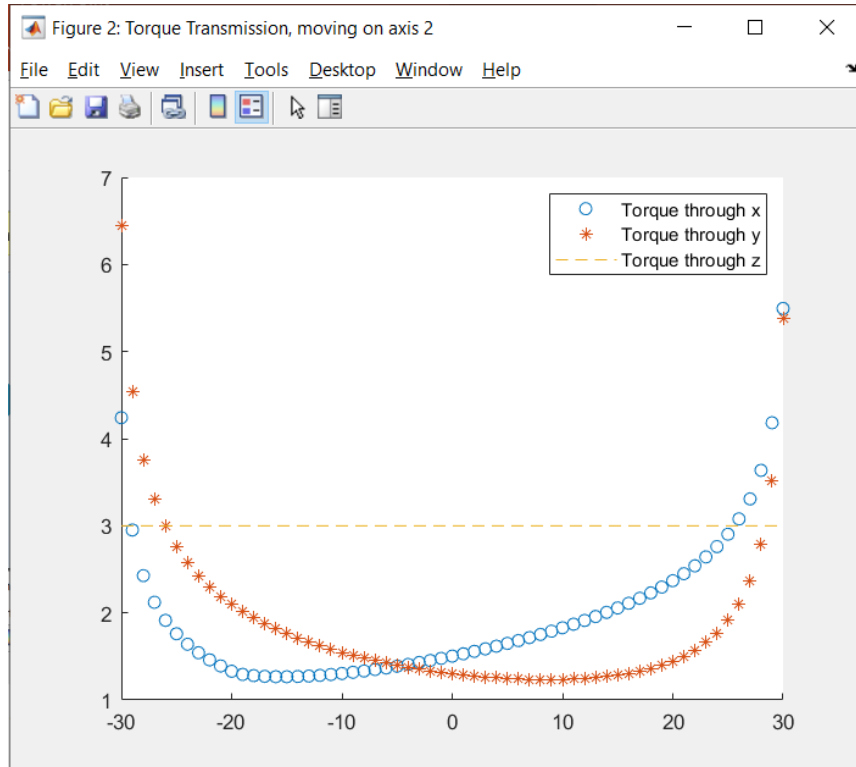
- بدايةً نقوم بتثبيت الزاويتين  $y = 0$  و  $z = 0$  ونقوم بالتحريك حول المحور  $x$  انطلاقاً من الزاوية  $-30^\circ$  حتّى الزاوية  $30^\circ$  فنحصل على المنحني الموضّح بالشكل (19).





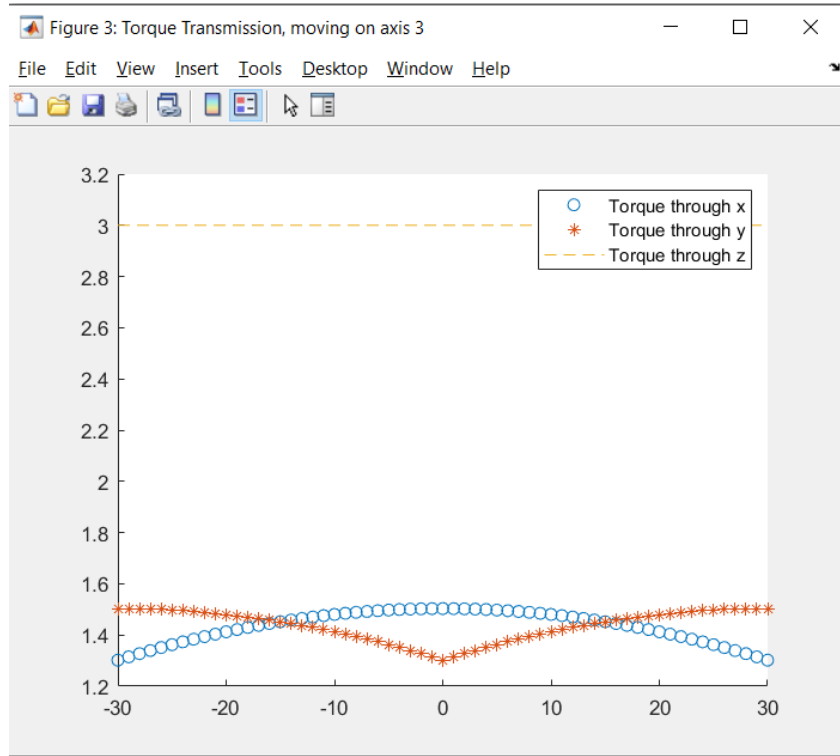
الشكل 17 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور  $x$

- ثم نقوم بتثبيت الزاويتين  $x = 0$  و  $z = 0$  ونقوم بتحريك المحور  $y$  انطلاقاً من الزاوية  $-30^\circ$  حتى الزاوية  $30^\circ$  فنحصل على المنحني الموضح بالشكل (20).



الشكل 18 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور  $y$

- أخيراً نقوم بتثبيت الزاويتين  $y = 0$  و  $x = 0$  ونقوم بالتحريك حول المحور  $z$  انطلاقاً من الزاوية  $-30^\circ$  حتى الزاوية  $30^\circ$  فنحصل على المنحني الموضّح بالشكل (21).



الشكل 19 نسب نقل العزوم حول المحاور الثلاثة عند الدوران حول المحور  $z$

**نتيجة 1:** نلاحظ من الشكل (19) أنّه بعد قيمة معيّنة للزاوية حول المحور  $x$  في الاتجاه الموجب نصل إلى حالة حدّية لا يوجد فيها حلّ منطقي حسب النموذج.

**نتيجة 2:** نلاحظ من الشكل (20) ارتفاع كبير بالنسبة لنقل العزم حول المحورين  $x$  و  $y$  عند طرفي المخطّط سببه الوصول لنقاط حدّية في الميكانيزم.

**نتيجة 3:** نلاحظ ثبات قيمة نقل العزم حول المحور  $z$  بغض النظر عن الموضع وهذه القيمة تساوي مجموع العزوم المقدّمة من المحركات الثلاثة وذلك منطقيّ بما أنّ الحركة حول المحور  $z$  هي مباشرة من حركة كلّ من المحركات الثلاثة سويّة وبدون تضخيم أو نقصان بالعزم.

**نتيجة 4:** نسب نقل العزم حول كلّ من المحورين  $x$  و  $y$  تتعلّق بالموضع ولكن لا تقلّ في أيّة حالة عن الواحد حيث أنّ المحركات دوماً تتشارك الحمل المطبّق وهو ما يميّز الميكانيزم المستخدم.

**الخلاصة:** لم نستطع من خلال المحركات المستخدمة تأمين العزوم المطلوبة حسب دفتر الشروط وذلك بسبب أنّ عزم المحرك الواحد من المحركات المستخدمة  $0.4 \text{ Nm}$  وهو غير كافٍ لتحقيق العزم المطلوب على الخرج. إلّا أنّنا نلاحظ تشارك المحركات للأحمال المطبّقة ممّا يوافق كلّ من الدراستين المرجعيّة والنظريّة للميكانيزم.

## الفصل الخامس

### 5. التصميم الميكانيكيّ

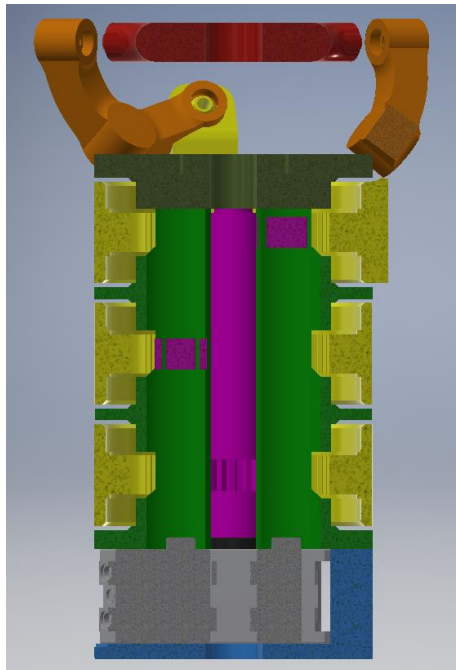
## 5.1 التصميم النهائي بعد التجميع

يوضح الشكل (22) التصميم النهائي بعد التجميع.



الشكل 20 التصميم النهائي بعد التجميع

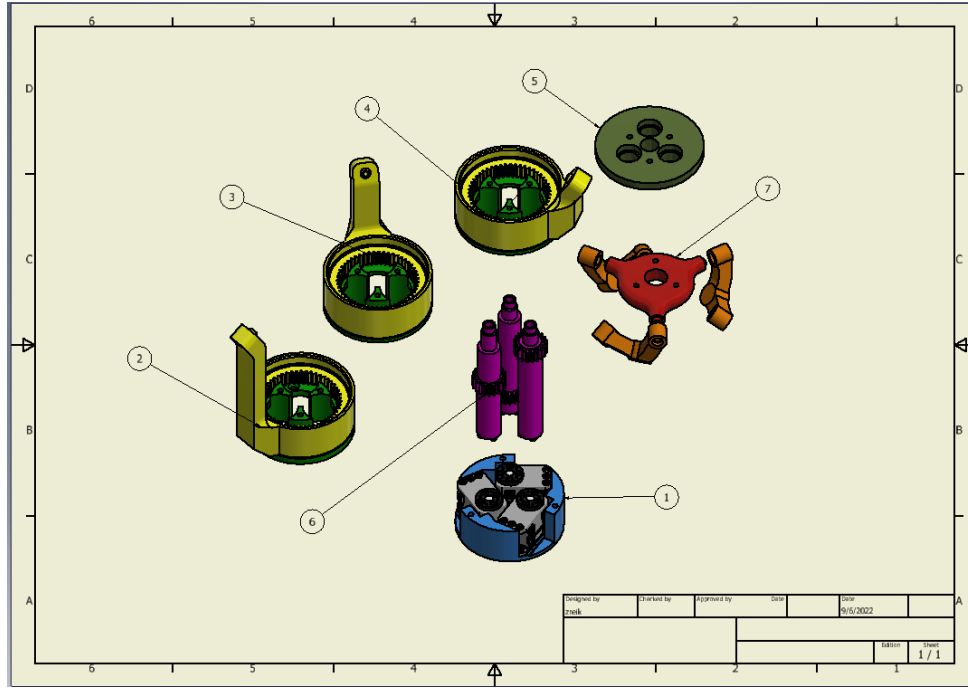
أما الشكل (23) فيوضح البنية الداخلية للتصميم ومضاجع الرولمانات والمستنات الداخلية عن طريق مقطع طولي في التصميم ككل.



الشكل 21 مقطع طولي في التصميم

## 5.2 المخطط الانفجاري للتصميم

يوضح الشكل (24) المخطط الانفجاري للتصميم النهائي مع أرقام الكتل موضحة عليه.



الشكل 22 المخطط الانفجاري للتصميم مع أرقام الكتل

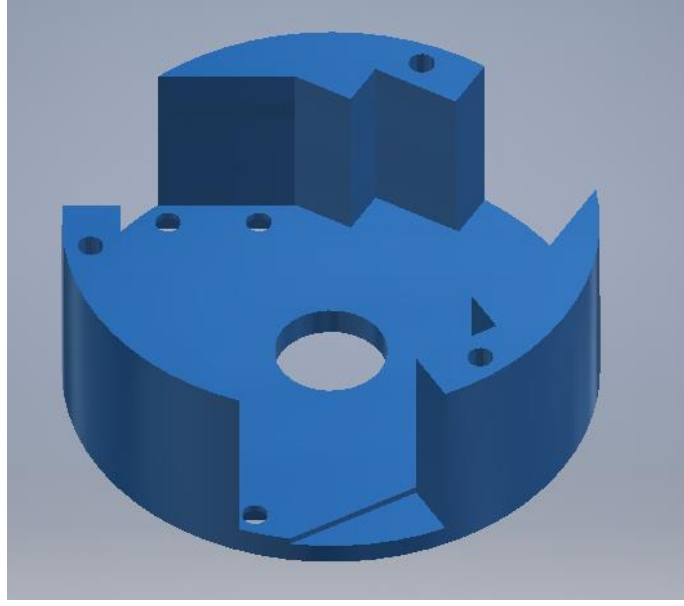
يبين الجدول (3) أرقام الكتل مع أسمائها ووظائفها.

| رقم الكتلة | اسم الكتلة     | الوظيفة                                    |
|------------|----------------|--|
| 1          | القاعدة        | تثبيت المحركات مع بعضها                    |
| 2          | الطبقة الأولى  | تأمين حركة الرابطة الأولى                  |
| 3          | الطبقة الثانية | تأمين حركة الرابطة الثانية                 |
| 4          | الطبقة الثالثة | تأمين حركة الرابطة الثالثة                 |
| 5          | الغطاء         | تثبيت الطبقات مع بعضها ودعم محاور المحركات |
| 6          | محاور المحركات | نقل العزم من المحركات إلى الطبقات الخاصة   |
| 7          | ميكانيزم SPM   | تأمين الحركة وفق رابطة كروية               |

الجدول 3 أرقام الكتل مع أسمائها ووظائفها

### 5.3 القطع الإفرادية

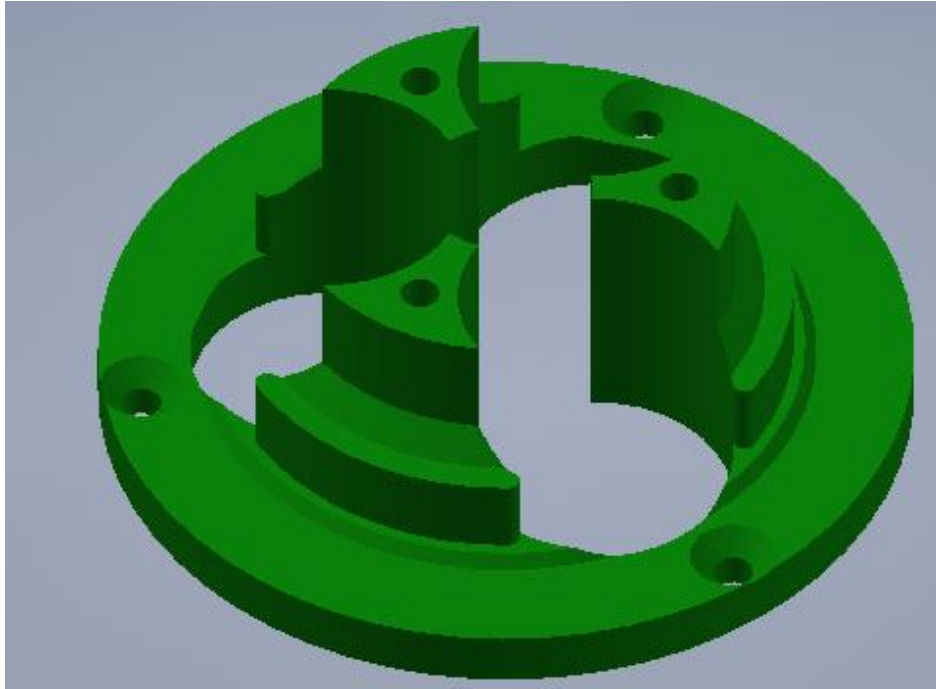
- تم تصميم القاعدة بالتصميم لتثبيت المحركات بأقرب ما يمكن من بعضهم البعض وبإزاحة بزاوية  $120^\circ$  كما تحتوي القاعدة ثلاثة ثقوب مخصصة للتثبيت مع الطبقة الأولى بالإضافة إلى مكان مخصص لدخول الصامولة من الأسفل وثقب في الوسط لمرور الأسلاك الكهربائية. يبين الشكل (25) التصميم النهائي للقاعدة.



الشكل 23 التصميم النهائي للقاعدة

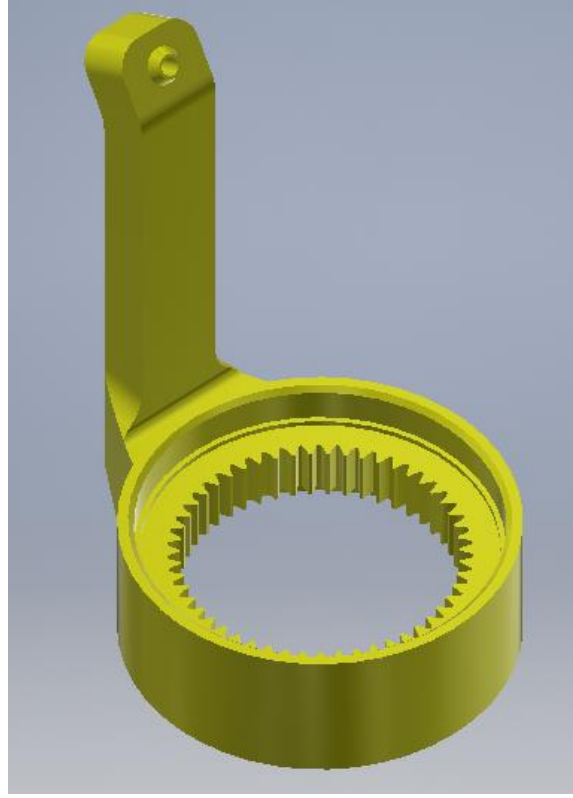
• تتألف الطبقة الأولى من قطعتين:

- القطعة الأولى هي قاعدة الطبقة وتحتوي ثقب تثبيت مع قاعدة المحركات بالإضافة إلى أماكن مخصصة لوضع صواميل تثبيت الطبقات الثلاث مع بعضها. أما الوظيفة الأساسية لهذه القطعة فهي تأمين رابطة دورانية بكونها محور بقطر يحقق ازدواج m5 مع رولمان يدخل في المحور بالطرق الخفيف فتؤمن دوران المسنن الداخلي بحرية فوقها، ويتم ذلك عن طريق كتف رولمان يضغط على الحلقة الداخلية له بحيث تحتوي قطعة المسنن على كتف يضغط على الحلقة الخارجية. يوضح الشكل (26) قاعدة الطبقة الأولى.



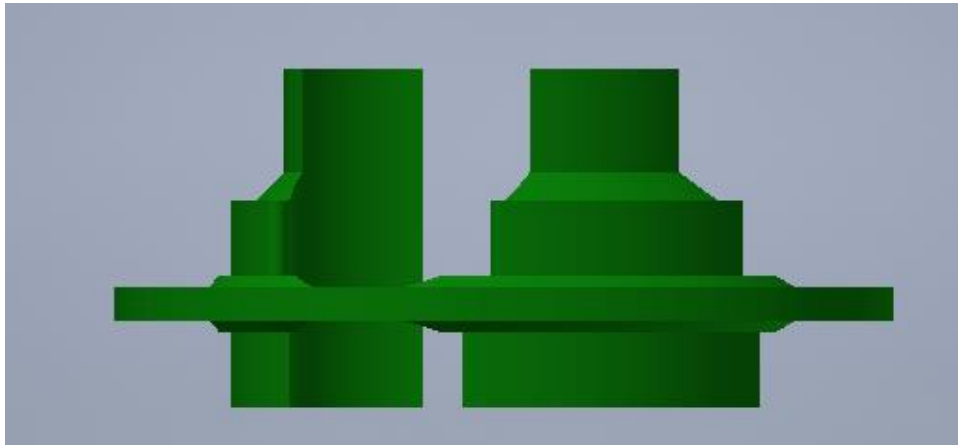
الشكل 24 قاعدة الطبقة الأولى

○ أما القطعة الثانية فهي المسنن الداخلي والذي يرتبط مع قاعدة الطبقة الأولى من جهة ومع قاعدة الطبقة الثانية من جهة أخرى عن طريق مضجعي رولمان مع أكتاف تضغط على كل من الحلقين الخارجيين لهما، بين هذين المضجعين المسنن الداخلي الذي يتحرك بفعل المسنن المرتبط مع محور المحرك ليؤدي هذا الدوران لتحريك روابط الميكانزم SPM. يبين الشكل (27) هذه القطعة.



الشكل 25 مسنن الطبقة الأولى

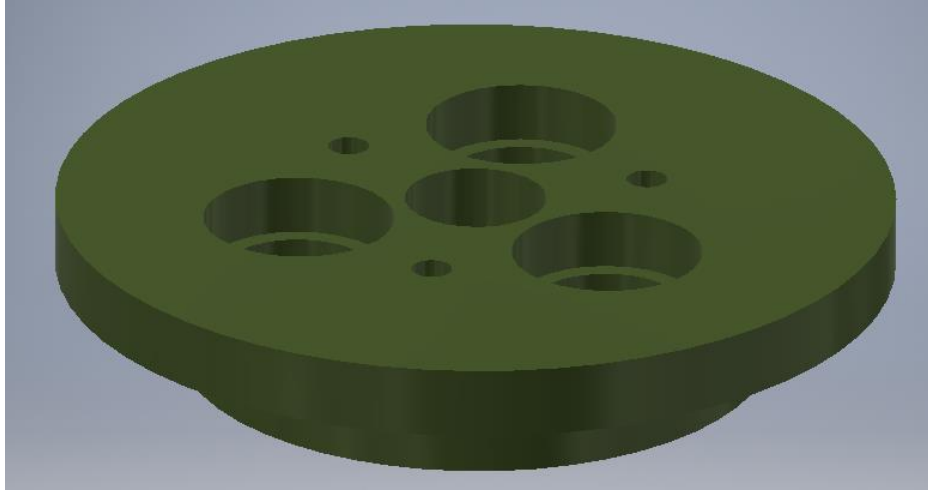
● تتألف كل من الطبقتين الثانية والثالثة من قطعتين أيضاً بشكل مشابه للطبقة الأولى مع اختلاف طول ذراع المسنن الداخلي بين كل من الطبقات. بالإضافة إلى أن قاعدة كل من هاتين الطبقتين تحتوي على محورين يدخلان برولمانين ليتم الربط بين الطبقات كم هو موضح بالشكل (28).



الشكل 26 قاعدة كل من الطبقتين الثانية والثالثة

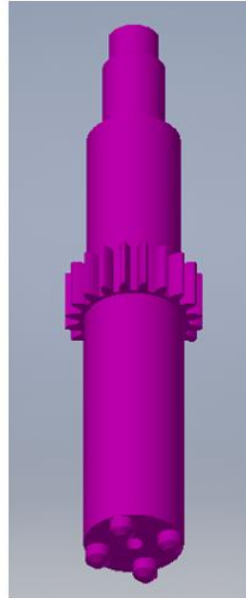


- تتألف قطعة الغطاء من محور يدخل بالحلقة الداخليّة لرولمان الطبقة الأخيرة مع كتف يضغط على هذه الحلقة بالإضافة إلى ثلاثة مضاجع رولمانات لتثبيت محاور المحرّكات وثلاثة ثقوب لتأمين تثبيت الطبقات الثلاثة مع بعضها البعض. يبيّن الشكل (29) تصميم قطعة الغطاء.

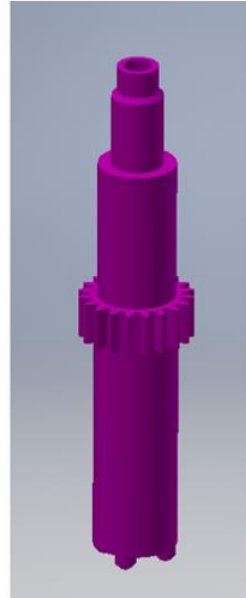


الشكل 27 تصميم قطعة الغطاء

- يوجد ثلاثة محاور للمحرّكات يتألف كلّ منها من محور يصل من محور المحرّك من جهة إلى رولمان التثبيت في قطعة الغطاء من جهة أخرى، على هذا المحور مسنّن يتعشّق مع المسنّن الداخلي في طبقة من الطبقات الثلاث تتحدّد ببعد المسنّن عن سطح المحرّك. فكلّ طبقة لها محور ذو بعد للمسنّن موافق لارتفاع المسنّن الداخلي لها. يبيّن الشكل (30) – ب طريقة وصل المحور مع المحرّك والشكل (30) – أ وصل المحور مع الرولمان.



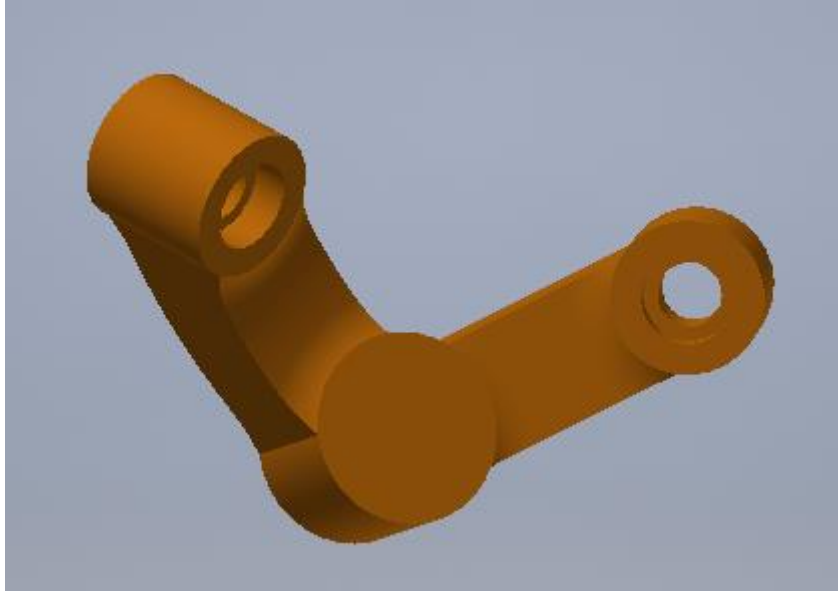
(ب)



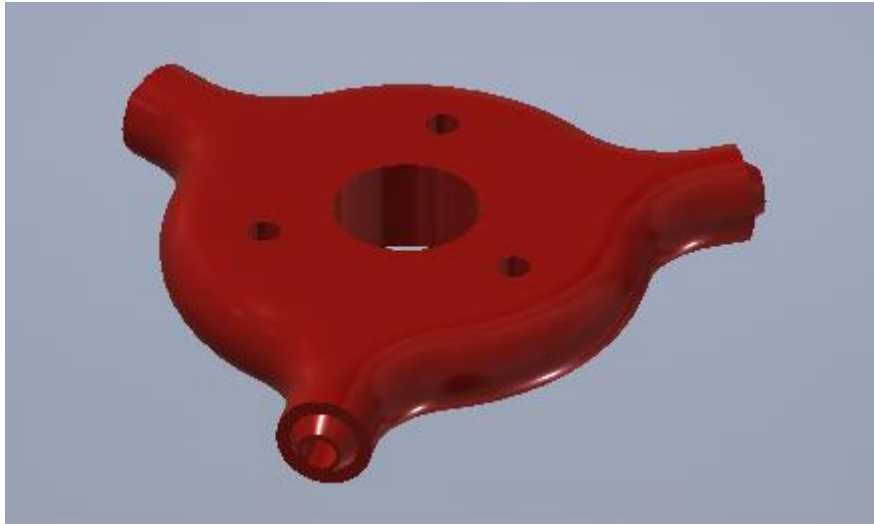
(أ)

الشكل 28 محور المحرّك

- وأخيراً الميكانيزم SPM ويتألف من ثلاثة روابط موضحة بالشكل (31) كل منها يحقق رابطتين دورانيتين بوجود مضاجع للرولمانات فيها، رابطة دورانية بين الرابطة وذراع مسنن كل من الطبقات الثلاث والأخرى بين الرابطة والقطعة الأخيرة في التصميم وهي منصّة الخرج الموضحة بالشكل (32). وتحقق هذه الروابط زوايا تصميمية للميكانيزم تم اختيارها بما يلائم الزوايا المدروسة في الدراسة النظرية. أمّا منصّة الخرج فتحتوي أكتافاً تضغط على الحلقات الداخلية للرولمانات الموجودة في الرابطة كما تحتوي ثقب تثبيت لتأمين القدرة على إضافة أداة طرفية أو كاميرا على المنصّة.



الشكل 29 الرابطة في ميكانيزم SPM

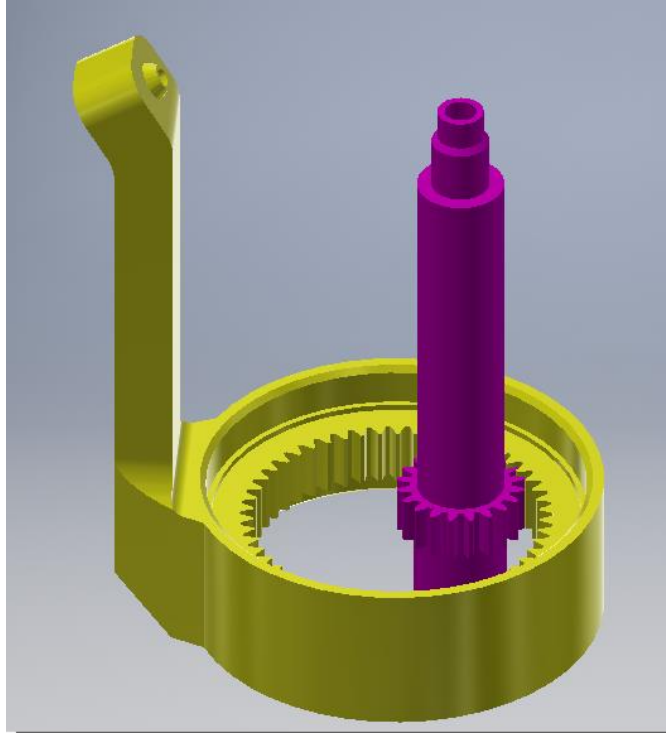


الشكل 30 منصّة الخرج في ميكانيزم SPM

#### 5.4 تصميم المستنات

تم اختيار المستنات بـ 1mm Module المناسب للطباعة على الطابعة ثلاثية الأبعاد واختيار نسبة نقل للعزم قريبة من 2.5 فكان وحسب المسافة المركزية المفروضة أقرب نسبة نقل يمكن تحقيقها

هي  $2.6 = \frac{52}{20}$  وعلى هذا الأساس تمّ توليد المسنّنين الموافقين وبناء القطعتين عليهما كما هو موضّح بالشكل (33).

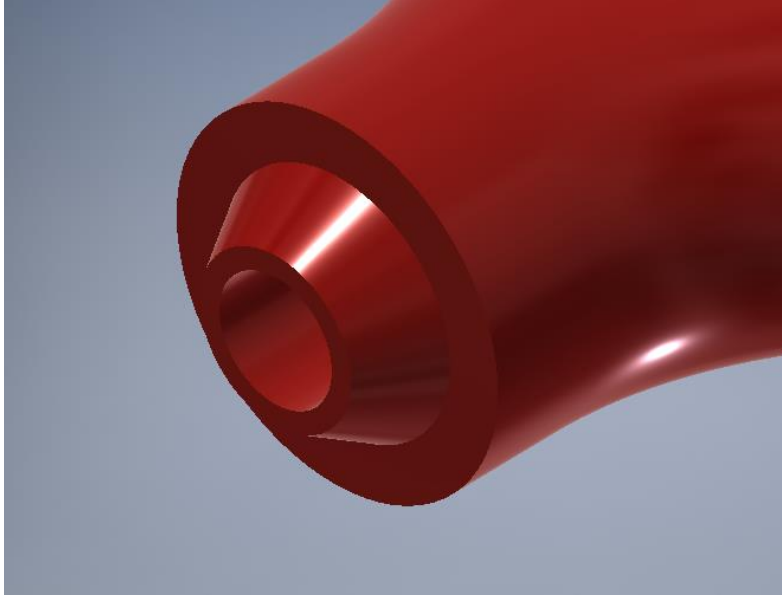


الشكل 31 تصميم المسنّنين وتعشييقهما معاً

## 5.5 اختيار الرولمانات

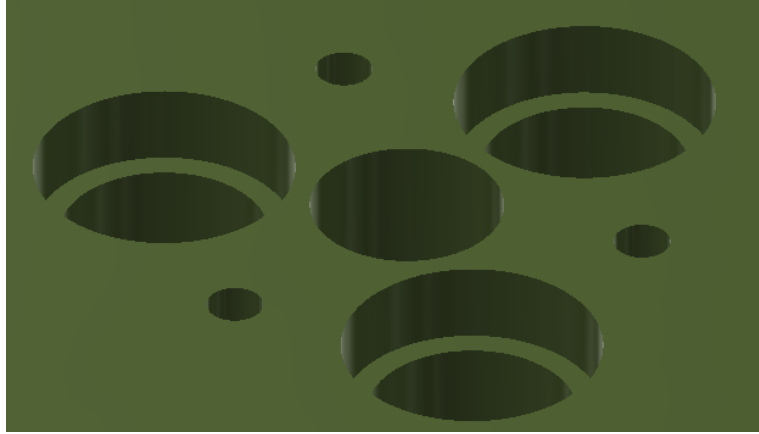
إنّ الرولمانات المستخدمة في حالتنا لها وظيفة شكلية وظيفية فكان الاختيار الأساسي هو حسب القطر الداخلي والخارجي لكل منها وليس متعلّقاً بشكل مباشر بالحمولات المفروضة حيث أنّنا نتعامل مع حمولات صغيرة نسبةً للحمولات التي تتحمّلها هذه الرولمانات.

- تحقيق الرابطة الدورانية عند قطعة الوصل بين المنصّة والمفعلات: تمّ استخدام رولمانات *Reely RC car ball bearing*، بقطر داخلي  $3\text{ mm}$  وقطر خارجي  $7\text{ mm}$  وسماكة  $3\text{ mm}$ . تتحمّل هذه الرولمانات حسب النشرة الخاصة بها حمولات قطرية تصل لـ  $112\text{ N}$  وهي حمولات أكبر بكثير من الحمولات المفروضة لدينا. ومن أجل تأمين التمحور وعدم حدوث تداخل في المحور تم وضع رولمانين في القطعة بينهما كتف يضغط على الحلقة الخارجية لكلّ من الرولمانين، أمّا في كل من المنصّة والمفعلات فتتمّ تصميم النهاية بحيث تعمل عمل رنديلة تضغط على الحلقة الداخلية لكلّ من الرولمانين كما هو موضّح بالشكل (34).



الشكل 32 توضّح الرولمانات في قطعة الوصل بين المنصّة والمفعلات

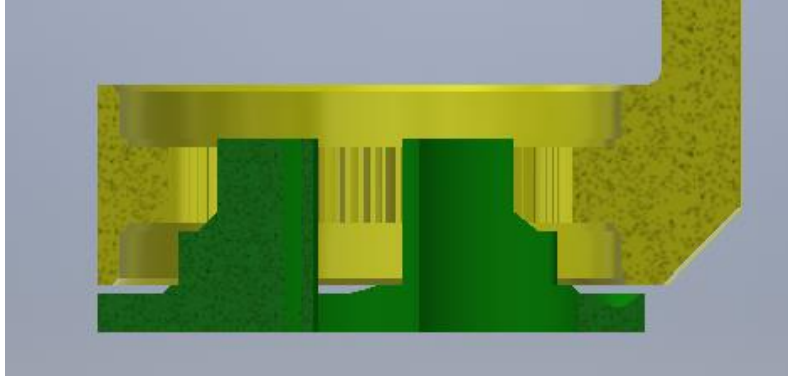
- تثبيت محاور المسنّنات: لم يكن هناك داع لوجود رولمان في بداية المحور عند المحرّك إذ أنّنا استخدمنا قطعة تثبيت المحرّك ذاتها لتثبيت محور المسنّن، أمّا من نهاية المحور فكان لا بدّ من وجود رولمان يؤمّن تثبيت نهاية المحور. من أجل تحقيق هذه الوظيفة تمّ استخدام رولمان *688-2RS Ball Bearing*، بقطر داخلي  $8\text{ mm}$  قريب من قطر المحور وقطر خارجي  $16\text{ mm}$  مناسبة لقطر الغطاء وسماكة  $5\text{ mm}$ . أمّا بالنسبة للحمولات التي تتحمّلها هذه الرولمانات فهي أيضاً حمولات أكبر بكثير من الحمولات التي تتعرّض لها في حالتنا فهي تتحمّل  $590\text{ N}$  كحمل قطري ستاتيكي. يوضّح الشكل (35) مضاجع الرولمانات المخصّصة لها في قطعة الغطاء.



الشكل 33 مضاجع الرولمانات في الغطاء

- ربط كل من قواعد الطبقات الثلاث ومسنّاتها مع بعضها البعض: من أجل تحقيق هذا الوصل وتأمين الرابطة الدورانية في كل من طبقات الميكانيزم لا بدّ من وجود رولمانين لكل طبقة، تستند الحلقات الخارجية لهذه الرولمانات على أكتاف موجودة في قطعة المسنّن

والداخلية على أكتاف موجودة في قطعة القاعدة للطبقة وبذلك تتحقق رابطة دورانية تؤمن الحركة المطلوبة للقطعة ذات المسنن الداخلي عند تدويرها من قبل المسنن المرتبط بمحور المحرك. تم اختيار الرولمانات لهذه الوظيفة بحيث يتسع القطر الداخلي للرولمان محاور المحركات الثلاثة ويكون القطر الخارجي أصغرياً بحيث لا يزيد من حجم المنظومة كثيراً. وبذلك يكون الرولمان الأنسب لهذه الوظيفة *6810 RS Ball Bearing* ذو القطر الخارجي  $65\text{ mm}$  والقطر الداخلي  $50\text{ mm}$  والسماكة  $7\text{ mm}$ . كما الحال في الرولمانات السابقة فإن الحمل القطري الذي يتحمله هذا الرولمان  $6100\text{ N}$  وهو كافٍ لأداء الوظيفة المطلوبة. يوضح الشكل (36) آلية تحقيق الرابطة الدورانية في طبقة من الطبقات.



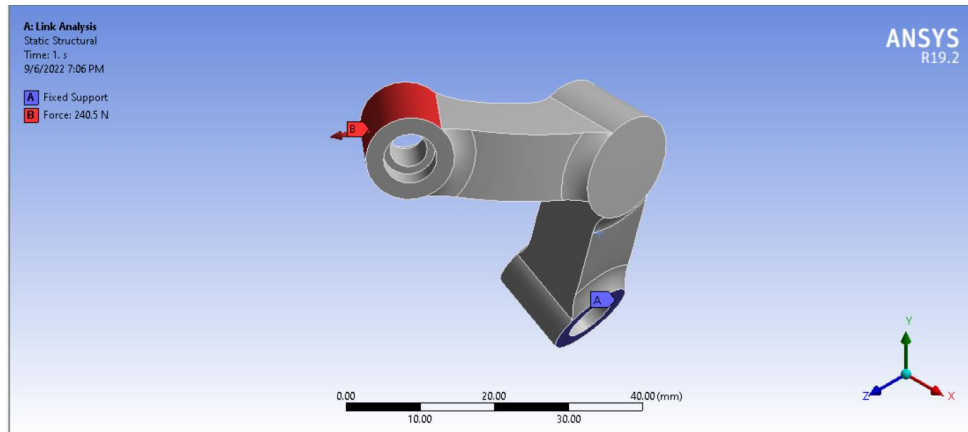
الشكل 34 آلية تحقيق الرابطة الدورانية في طبقة من الطبقات الثلاث

## 5.6 الدراسة العددية باستخدام برنامج ANSYS

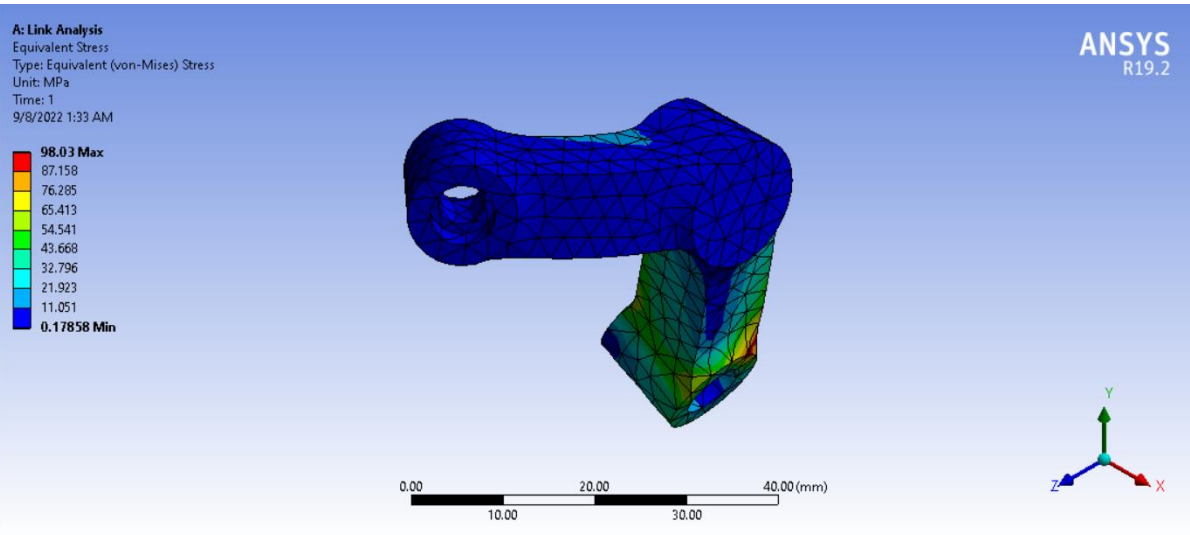
سيتم في هذه الدراسة اعتماد مادة *Aluminum Alloy* الخفيف الوزن والسهل التصنيع والتشغيل، للتحقق من متانة بعض القطع التي تتعرض للإجهادات عن طريق دراسة عامل الأمان عليها، بالإضافة لدراسة التشوهات الحاصلة على بعض القطع التي يهمل فيها عدم التدلي.

### • دراسة متانة قطع الوصل

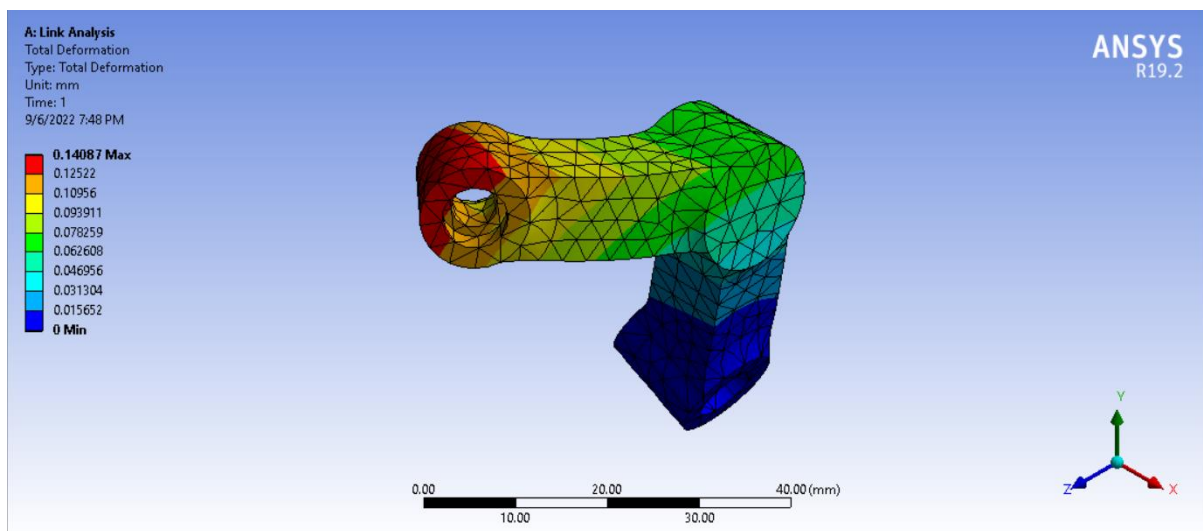
سنقوم بتثبيت القطعة من الرابطة الدورانية المرتبطة بذراع المسنن وندرس تأثير انتقال كامل العزم بقيمة  $6.5\text{ Nm}$  بذراع  $37\text{ mm}$  أي بقوة  $240.5\text{ N}$  عبر رابطة واحدة كما هو موضح بالشكل (37)، وكان الإجهاد الأعظمي كما هو موضح بالشكل (38)، والتشوه الأعظمي بالشكل (39) وعامل الأمان كما هو موضح بالشكل (40).



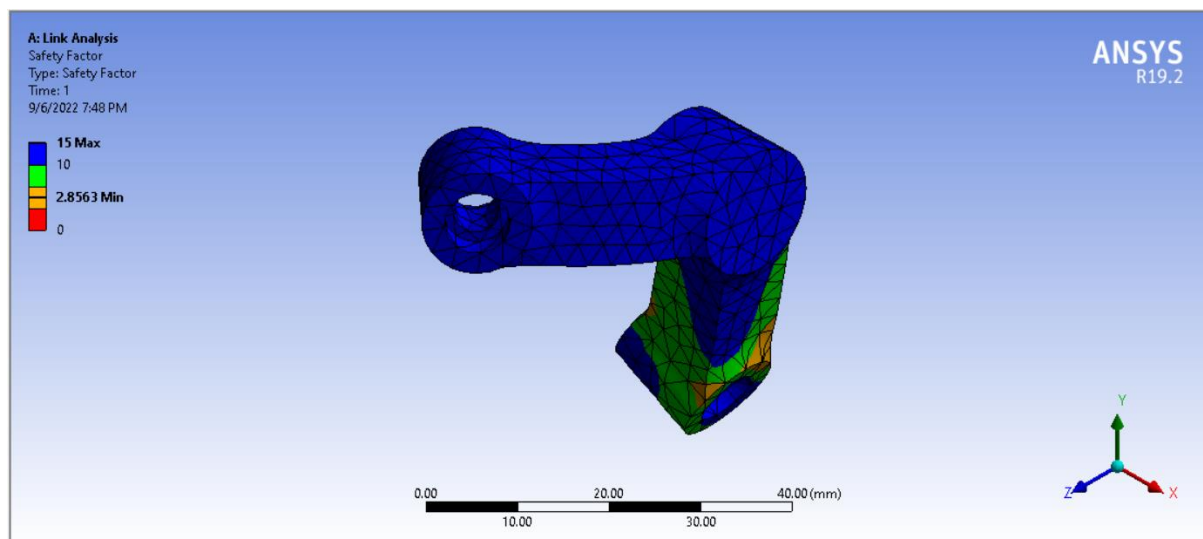
الشكل 35 القوة ومكان تثبيت قطعة الوصل عند الدراسة على ANSYS



الشكل 36 نتائج الإجهادات على قطعة الوصل



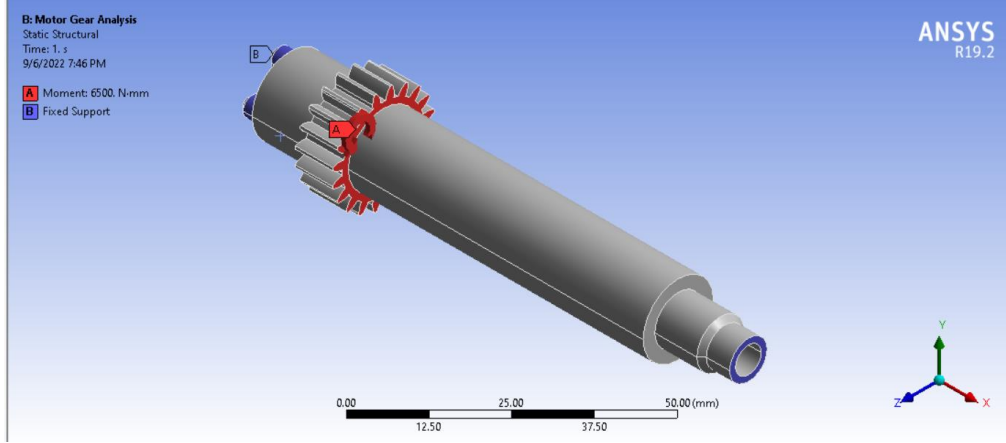
الشكل 37 نتائج التشوه على قطعة الوصل



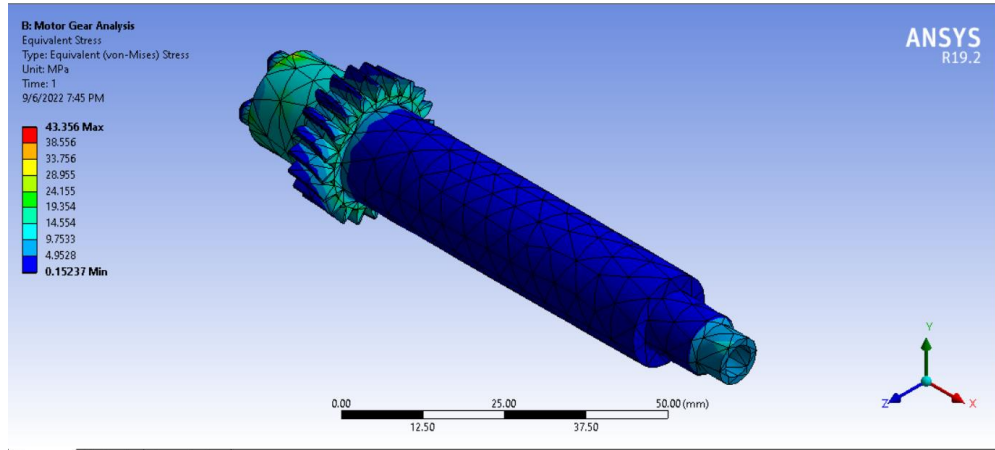
الشكل 38 نتائج عامل الأمان على قطعة الوصل

## • دراسة متانة المحاور

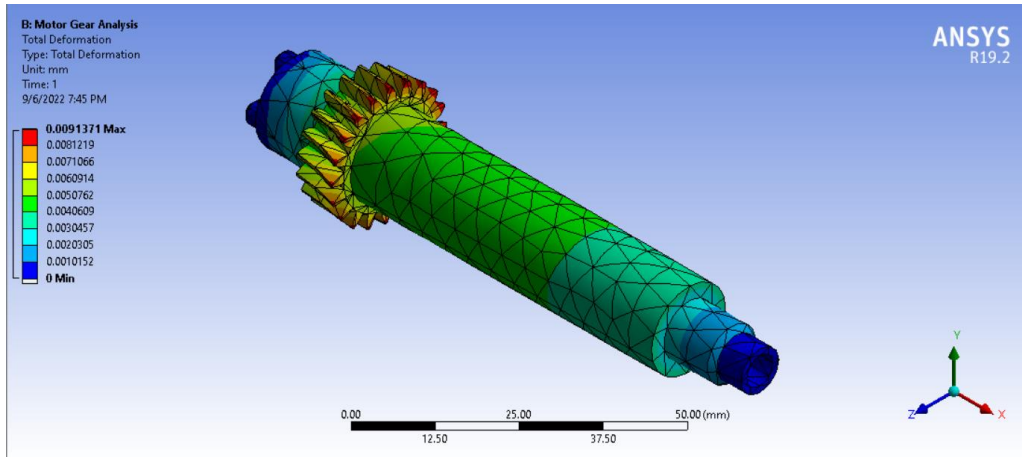
سنقوم بتثبيت المحور من الطرفين ونقوم بتطبيق عزم  $6.5 \text{ Nm}$  على محوره كما هو موضح بالشكل (41) للتأكد من قدرته على نقل العزم المطلوب فكانت النتائج كما في الأشكال (42) و (43) و (44). لم نقم هنا بدراسة متانة المسنّات وتحملها للقوى المؤثرة على الأسنان حيث أنّ العزوم المنقولة عبر هذه المسنّات هي صغيرة نسبياً.



الشكل 39 العزم ونقاط التثبيت في محور مسنّن المحرك

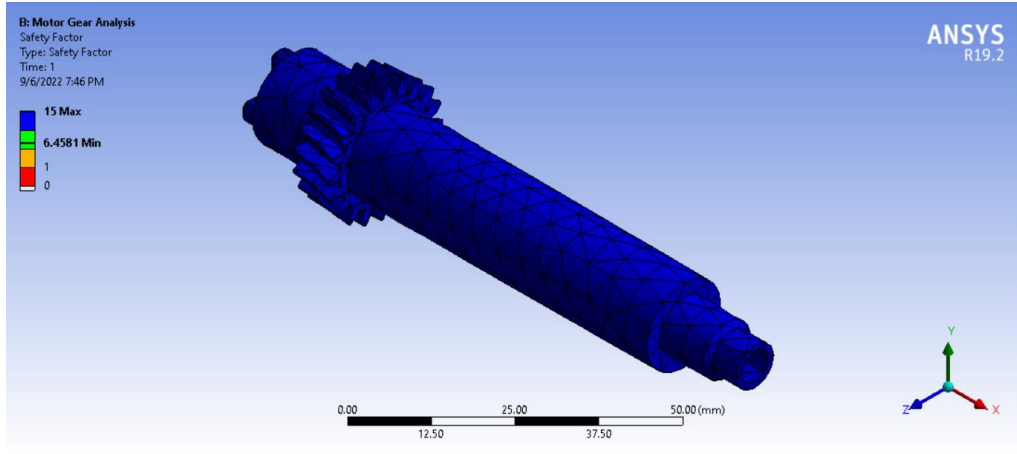


الشكل 40 نتائج الإجهادات على محور المحرك



الشكل 41 نتائج التشوّه على محور المحرك

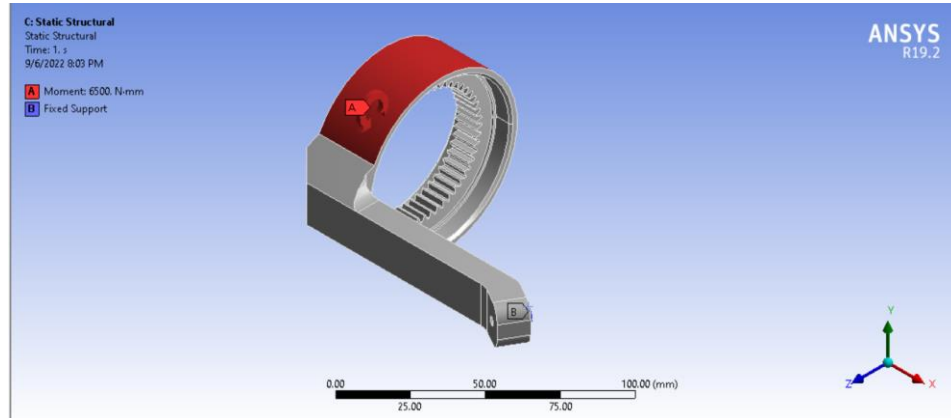




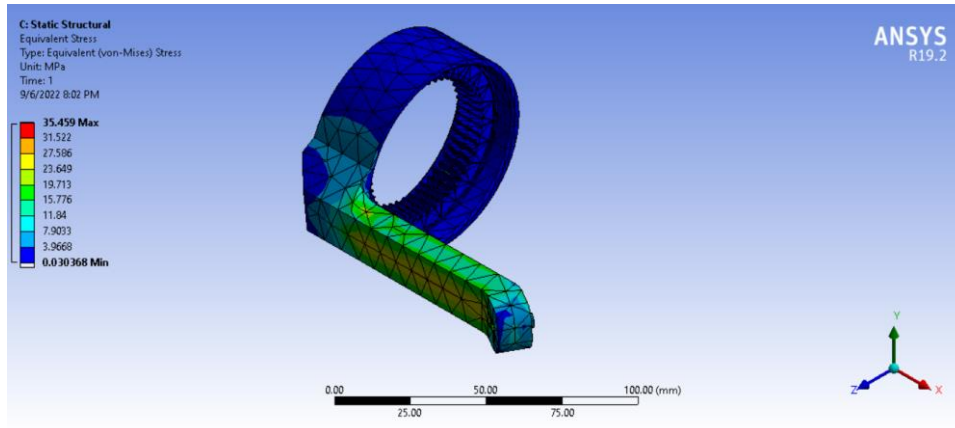
الشكل 42 نتائج عامل الأمان على محور المحرك

### • دراسة متانة وتشوهات مسنّات الطبقات

سنقوم لهذه الدراسة بتثبيت المسنّن من نهاية الذراع الخاصة به وتطبيق كامل العزم  $6.5 \text{ Nm}$  على محور المسنّن، ويهمّنا في هذه الدراسة التشوّه الحاصل على الذراع حيث أنّ هذا التشوّه سيؤثر على دقّة التوجيه للمنصّة. يوضّح الشكل (45) كيفية وضع الحمل ومكان التثبيت، أمّا الأشكال (46) و(47) و(48) فتبيّن النتائج العددية للدراسة.

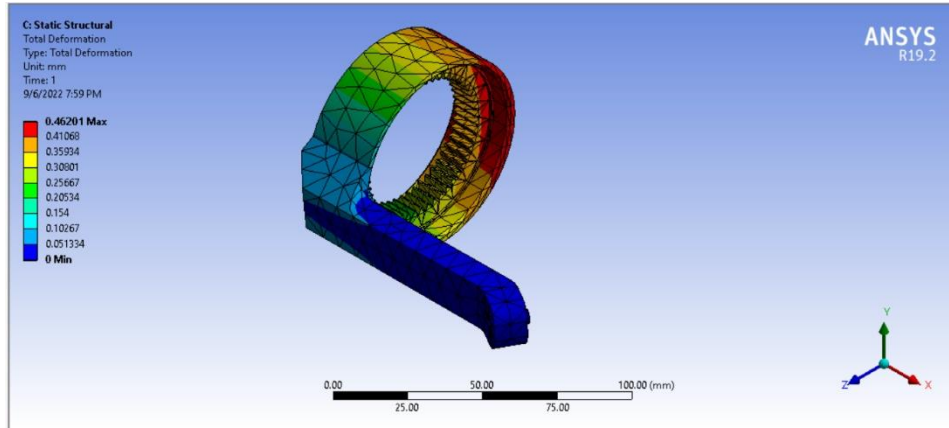


الشكل 43 نقطة التثبيت والحمل على مسنّن الطبقة الأولى

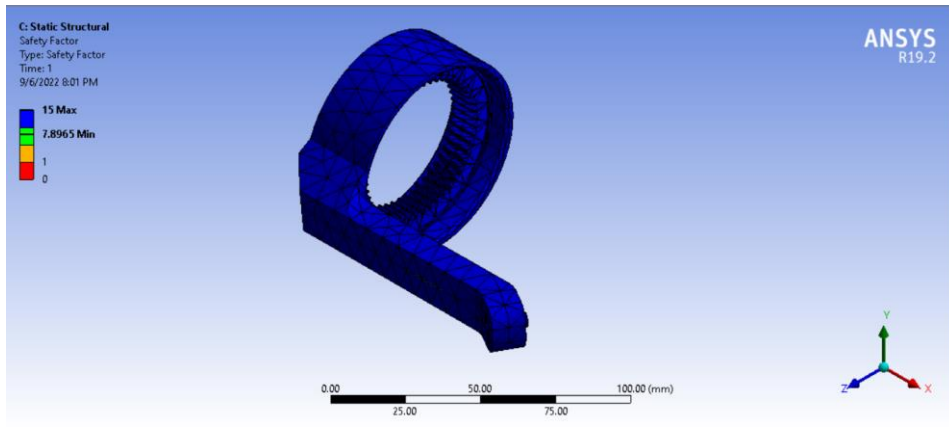


الشكل 44 نتائج الإجهادات على مسنّن الطبقة الأولى





الشكل 45 نتائج التشوه على مسنن الطبقة الأولى



الشكل 46 نتائج عامل الأمان على مسنن الطبقة الأولى

**نتائج:** الإجهادات التي تتعرض لها القطع مقبولة بما أن أقل عامل أمان تعرضت له هذه القطع هو 2.86، وتشوه قطعة المسنن  $0.4 \text{ mm}$  هو تشوه مقبول بحيث يكون الخطأ في توجه المنصة من رتبة الدرجة.

الفصل السادس  
6. الدارة الإلكترونية

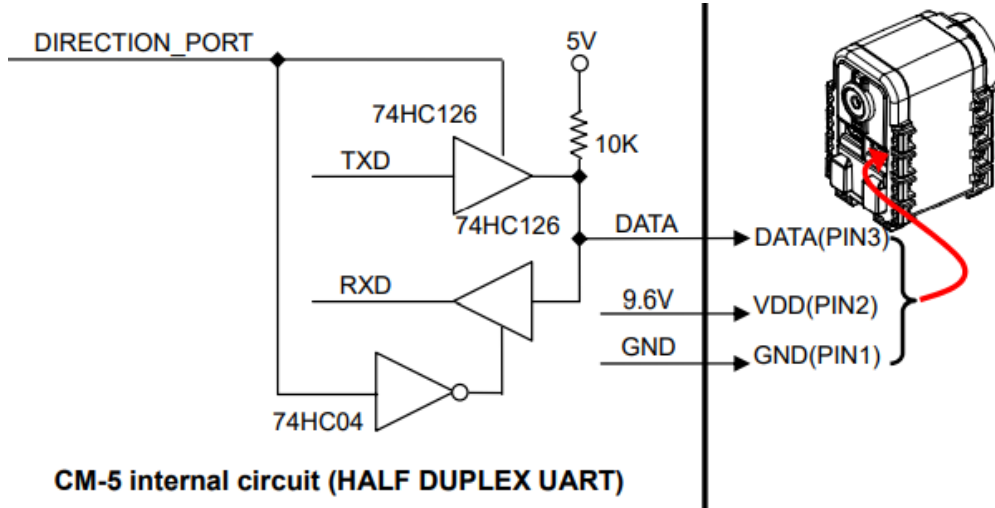
## 6.1 المتحكم الأساسي

بما أننا نريد تواصل تسلسلي مع المحركات *XL320* فإننا سنستخدم متحكم *Arduino Nano* كما ذكرنا في التحليل الوظيفي، من أجل القيام بعمليات القراءة والكتابة من هذه المحركات.

## 6.2 التواصل مع المحركات

إن المحركات المستخدمة تحوي على ثلاثة خطوط وهي على الترتيب *Data, Vdd, Gnd*. خطان للتغذية وخط وحيد لنقل الأوامر والقراءة من المحرك.

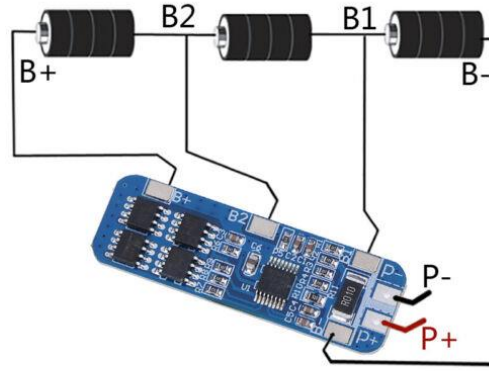
من أجل القيام بالقراءة والكتابة لا بدّ من وجود دائرة لتحديد متى نريد القراءة من المحرك ومتى نريد الكتابة عليه. هذه الدائرة تتألف من *Tri-Buffer* ينقل المعلومات من *Tx* المتحكم إلى *Data Pin* للمحرك عند تفعيله بإشارة *Enable* و *Tri-Buffer* آخر يقوم بنقل المعلومات من *Data Pin* للمحرك إلى *Rx* المتحكم عند تفعيله بإشارة *Enable* وبالتالي بإمكاننا أن نحدّد متى نريد القراءة من المحرك ومتى نريد الكتابة عليه عن طريق تحديد إشارة *Enable*. يوضّح الشكل (49) الدائرة التي سنستخدمها لتحقيق المطلوب. سنستخدم من أجل هذه الدائرة *IC T74LS241* والذي يحوي على ثمانية دارات *Tri-Buffer* أربعة منها موصولة على *En* والأربعة الأخرى موصولة على  $\overline{En}$  داخلياً.



الشكل 47 دائرة التحكم بجهة إشارة التواصل مع المحركات

## 6.3 التغذية

من أجل تأمين التغذية عن طريق بطاريات قابلة للشحن تمّ استخدام ثلاثة بطاريات *Lithium-Ion* 3.7V موصولة على التسلسل نغذي منها كل من المتحكم و *IC* الخاص بدارة التواصل مع المحركات والمحركات الثلاثة. نقوم بشحن هذه البطاريات عن طريق دائرة الشحن المتوافرة بالسوق المخصصة لشحن ثلاثة بطاريات ليثيوم (*BMS – 3S (Battery Management System – 3 Serial)*). يوضّح الشكل (50) هذه الدائرة مع طريقة وصلها مع البطاريات.

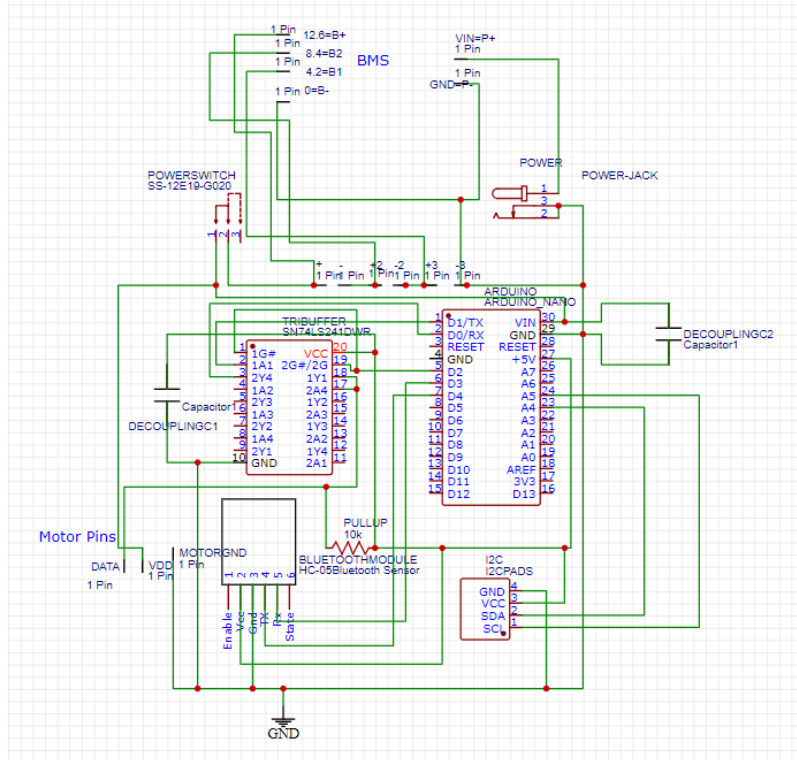


الشكل 48 دائرة BMS - 3S المستخدمة لشحن البطاريات

نقوم بتغذية المحركات *Dynamixel AX-12A* والمتحكم *Arduino Nano* مباشرة من خرج دائرة *BMS*، أما الـ *IC* فنقوم بتغذيته من *5V Pin* الخاص بالـ *Arduino* للحصول على *5V* مستقرة. أما مدخل دائرة الشحن فيوصل على *Power Jack* بحيث تتم تغذيته خارجياً من أي منبع تغذية.

#### 6.4 الدارة الكلية

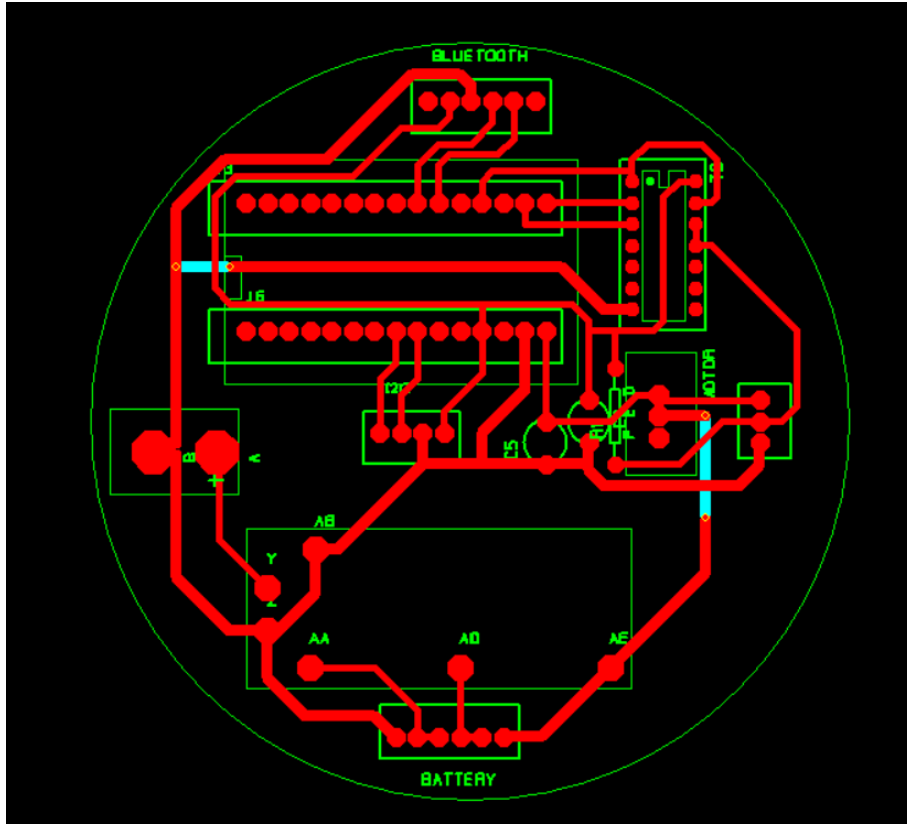
يوضح الشكل (51) مخطط *Schematic* للدائرة الكلية التي تم بناؤها.



الشكل 49 مخطط الدارة المستعملة للتحكم بالمحركات وتغذيتهم

أما الشكل (52) فيوضح بناء ملف الدارة المطبوعة التي قمنا بطلبها المبني على برنامج

*CadStar*.



الشكل 50 ملفت الدارة المطبوعة على برنامج CadStar

**ملاحظة:** كان المحرك الذي نريد استخدامه *Dynamixel AX-12A* بدايةً وتمّ تصميم الدارة على هذا الأساس ولكن لعدم توافره تمّ تعديل التصميم ليتلاءم مع محركات *XL320* إلّا أننا لم نصمّم دارة جديدة لهم.

## الفصل السابع

### 7. الكود البرمجي

## 7.1 تقسيم الكود البرمجي

ينقسم الكود البرمجي إلى قسمين أساسيين، الأول يهتم بالتحكم بالمحركات وإعطاء الأوامر الحركية وتفسير الأوامر القادمة من المستخدم. أما القسم الثاني فيهتم بشكل أساسي ببرمجة النموذجين الحركي المباشر والهندسي العكسي للقيام بعمليات حساب الزوايا المطلوبة من المحركات بالإضافة إلى العزم المنقولة في الأوضاع التي يقوم المستخدم بإدخالها عن طريق الواجهة التخابطية.

## 7.2 برمجة المتحكم Arduino Nano

من أجل التحكم بالمحركات XL320 عن طريق Arduino Nano تم استخدام مكتبة XL320.h المتاحة على بيئة Arduino IDE لإعطاء أوامر التحكم بالسرعة والعزم والموضع للمحركات الثلاثة. فانقسم كود Arduino C إلى عدة توابع:

- تابع `getValue(String, char, int)` الذي يأخذ كدخول سلسلة محرفية ومحرف معين ودليل، فيعيد القيمة الموجودة في السلسلة بعد تكرار المحرف عدد مرات يساوي الدليل المدخل. يفيد هذا التابع بتفسير الرسائل التي تصل للتحكم عن طريق واجهة المستخدم وتحويلها إلى قيم مفيدة لمواقع المحركات.
- تابع `MovePos(int, int)` الذي يأخذ كدخول دليل المحرك المطلوب والموضع الذي نريد الانتقال إليه فيقوم بتحريك المحرك المراد.
- بعض توابع الاختبار كالتابع `LED` الذي يضيء محرك محدد بلون محدد للتأكد من وصول التعليمات بشكل صحيح.
- تابعي تحديد السرعة والعزم المرادين من المحركات.

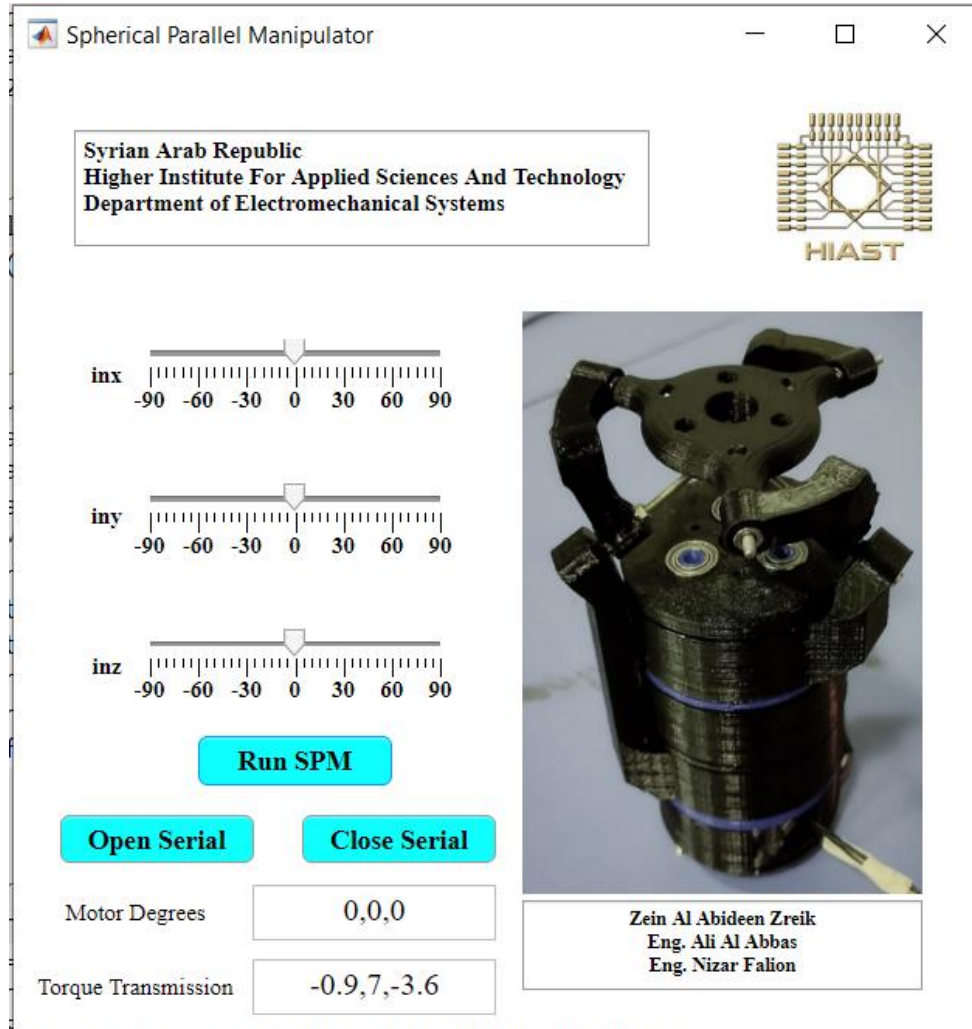
أما حلقة البرنامج الأساسية فتقوم بفحص الـ `Serial` الخاص بالتحكم على الدوام، عند وصول رسالة ما يقوم البرنامج بترجمتها إلى مواضع للمحركات وإرسال هذه الأوامر للمحركات عن طريق `SoftwareSerial` ليتم تمييزه عن `Serial` الخاص بالتواصل مع الواجهة التخابطية.

## 7.3 برمجة واجهة المستخدم ونموذج الميكانيزم

ينقسم كود Matlab إلى ثلاثة أقسام أساسية:

- تابع حساب النموذج العكسي للميكانيزم، يأخذ كدخول التوجيهات المطلوبة على المحاور الثلاثة ويعيد الزوايا المطلوبة من كل من المحركات الثلاثة لتحقيق هذا التوجه.
- تابع حساب نقل العزم عبر الميكانيزم، يأخذ أيضاً كدخول له التوجيهات المطلوبة ولكن يعيد نسبة نقل العزم وفق كل من المحاور الثلاثة عند هذا التوجه.
- برنامج الواجهة التخابطية والذي يتألف من زرّي فتح وإغلاق لبوابة التخابط مع المتحكم، مؤشرات يستطيع المستخدم عن طريقها إدخال الزوايا المطلوبة لتوجيه المنصة،

وزرّ لإرسال الزوايا المطلوبة من المحرّكات بعد حساب النموذج العكسي للميكانيزم. يوجد أيضاً صندوقان لإظهار نتيجة حساب النموذج العكسي بالإضافة إلى نسبة نقل العزم عند هذا الموضع. يوضّح الشكل (53) تصميم الواجهة التخابيّة.



الشكل 51 واجهة المستخدم المستعملة للتحكم بتوجيه الميكانيزم



الفصل الثامن

**8. التنفيذ العملي**

تمت عملياً طباعة القطع لتعدّر تشغيلها بسبب عدم تواجد المواد اللازمة فكان الخيار الأمثل المتاح هو طباعة القطعة بالطابعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مادة PLA، يبين الشكل (54) القطع المطبوعة قبل التجميع.



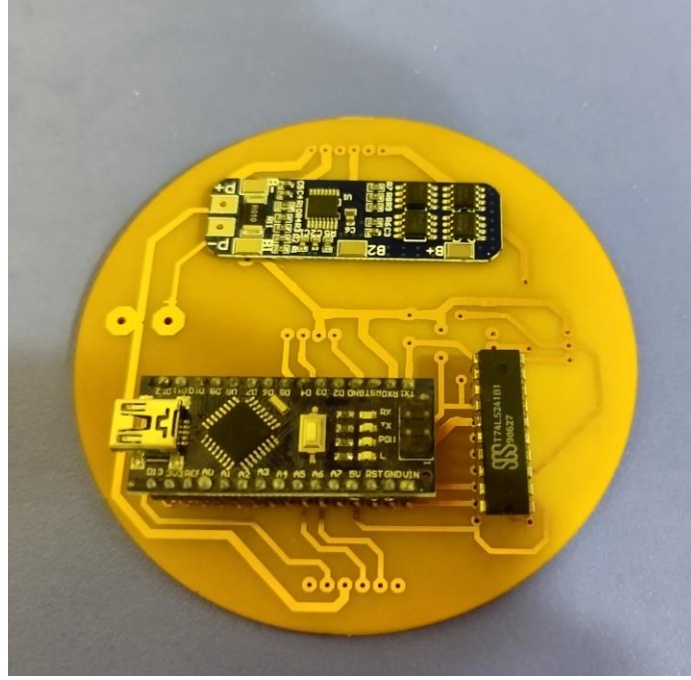
الشكل 52 القطع المطبوعة قبل التجميع

يبيّن الشكل (55) الذراع بعد تجميعها.



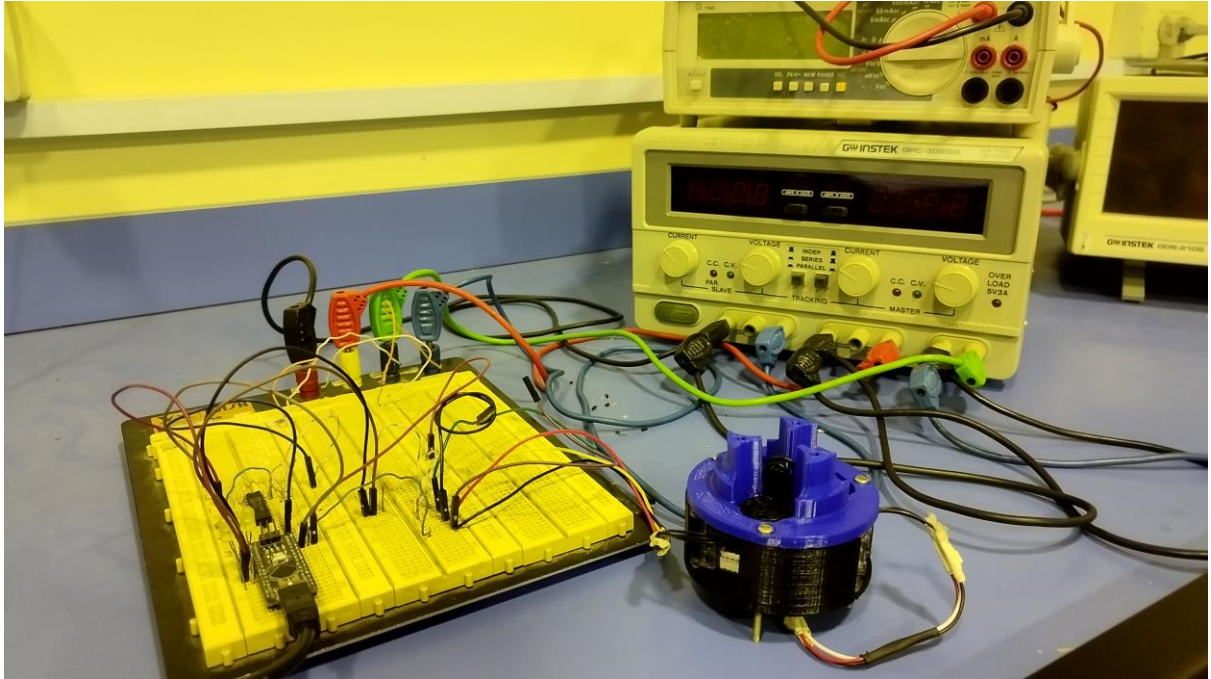
الشكل 53 الذراع بعد تجميعها عملياً

يبيّن الشكل (56) الدارة المطبوعة المنجزة بالإضافة إلى الـ IC المستخدم ودارة الشحن.



الشكل 54 الدارة المطبوعة عملياً

يبين الشكل (57) الدارة المستخدمة عملياً حيث أنّ الدارة المطبوعة كانت مخصصة لتغذية نوع آخر من المحركات كما ذكرنا سابقاً في فصل الدارة الإلكترونية.



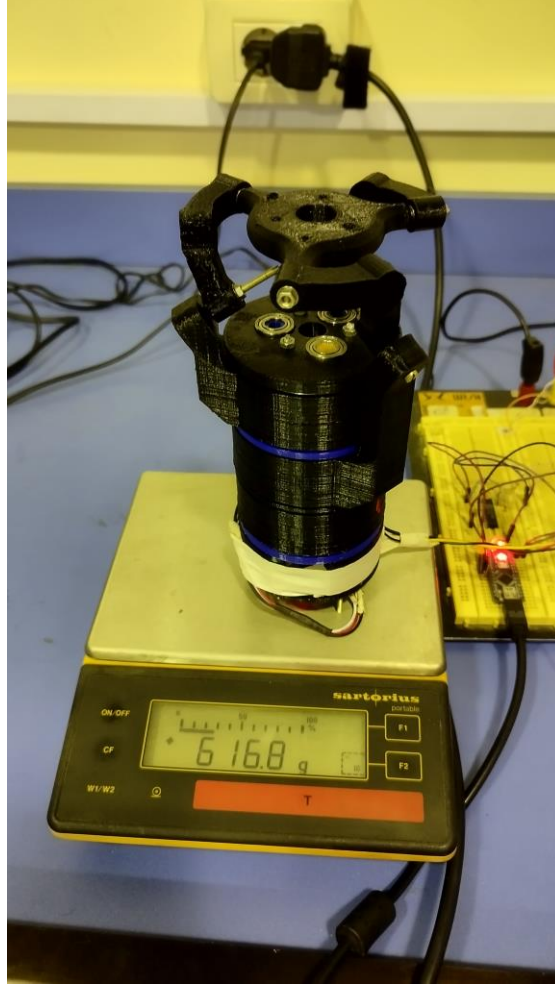
الشكل 55 الدارة المستخدمة عملياً

## الفصل التاسع

### 9. الاختبارات والنتائج

## 9.1 الوزن الكلي للقطع

تمّ قياس الوزن الكلي للقطع باستخدام ميزان دقيق من رتبة  $0.1\text{ g}$  كما هو موضّح بالشكل (58) فكان وزن القطع الإجمالي بعد التركيب  $616.8\text{ g}$  وهو ضمن الحدود المقبولة وفقاً لدفتر الشروط الوظيفية للمشروع.



الشكل 56 قياس وزن القطع الإجمالي بعد التركيب

## 9.2 دقة التموضع للميكانزم على المحاور الثلاثة

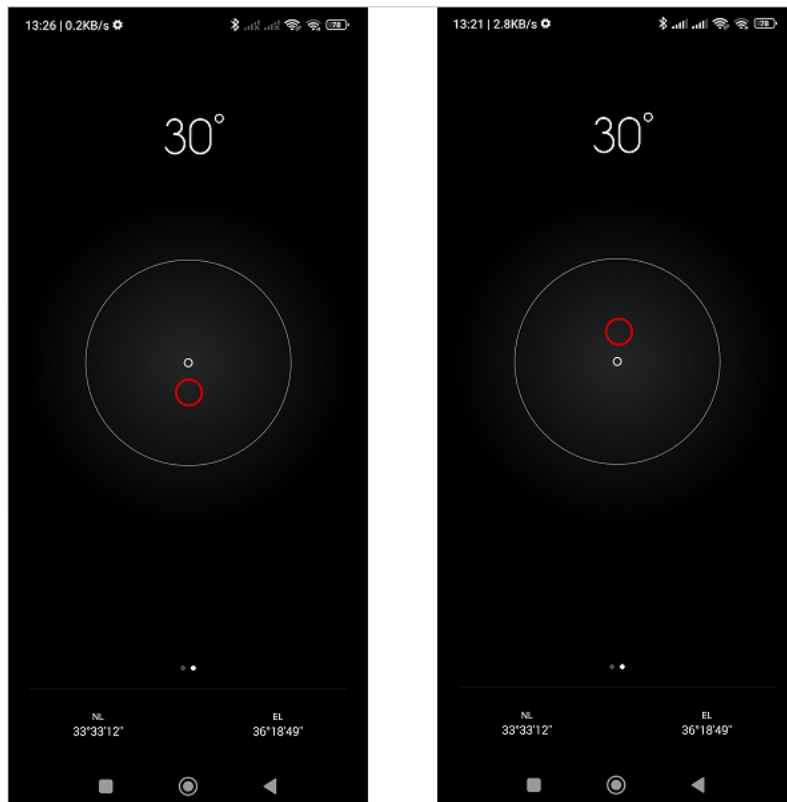
تمّ قياس دقة تموضع الميكانزم بوضع حامل على النهاية الطرفية للمنصة ووضع الهاتف المحمول عليه بحيث نقوم بالقراءة من الحساس الخاصّ بالهاتف والذي يعطي نتائج بدقّة من رتبة الدرجة.

1. الاختبار الأول: الانتقال على المحور  $z$  من الزاوية  $30^\circ$  - حتى الزاوية  $30^\circ$  فكانت النتيجة كما هو موضّح بالشكل (59).



الشكل 57 اختبار الموضع حول المحور z

2. الاختبار الثاني: الانتقال على المحور y من الزاوية  $-30^\circ$  حتى الزاوية  $30^\circ$  فكانت النتيجة كما هو موضح بالشكل (60).



الشكل 58 اختبار الموضع حول المحور y

3. الاختبار الثالث: الانتقال على المحور  $x$  من الزاوية  $-30^\circ$  حتى الزاوية  $0^\circ$  حيث أنّ النموذج الهندسي العكسي لا يعطي حلول للزوايا الموجبة حول هذا المحور أكبر من  $10^\circ$  فكانت النتيجة كما هو موضّح بالشكل (61).



الشكل 59 اختبار الموضع حول المحور  $x$

### 9.3 الخطأ السكوني للميكانزم

نطبق قوة بمقدار  $10\text{ N}$  ونقيس مقدار التشوّه بالدرجات على أحد المحورين  $x$  أو  $y$  فنجد تشوّهاً بمقدار  $1^\circ$  يعود سببه لمرونة مادّة البلاستيك المستخدمة.

### 9.4 نقل العزم للميكانزم على المحاور الثلاثة

لاختبار نقل العزم عبر الميكانزم سنقوم باختباره على ثلاثة محاور في الوضعية الابتدائية وذلك بوضع الميكانزم في الموضع المطلوب ثم إعطاء أمر للمحرّكات بالتحرك على كل محور من المحاور على حدة وباستخدام الميزان نستطيع معرفة القوة المطبّقة وبضربها بالذراع التي تساوي  $17\text{ cm}$  نحصل على العزم المنقول. أمّا عزم توقّف المحرك فهو  $0.39\text{ Nm}$  حسب النشرة الخاصة به في حال تطبيق جهد  $7.4\text{ V}$ ، وبضرب هذه القيمة بنسبة نقل المسنّنات  $0.39 \times 2.6 \approx 1\text{ Nm}$  وهو عزم الدخل المعتبر لكل من المحركات.

الوضعية  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ :

• وفق المحور  $x$ :

حسب الدراسة النظرية فإنّ العزم على الخرج وفق المحور  $x$  في الوضع الابتدائي هو  $1.5 Nm$  أما عملياً فكانت النتيجة:

$$0.8 \times 9.81 \times 0.17 = 1.33 Nm$$

• وفق المحور  $y$ :

حسب الدراسة النظرية فإنّ العزم على الخرج وفق المحور  $y$  في الوضع الابتدائي هو  $1.3 Nm$  أما عملياً فكانت النتيجة:

$$0.65 \times 9.81 \times 0.17 = 1.08 Nm$$

• وفق المحور  $z$ :

حسب الدراسة النظرية فإنّ العزم على الخرج وفق المحور  $z$  في الوضع الابتدائي هو  $3 Nm$  أما عملياً فكانت النتيجة:

$$1.6 \times 9.81 \times 0.17 = 2.67 Nm$$

**نتيجة:** نتائج نقل العزم التي حصلنا عليها منطقية وقريبة من الدراسة النظرية ويعود الاختلاف الصغير الحاصل إلى دقة القياس المنخفضة بالإضافة إلى ضياع العزم بسبب استخدام المسنّات البلاستيكية.



## الخاتمة والآفاق المستقبلية

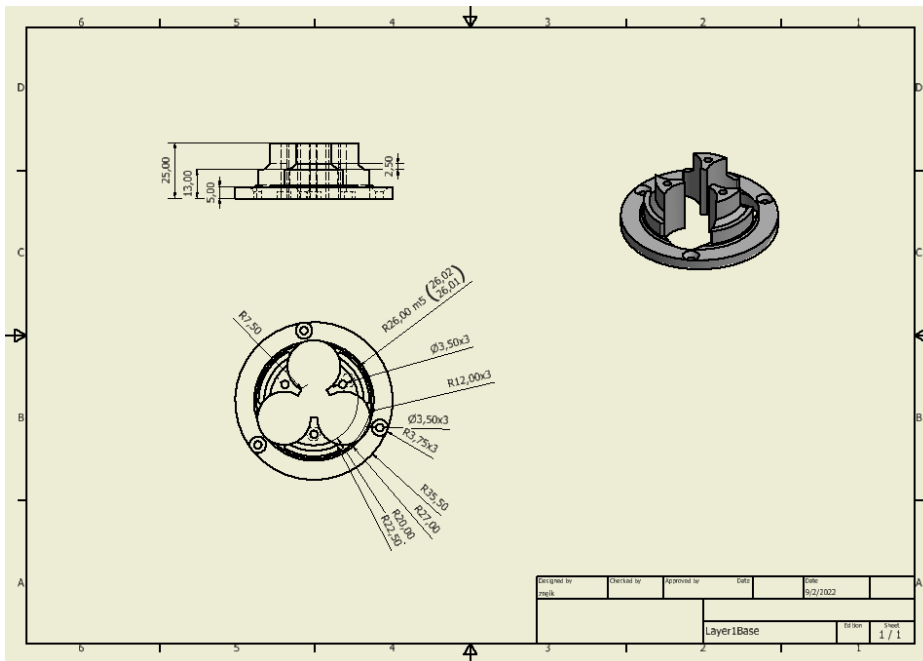
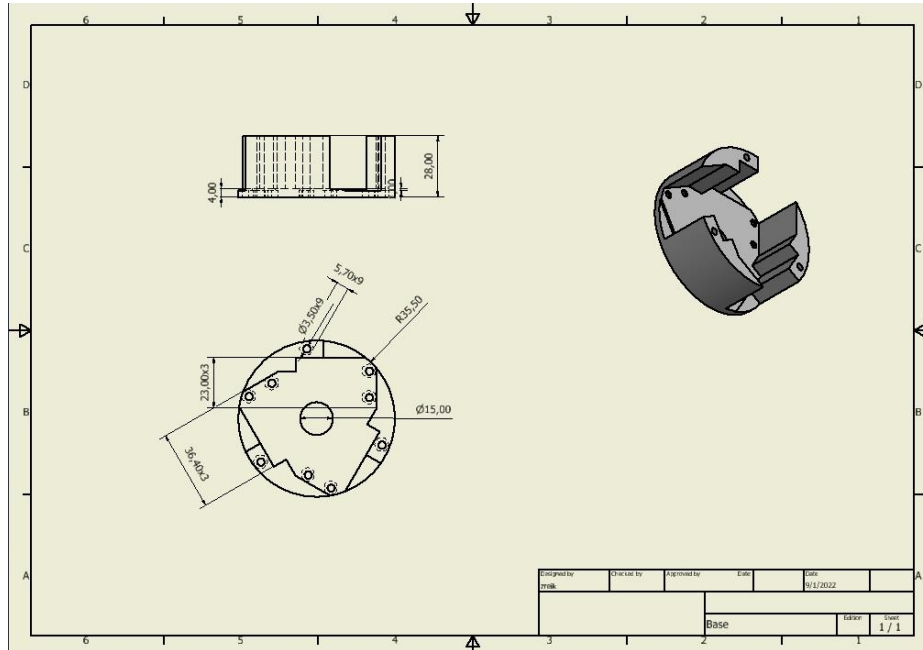
تمّ في هذا المشروع تصميم وتنفيذ روبوت تفرّعي بثلاث درجات حرّية دورانية يحقّق توجّه كفّ وفق محاور الدوران الثلاثة، ومن ثمّ تمّ اختبار نقل العزم عبر هذا الميكانزم والمقارنة بين النتائج الحقيقية والنظرية بحسب النموذج المصمّم على برنامج *Matlab*. حقّق الميكانزم الحركات المطلوبة بالأشواط المفروضة وبدقّة مقبولة من رتبة الدرجة، إلّا أنّ العزم الذي وصلنا إليه لا يصل للعزم المطلوب وذلك بسبب عدم توافر أنواع المحرّكات المناسبة لهذا المشروع. يمكن مستقبلاً تحسين المشروع من خلال تصنيعه من مادّة الألمنيوم وتشغيله باستخدام الفارزات المؤتمتة وبالتالي زيادة المتانة والدقّة في التوجّه، كما يمكن تعديل التصميم للعمل على محرّكات ذات عزوم أكبر مناسبة لهذا التطبيق للحصول على عزوم تناسب العمل كمعصم اصطناعي مفعّل بثلاث درجات حرّية. وأخيراً يمكن القيام بعملية أمثلة للتصميم للحصول على شكل مناسب أكثر للقيام بوظيفة المعصم وذلك بعد إضافة أداة طرفية مناسبة.

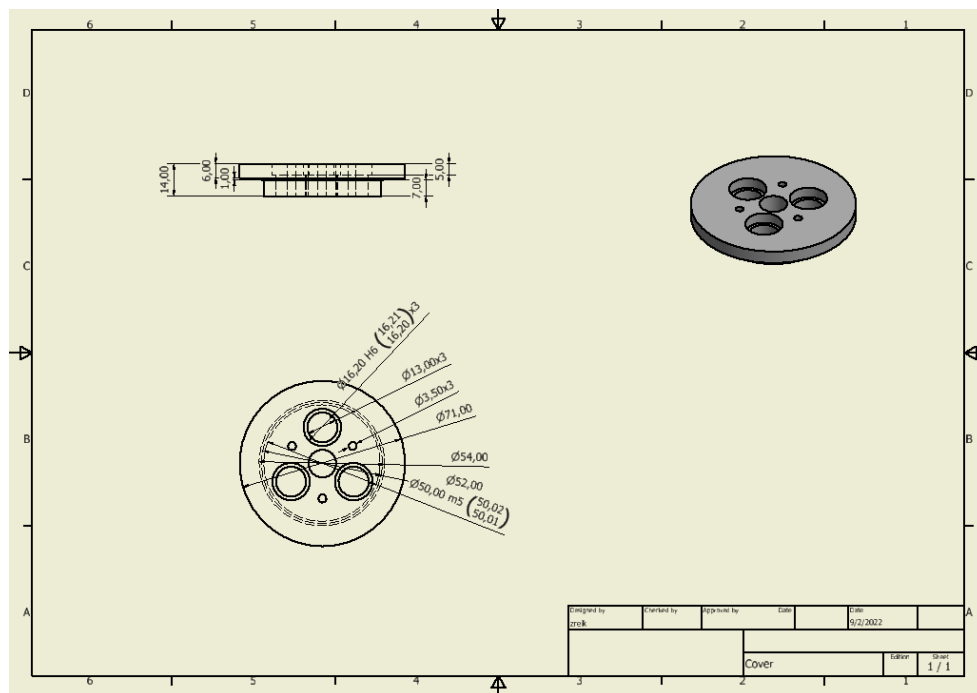
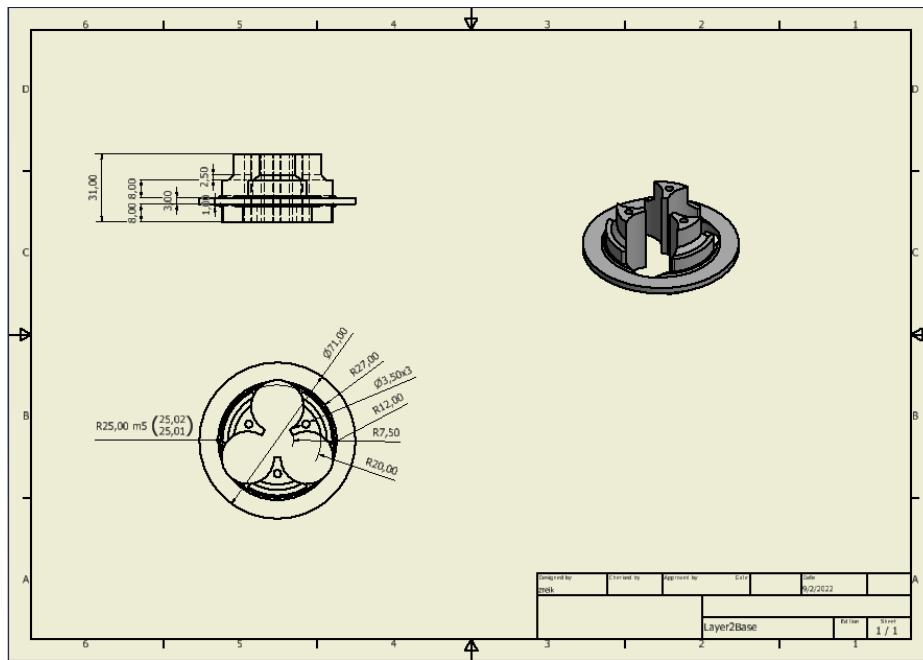
## المراجع

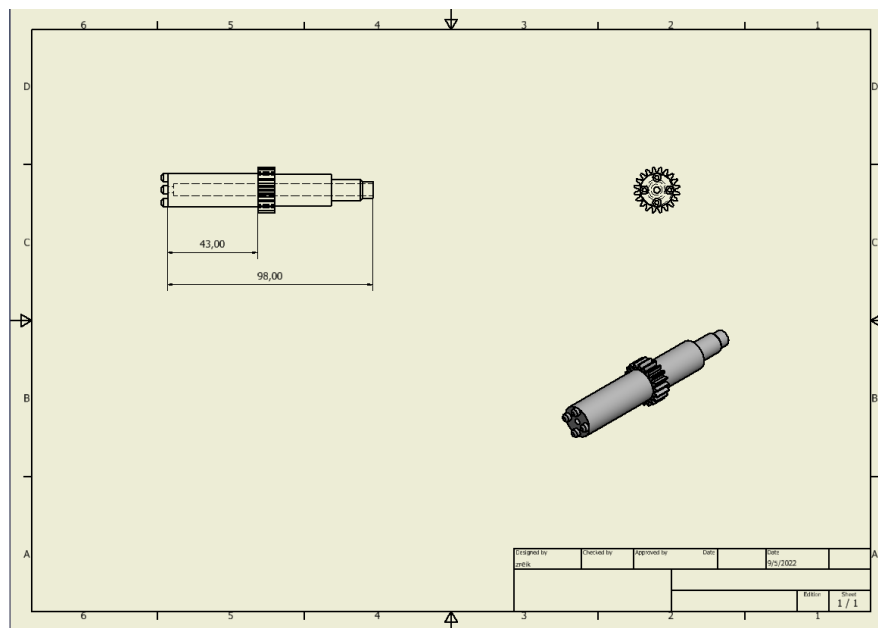
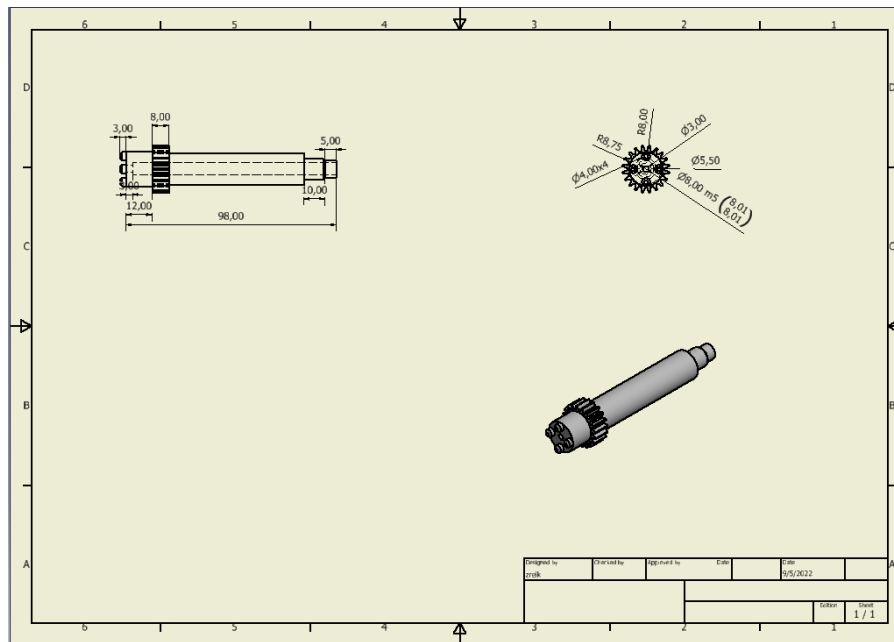
- [1] "State of the Art in Prosthetic Wrists: Commercial and ،A. M. Dollar و A. J. Spiers ،N. M. Bajaj .2015 ،*IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) 2015*،Research Devices
- [2] "Measurement of wrist flexion and extension ،T. Ishii1 و W. Tung ،O. Kazuki ،H. Yuine ،Y. Yoshii .2015 ،*BioMedical Engineering OnLine* "،torques in different forearm positions
- [3] *IEEE Robotics* "،"On the Development of the Agile Eye ،M. Gangé و E. S. Pierre ،C. M. Gosselin .1996 ،*Automation Magazine &*
- [4] "Design of spherical parallel mechanisms for application to laparoscopic ،S. Payandeh و T. Li .2002 ،pp. 133 - 138 ،المجلد 20 ،*Robotica* "،surgery
- [5] "،"DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF A NEW PROSTHETIC ARM ،I. J. A. L. Naranjo .2017 ،*Instituto Politécnico Nacional*
- [6] "Design and implementation of an Intelligent Above Elbow Prosthetic ،N. SAMAAN و A. SABA .2021 ،" HIAST،Arm
- [7] "Modelling of a special class of spherical parallel ،T. O. Andersen و M. Hansen ،S. Bai .2009 ،pp. pp. 161-170 ،المجلد 27 ،*Robotica* "،manipulators with Euler parameters
- [8] "Torque Transmission Analysis and Design of a 3-DOF ،M.S.Jin و L.Zhang ،Q.L.Yuan ،S.M.Ji ،Y.B.Li pp. pp ،70-269% من 1% ،المجلدات ،*Advanced Materials Research* "،Spherical Parallel Manipulator .2009 ،575-579

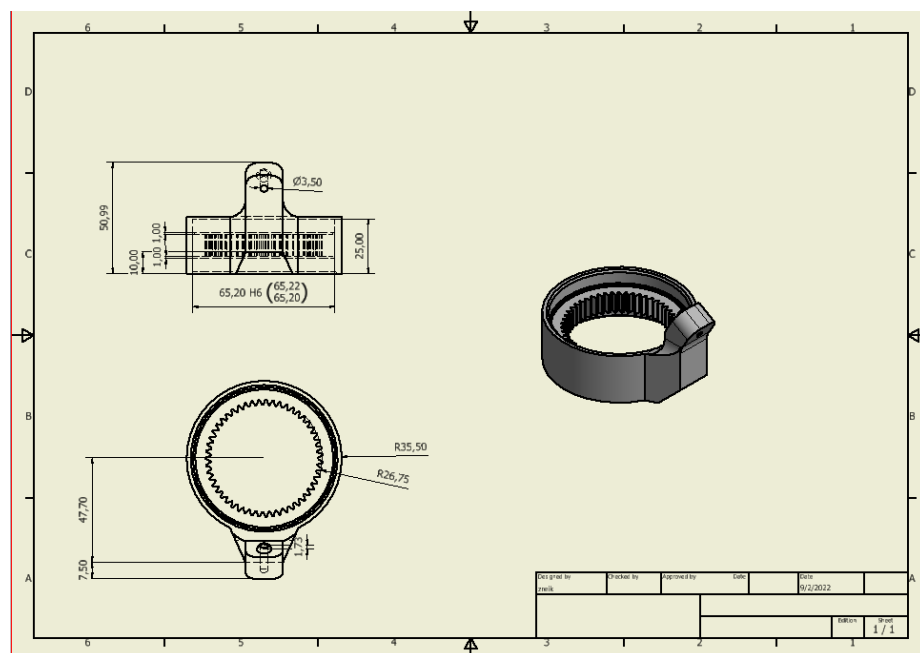
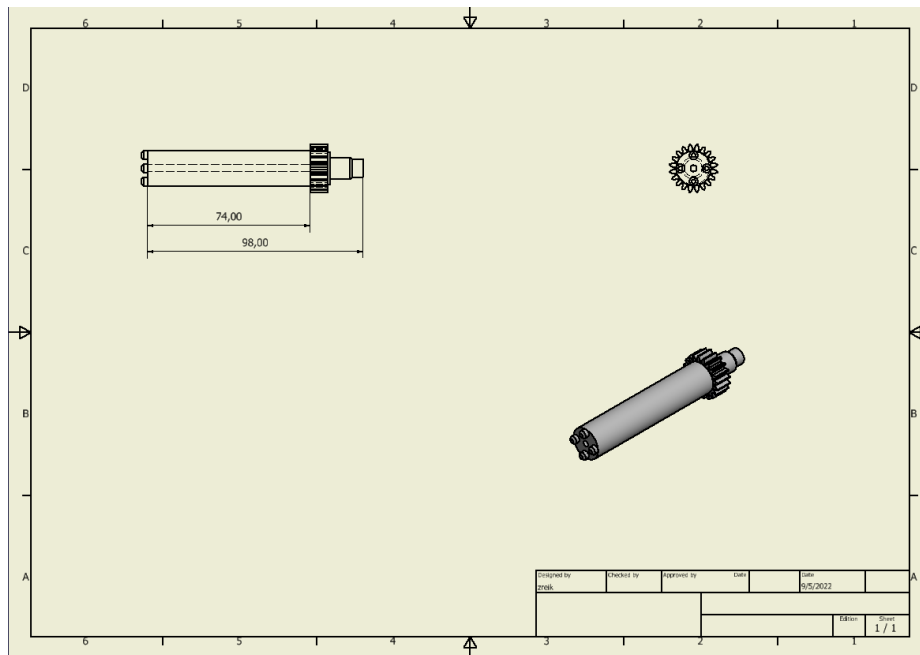
الملاحق

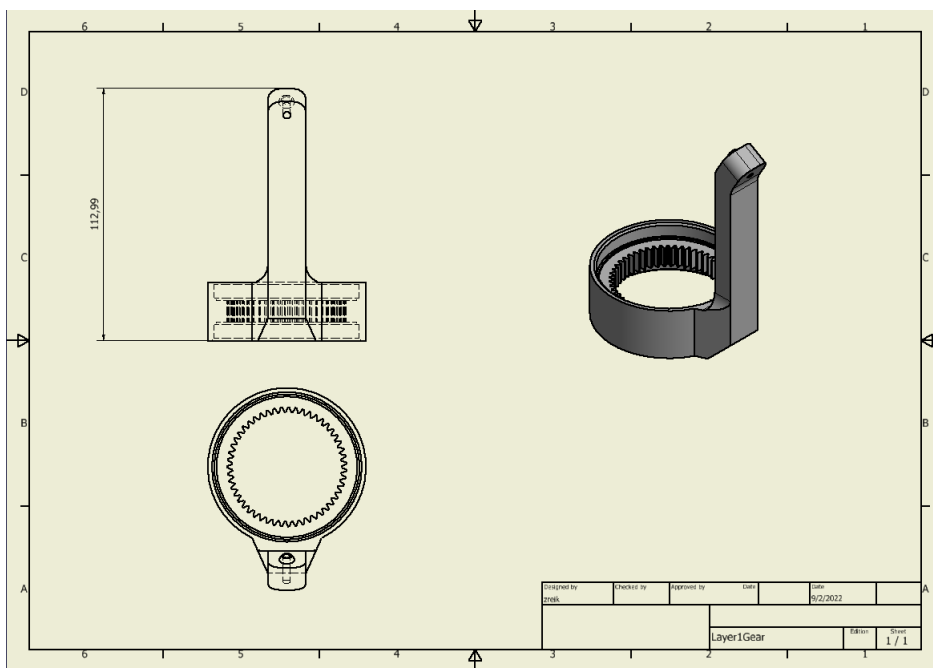
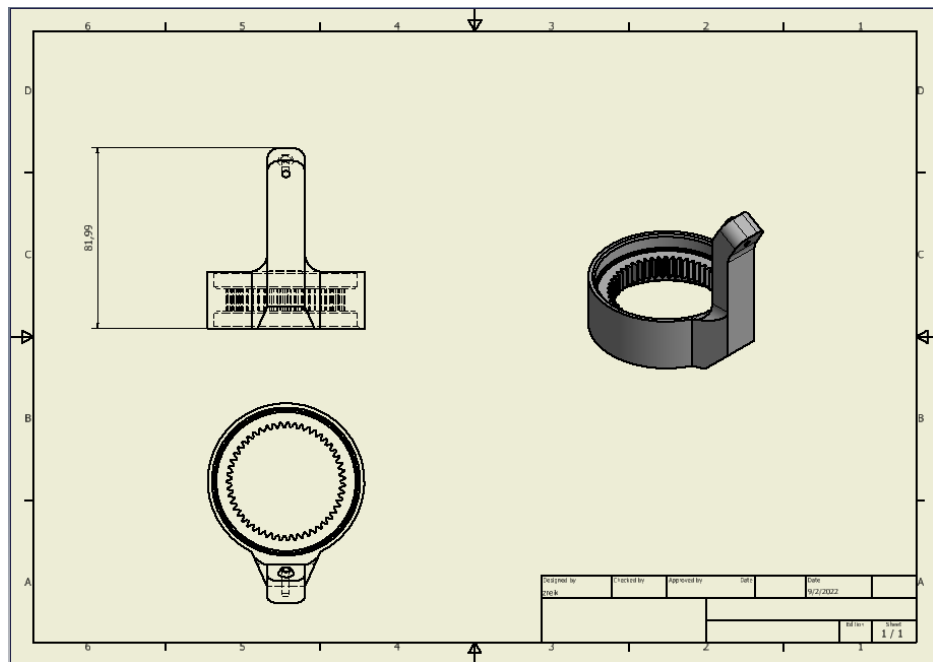
## الملحق - أ - المخططات الإفرادية للقطع



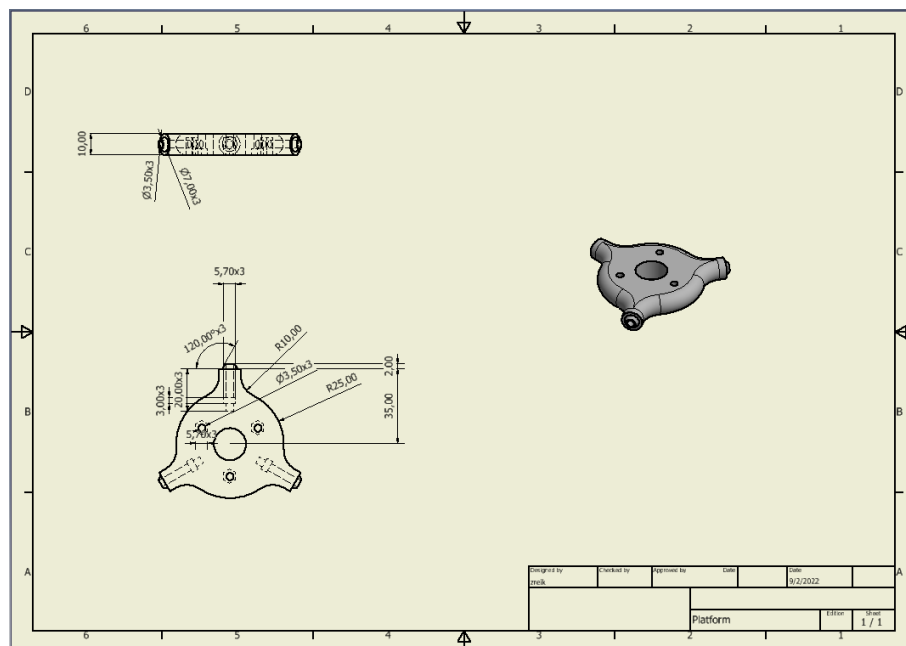
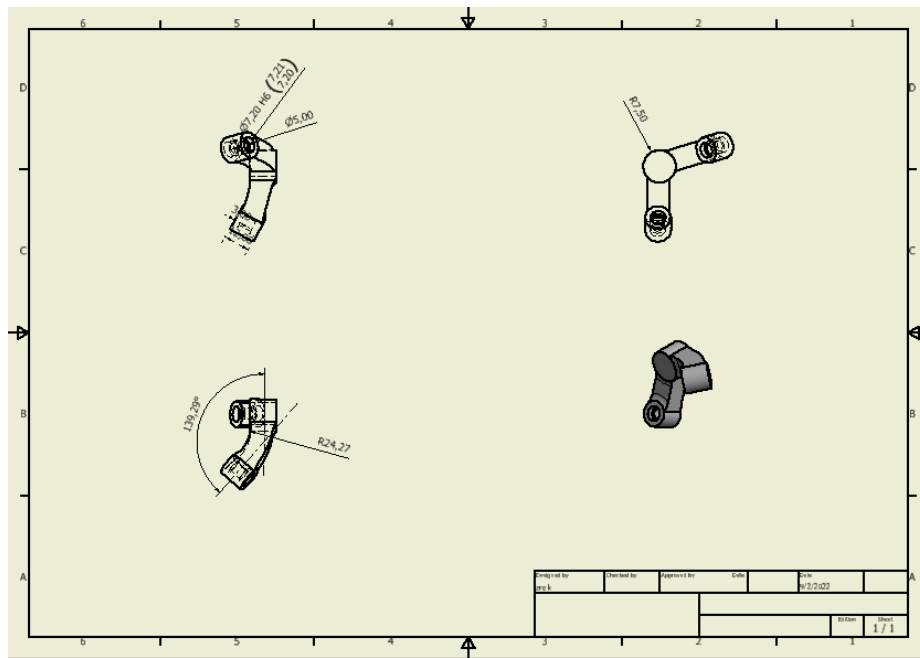












## الملحق – ب –

### دائرة Tri-Buffer 74LS241

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR™

August 1986  
Revised March 2000

## DM74LS240 • DM74LS241 Octal 3-STATE Buffer/Line Driver/Line Receiver

### General Description

These buffers/line drivers are designed to improve both the performance and PC board density of 3-STATE buffers/drivers employed as memory-address drivers, clock drivers, and bus-oriented transmitters/receivers. Featuring 400 mV of hysteresis at each low current PNP data line input, they provide improved noise rejection and high fanout outputs and can be used to drive terminated lines down to 133Ω.

### Features

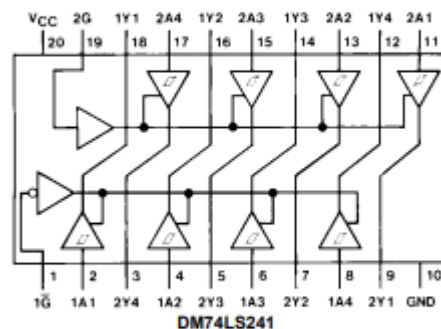
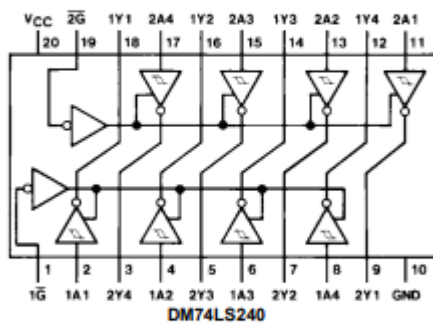
- 3-STATE outputs drive bus lines directly
- PNP inputs reduce DC loading on bus lines
- Hysteresis at data inputs improves noise margins
- Typical  $I_{OL}$  (sink current)  
24 mA
- Typical  $I_{OH}$  (source current)  
-15 mA
- Typical propagation delay times  
Inverting 10.5 ns  
Noninverting 12 ns
- Typical enable/disable time 18 ns
- Typical power dissipation (enabled)  
Inverting 130 mW  
Noninverting 135 mW

### Ordering Code:

| Order Number | Package Number | Package Description   |
|--------------|----------------|---|
| DM74LS240WM  | M20B           | 20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300 Wide |
| DM74LS240SJ  | M20D           | 20-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide             |
| DM74LS240N   | N20A           | 20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide     |
| DM74LS241WM  | M20B           | 20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300 Wide |
| DM74LS241N   | N20A           | 20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide     |

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

### Connection Diagrams



**Absolute Maximum Ratings**(Note 1)

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| Supply Voltage                       | 7V              |
| Input Voltage                        | 7V              |
| Operating Free Air Temperature Range | 0°C to +70°C    |
| Storage Temperature Range            | -65°C to +150°C |

**Note 1:** The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the Electrical Characteristics tables are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

**Recommended Operating Conditions**

| Symbol   | Parameter                      | Min  | Nom | Max  | Units |
|----------|--------------------------------|------|-----|------|-------|
| $V_{CC}$ | Supply Voltage                 | 4.75 | 5   | 5.25 | V     |
| $V_{IH}$ | HIGH Level Input Voltage       | 2    |     |      | V     |
| $V_{IL}$ | LOW Level Input Voltage        |      |     | 0.8  | V     |
| $I_{OH}$ | HIGH Level Output Current      |      |     | -15  | mA    |
| $I_{OL}$ | LOW Level Output Current       |      |     | 24   | mA    |
| $T_A$    | Free Air Operating Temperature | 0    |     | 70   | °C    |

**Electrical Characteristics**

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

| Symbol    | Parameter   | Conditions  | Min                      | Typ<br>(Note 2) | Max  | Units         |
|-----------|---|---|--------------------------|-----------------|------|---------------|
| $V_I$     | Input Clamp Voltage                                     | $V_{CC} = \text{Min}, I_I = -18 \text{ mA}$   |                          |                 | -1.5 | V             |
| HYS       | Hysteresis ( $V_{T+} - V_{T-}$ )<br>Data Inputs Only    | $V_{CC} = \text{Min}$   | 0.2                      | 0.4             |      | V             |
| $V_{OH}$  | HIGH Level Output Voltage                               | $V_{CC} = \text{Min}, V_{IH} = \text{Min}$<br>$V_{IL} = \text{Max}, I_{OH} = -1 \text{ mA}$ | 2.7                      |                 |      | V             |
|           |   | $V_{CC} = \text{Min}, V_{IH} = \text{Min}$<br>$V_{IL} = \text{Max}, I_{OH} = -3 \text{ mA}$ | 2.4                      | 3.4             |      |               |
|           |   | $V_{CC} = \text{Min}, V_{IH} = \text{Min}$<br>$V_{IL} = 0.5V, I_{OH} = \text{Max}$          | 2                        |                 |      |               |
|           |   |   |                          |                 |      |               |
| $V_{OL}$  | LOW Level Output Voltage                                | $V_{CC} = \text{Min}$<br>$V_{IL} = \text{Max}$<br>$V_{IH} = \text{Min}$                     | $I_{OL} = 12 \text{ mA}$ |                 | 0.4  | V             |
|           |   |   | $I_{OL} = \text{Max}$    |                 | 0.5  |               |
| $I_{OZH}$ | Off-State Output Current,<br>HIGH Level Voltage Applied | $V_{CC} = \text{Max}$<br>$V_{IL} = \text{Max}$<br>$V_{IH} = \text{Min}$                     | $V_O = 2.7V$             |                 | 20   | $\mu\text{A}$ |
| $I_{OZL}$ | Off-State Output Current,<br>LOW Level Voltage Applied  |   | $V_O = 0.4V$             |                 | -20  | $\mu\text{A}$ |
| $I_I$     | Input Current at Maximum<br>Input Voltage               | $V_{CC} = \text{Max}$<br>$V_I = 7V$   |                          |                 | 0.1  | mA            |
| $I_{IH}$  | HIGH Level Input Current                                | $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 2.7V$   |                          |                 | 20   | $\mu\text{A}$ |
| $I_{IL}$  | LOW Level Input Current                                 | $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 0.4V$   |                          |                 | -0.2 | mA            |
| $I_{OS}$  | Short Circuit Output Current                            | $V_{CC} = \text{Max}$ (Note 3)  | -40                      |                 | -225 | mA            |
| $I_{CC}$  | Supply Current  | $V_{CC} = \text{Max},$<br>Outputs OPEN  | Outputs HIGH             | 13              | 23   | mA            |
|           |   |   | Outputs LOW              | 26              | 44   |               |
|           |   |   |                          | 27              | 46   |               |
|           |   |   | Outputs Disabled         | 29              | 50   |               |
|           |   |   |                          | 32              | 54   |               |

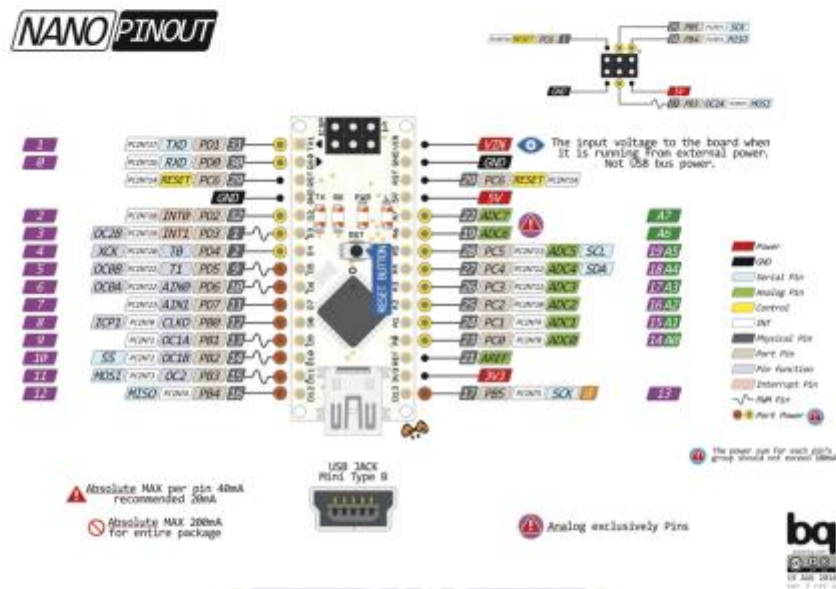
**Note 2:** All typicals are at  $V_{CC} = 5V, T_A = 25^\circ\text{C}$ .

**Note 3:** Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.

## الملحق - ج - بطاقة Arduino Nano

### LAMPIRAN

#### Datasheet Arduino Nano



#### Arduino Nano Pin Configuration

| Pin Category | Pin Name           | Details   |
|--------------|--------------------|---|
| Power        | Vin, 3.3V, 5V, GND | <p><b>Vin:</b> Input voltage to Arduino when using an external power (2V).</p> <p><b>5V:</b> Regulated power supply used to power microcontroller components on the board.</p> <p><b>3.3V:</b> 3.3V supply generated by on-board voltage regulator, current draw is 50mA.</p> <p><b>GND:</b> Ground pins.</p> |

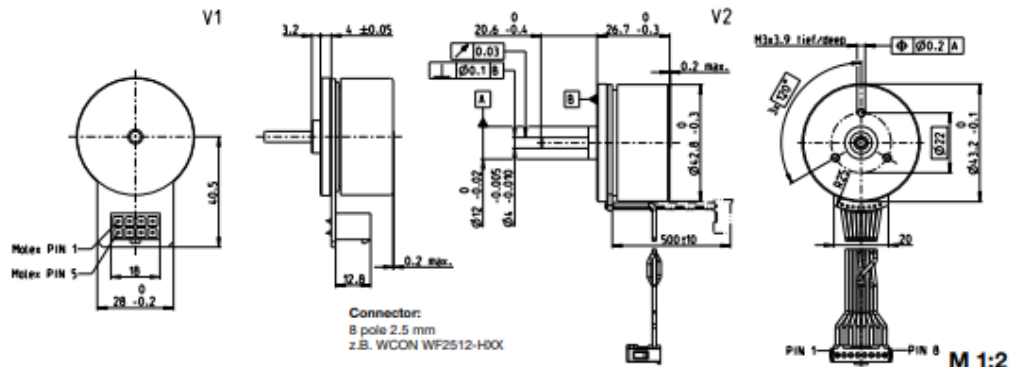
|                     |  |   |
|---------------------|--|---|
| Reset               | <b>Reset</b>                               | Resets the microcontroller.                                 |
| Analog Pins         | <b>A0 – A7</b>                             | Used to measure analog voltage in the range of 0-5V         |
| Input/Output Pins   | <b>Digital Pins D0 - D13</b>               | Can be used as input or output pins. 0V (low) and 5V (high) |
| Serial              | <b>Rx, Tx</b>                              | Used to receive and transmit TTL serial data.               |
| External Interrupts | 2, 3                                       | To trigger an interrupt.                                    |
| PWM                 | 3, 5, 6, 9, 11                             | Provides 8-bit PWM output.                                  |
| SPI                 | 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) and 13 (SCK) | Used for SPI communication.                                 |
| Inbuilt LED         | <b>13</b>                                  | To turn on the inbuilt LED.                                 |
| IIC                 | A4 (SDA), A5 (SCA)                         | Used for TWI communication.                                 |
| AREF                | <b>AREF</b>                                | To provide reference voltage for input voltage.             |



#### Arduino Nano Technical Specifications

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Microcontroller                       | ATmega328P – 8 bit AVR family microcontroller |
| Operating Voltage                     | 5V  |
| Recommended Input Voltage for Vin pin | 7-12V   |
| Analog Input Pins                     | 6 (A0 – A5)                                   |
| Digital I/O Pins                      | 14 (Out of which 6 provide PWM output)        |
| DC Current on I/O Pins                | 40 mA   |

## Maxon EC45 Flat محرّك

**EC 45 flat** Ø42.8 mm, brushless, 70 Watt



 Stock program  
 Standard program  
 Special program (on request)

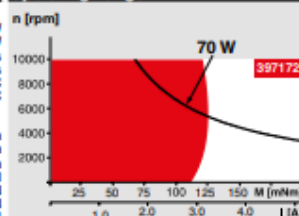
### Part Numbers

| V1 with Hall sensors                        |                  | 397172 | 402685 | 402686 | 402687 |  |  |  |  |
|---|------------------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|--|
| V2 with Hall sensors and cables             |                  | 411812 | 411814 | 411815 | 411816 |  |  |  |  |
| Motor Data (provisional)                    |                  |        |        |        |        |  |  |  |  |
| Values at nominal voltage                   |                  |        |        |        |        |  |  |  |  |
| 1 Nominal voltage                           | V                | 24     | 30     | 36     | 48     |  |  |  |  |
| 2 No load speed                             | rpm              | 6110   | 6230   | 6330   | 3440   |  |  |  |  |
| 3 No load current                           | mA               | 234    | 194    | 166    | 48.1   |  |  |  |  |
| 4 Nominal speed                             | rpm              | 4860   | 4990   | 5080   | 2540   |  |  |  |  |
| 5 Nominal torque (max. continuous torque)   | mNm              | 128    | 112    | 108    | 134    |  |  |  |  |
| 6 Nominal current (max. continuous current) | A                | 3.21   | 2.36   | 1.93   | 0.936  |  |  |  |  |
| 7 Stall torque <sup>1</sup>                 | mNm              | 1460   | 1170   | 1100   | 915    |  |  |  |  |
| 8 Stall current                             | A                | 39.5   | 25.8   | 20.7   | 6.97   |  |  |  |  |
| 9 Max. efficiency                           | %                | 85     | 84     | 83     | 84     |  |  |  |  |
| Characteristics                             |                  |        |        |        |        |  |  |  |  |
| 10 Terminal resistance phase to phase       | Ω                | 0.608  | 1.16   | 1.74   | 6.89   |  |  |  |  |
| 11 Terminal inductance phase to phase       | mH               | 0.463  | 0.691  | 0.966  | 5.85   |  |  |  |  |
| 12 Torque constant                          | mNm / A          | 36.9   | 45.1   | 53.3   | 131    |  |  |  |  |
| 13 Speed constant                           | rpm / V          | 259    | 212    | 179    | 72.7   |  |  |  |  |
| 14 Speed / torque gradient                  | rpm / mNm        | 4.26   | 5.44   | 5.85   | 3.82   |  |  |  |  |
| 15 Mechanical time constant                 | ms               | 8.07   | 10.3   | 11.1   | 7.24   |  |  |  |  |
| 16 Rotor inertia                            | gcm <sup>2</sup> | 181    | 181    | 181    | 181    |  |  |  |  |

### Specifications

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Thermal data</b>                              |                |
| 17 Thermal resistance housing-ambient            | 3.56 K/W       |
| 18 Thermal resistance winding-housing            | 4.1 K/W        |
| 19 Thermal time constant winding                 | 29.5 s         |
| 20 Thermal time constant motor                   | 178 s          |
| 21 Ambient temperature                           | -40 ... +100°C |
| 22 Max. winding temperature                      | +125°C         |
| <b>Mechanical data (preloaded ball bearings)</b> |                |
| 23 Max. speed                                    | 10000 rpm      |
| 24 Axial play at axial load < 4.0 N              | 0.1 mm         |
|  | 0.4 mm         |
| 25 Radial play                                   | preloaded      |
| 26 Max. axial load (dynamic)                     | 3.8 N          |
| 27 Max. force for press fits (static)            | 170 N          |
| (static, shaft supported)                        | 1000 N         |
| 28 Max. radial load, 5 mm from flange            | 21 N           |

### Operating Range



### Comments

**Continuous operation**  
In operation at the above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.  
= Thermal limit.

**Short term operation**  
The motor may be briefly overloaded (recurring).

**Assigned power rating**

### Other specifications

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 29 Number of pole pairs | 8     |
| 30 Number of phases     | 3     |
| 31 Weight of motor      | 141 g |

Values listed in the table are nominal.

### Connection

|       |                         |                         |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| Pin 1 | Hall sensor 1*          | Motor winding 1         |
| Pin 2 | Hall sensor 2*          | Motor winding 2         |
| Pin 3 | $V_{cc}$ 4.5 ... 18 VDC | Motor winding 3         |
| Pin 4 | Motor winding 3         | $V_{cc}$ 4.5 ... 18 VDC |
| Pin 5 | Hall sensor 3*          | GND                     |
| Pin 6 | GND                     | Hall sensor 1*          |
| Pin 7 | Motor winding 1         | Hall sensor 2*          |
| Pin 8 | Motor winding 2         | Hall sensor 3*          |

Wiring diagram for Hall sensors see p. 47

|  |        |
|--|--------|
| <b>Cable for V1</b>                    |        |
| Connection cable Universal, L = 500 mm | 339380 |
| Connection cable to EPOS, L = 500 mm   | 354045 |

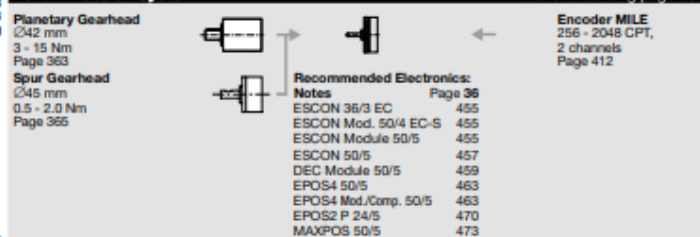
## V2

21 Ambient temperature -20 ... +100°C  
 1) Calculation does not include saturation effect  
 (p. 57/162)

264 maxon

## maxon Modular System

Details on catalog page 36



264 maxon EC motor

April 2019 edition / subject to change

## الملحق – ه – محرك Dynamixel XL320

Show

Product Information > Dynamixel > XL-320 > XL-320

ROBOTIS e-Manual v1.16.00

### XL-320

#### Part Photo



[XL-320]

※ Olio's geared motor and the servo motor differ in size

#### H/W Specification

- Weight : 16.7g
- Dimension : 24mm \* 36mm \* 27mm
- Resolution : 0.29°
- Motor : Cored Motor
- Gear Reduction Ratio : 229 : 1
- Stall Torque : 0.39 N.m (at 7.4V)
- No load speed : 114 rpm (at 7.4V)
- Running Degree
  - § 0° ~ 300°
  - § Endless Turn
- Running Temperature : -5℃ ~ +70℃
- Voltage : **6 ~ 8.4V (Recommended Voltage 7.4V)**
- Command Signal : Digital Packet
- Protocol Type : Half duplex Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)
- Link (Physical) : TTL Level Multi Drop (daisy chain type Connector)
- ID : 253 ID (0~252)
- Communication Speed : 7343bps ~ 1 Mbps
- Feedback : Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
- Material : Engineering Plastic