

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية

العام الدراسي 2023/2022

مشروع أعد لنيل الإجازة في الهندسة اختصاص ميكاترونكس

تصميم وتنفيذ ميكانيزم مطاوع للتحكم بتوجيه شعاع الدفع لجسم طائر

تقديم
زين العابدين زريق

إشراف
د. عبد الكريم طعان
ما. نزار فليون – ما. راما قصار بنى المرجة

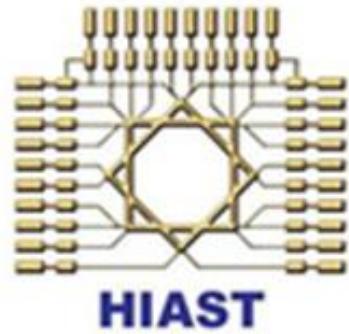
13/08/2023

Syrian Arab Republic

Higher Institute for Applied Sciences and Technology

Department of Mechanical and Electrical Systems

Year 2022/2023



Submitted in Fulfillment of the Requirements for a Bachelor's Degree in Mechatronics Engineering

Design and Implementation of a Thruster Orienting Compliant Mechanism

Presented by
Zein Alabdin Zreik

Supervised by
PhD Karim Taan
MSc. Nizar Falion – MSc. Rama Qassar

13/08/2023

الإهادء

إلى معلّمي التي تحملت متى الكثير

أمي سهى زربون

إلى روح الغائب الحاضر في كلّ عمل

ألي الشاعر محمد منذر زربون

إلى صديي وصديقي في الغربة

أخي المهندس هبيب زربون

إلى أساتذتي الذين تركوا الأثر الجميل

أساتذتي في الدراسة المحسنة

إلى الرزق والآخ الكبير

الشهيد محمد رضا الشامي

إلى صديقي ورفيقتي في الدرس

يارا العلي

إلى صديقي وأخي

الزميل محمد نور الكرم

إلى الزميل والشريك في النجاح

عبد الرحمن حوراني

إلى وطنني الجزع سوريا ودمشقتي مدينتي إليها اسمين دمشق

الشكر

أُتوجّه بالشكر إلى كلّ من ساهم في إنجاز هذا المشروع من زملاء ومهندسين ودكتورة، وأخصّ بالشكر رئيس قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية الدكتور ميشيل السبع لدعمه المستمر. والشكر الكبير لمشرفي المشروع الذين قدّموا الكثير من الجهد والوقت لإتمام هذا العمل والوصول لأفضل النتائج الممكنة.

د. عبد الكريم طعان

ما. نزار فليون - م. راما قصار بنى المرجة

الملخص

تم في هذا المشروع دراسة وتصميم وتنفيذ ميكانزم مطاوع بدرجتي حرية للتحكم بشعاع الدفع لجسم طائر، كما تمت المقارنة بين هذا النوع من الميكانزمات والميكانزمات التقليدية عن طريق تصميم وتنفيذ ميكانزم تقرعي بدرجتي حرية قادر على تلبية نفس المتطلبات للميكانزم المطاوع والاختبار عملياً من ناحية الدقة وعدد القطع المتحركة. فكان الميكانزم المطاوع متقدماً من ناحية عدم الحاجة للعديد من القطع المتحركة والروملانات وعناصر الآلات المختلفة مما يسبب دقة في التموضع بسبب غياب الخلوصات والتصرف النابضي للروابط المطاوعة الذي يساعد على عودة الميكانزم لوضع الاستقرار تلقائياً وضمان عدم الانزياح عن الهدف.

Abstract

In this project, a 2 Degrees of Freedom (DoFs) compliant mechanism for orienting a thruster has been studied, designed and implemented. Also, a comparison between these kinds of mechanisms and the traditional ones has been made by designing and implementing a 2 DoFs parallel mechanism capable of satisfying the same requirements as the compliant one and testing practically in the aspects of precision and number of moving parts. So, the compliant mechanism prevailed in needing less moving parts and machine parts such as bearings and bolts and so on. This lead to more precision due to the lack of backlash and the spring-like behavior of the compliant joints which helps return the mechanism to its equilibrium automatically and ensures less or no deviation from the target.

المحتويات

iii.....	الملخص
iv.....	المحتويات
vi.....	قائمة الأشكال
viii.....	قائمة الجداول
ix.....	مقدمة عامة
1	1. التعريف بالمشروع
2	1.1. هدف المشروع
2	1.2. توصيف المشروع
2	1.3. دفتر الشروط الوظيفية للمشروع
3	2. الدراسة المرجعية
4	2.1. توجيه شعاع الدفع للأقمار الصناعية الصغيرة [1]
5	2.2. استخدام الميكانيزمات المطاوعة في توجيه لاقط إشارة لقمر صناعي [2]
5	2.3. ميكانزم Agile Eye [3]
6	2.4. أنواع الروابط الدورانية المطاوعة [4]
7	2.5. أنواع المواد المستخدمة في الميكانيزمات المطاوعة [5]
8	3. التحليل الوظيفي
9	3.1. الوظيفة الرئيسية للنظام
9	3.2. تحليل النظام لوظائفه الجزئية
9	3.3. اختيار الحلول المناسبة لتحقيق الوظائف الجزئية
10	3.4. النهاية الطرفية
10	ميكانزم التوجيه
13	3.5. المفعلات
14	3.6. وحدة التحكم
16	4. الدراسة النظرية
17	4.1. الميكانيزم المطاوع
17	4.2. دراسة الرابطة الدورانية [6]
17	نموذج نابض فتل بثبات صلابة K
18	نموذج four-bar
19	المجال الأعظمي للحركة

20	النمذجة على Matlab
22	4.3. الميكانيزم التقليدي التفرعي Agile Eye
23	النموذج الهندسي المباشر
24	النموذج الهندسي العكسي
26	5. التصميم الميكانيكي
27	5.1. الميكانيزم المطاوع
27	تصميم الرابطة الدورانية
29	التصميم الكلي للميكانيزم المطاوع بدرجتي الحرية
31	5.2. الميكانيزم التقليدي
37	6. الدراسة الإنسانية
38	6.1. دراسة الميكانيزم المطاوع
38	دراسة الرابطة الدورانية
40	دراسة الميكانيزم كاملاً
42	6.2. دراسة الميكانيزم التقليدي
46	7. الجزء الإلكتروني
47	7.1. الدارات المستعملة
47	7.2. التغذية
48	8. الكود البرمجي
49	8.1. كود Matlab
49	8.2. كود Arduino
50	9. التنفيذ والنتائج العملية
51	9.1. القطع المطبوعة قبل وبعد التجميع
51	9.2. المقارنة من ناحية الوزن
51	9.3. المقارنة من ناحية الدقة
52	10. الخاتمة والأفاق المستقبلية
53	11. المراجع
54	12. الملحق
54	ملحق -أ- المخططات الإفرادية لقطع
61	ملحق -ب- محرك Maxon EC45 Flat
62	ملحق -ج- محرك Nema-17
64	ملحق -د- دارة القيادة DRV8825

قائمة الأشكال

ix.....	الشكل 1 مثال على استخدام ميكانزم مطاوع بالمستوى المجهري.....
x.....	الشكل 2 مقارنة بين رابطة دورانية تقليدية ورابطة دورانية مطاوعة.....
2	الجدول 1 دفتر الشروط الوظيفية.....
4	الشكل 3 نموذج ميكانزم توجيه شعاع الدفع لجسم طائر
5	الشكل 4 استخدام الميكانيزمات المطاوعة في توجيه لاقط إشارة لقمر صناعي.....
6	الشكل 5 الميكانزم التفريقي Agile Eye
6	الشكل 6 بعض أنواع الروابط الدورانية المطاوعة التي يمكن استخدامها.....
7	الشكل 7 جدول مقارنة بين أنواع الروابط الدورانية المطاوعة
7	الشكل 8 ميكانزم مطاوع مصنوع من مادة PLA
9	الشكل 9 الوظيفة الرئيسية للنظام.....
9	الشكل 10 تقسيم النظام إلى وظائفه الجزئية.....
10	الشكل 11 المؤشر الليزري المستخدم كنهاية طرفية للنظام
11	الشكل 12 مادة PLA المستخدمة
11	الشكل 13 الرابطة الدورانية Cross-Axis Pivot المطاوعة.....
12	الشكل 14 نموذج عن ذراع روبوتية تسلسليه.....
13	الشكل 15 نموذج عن حل تفريعي
14	الشكل 16 المحرك Maxon EC45 Flat
14	الشكل 17 المحرك Nema-17 المستخدم.....
15	الشكل 18 بطاقة Arduino Uno و CNC Shield الخاص بها.....
15	الشكل 19 دارة القيادة DRV8825
17	الشكل 20 المعاملات الخاصة بـ Cross-Axis Pivot
18	الشكل 21 نمنجة الرابطة Cross-Axis Pivot بالنموذج four-bar بالنموذج
21	الشكل 22 جدول خيارات الطباعة
21	الشكل 23 جدول الخصائص الميكانيكية لمادة PLA بحسب خيارات الطباعة.....
22	الشكل 24 المخطط الحركي للميكانزم 2DoF Agile Eye
24	الشكل 25 الإشارة المرغوبة والإشارة الناتجة عند تطبيق النموذج الهندسي العكسي على الميكانزم التقليدي
25	الشكل 26 نتيجة محاكاة النموذج الهندسي العكسي في الوضعية $\pi_4 - \pi_4$
25	الشكل 27 المسار المرسوم باستخدام الميكانزم على المحاكاة.....
27	الشكل 28 تصميم الرابطة الدورانية المطاوعة مجمعة.....
28	الشكل 29 تصميم الرابطة الدورانية Cross-Axis Pivot
28	الشكل 30 مسقط علوي للرابطة الدورانية يوضح تصميم الصلين
29	الشكل 31 تصميم الفارنة التي تربط محور المحرك مع الميكانزم
29	الشكل 32 التصميم النهائي للميكانزم المطاوع
30	الشكل 33 أعصاب تثبيت المحرك على جسم الميكانزم
31	الشكل 34 وصلات اتصال النهاية الطرفية بالميكانزم المطاوع
31	الشكل 35 قطعة القاعدة في الميكانزم التقليدي
32	الشكل 36 قطعة حامل المؤشر الليزري في الميكانزم التقليدي
33	الشكل 37 واحد من مضاجع الرولمانات في قطعة حامل المؤشر
33	الشكل 38 الرابطة الأولى في الميكانزم التقليدي
34	الشكل 39 الفارنة التي تربط الرابطة الأولى مع المحرك
34	الشكل 40 الكتف الذي يضغط على الحلقة الداخلية للرولمان
35	الشكل 41 القطعة الأولى من الرابطة الثانية في الميكانزم التقليدي

الشكل 42	القطعة الثانية من الرابطة الثانية في الميكانيزم التقليدي.....	36
الشكل 43	مكان تثبيت الرابطة الدورانية في الدراسة العددية على.....	38
الشكل 44	العزم المطبق في الدراسة العددية للرابطة الدورانية على برنامج.....	38
الشكل 45	عامل الأمان للرابطة الدورانية على برنامج.....	39
الشكل 46	زاوية دوران الرابطة عند تطبيق العزم المفروض على المحرك على برنامج.....	39
الشكل 47	ثبت الميكانيزم المطاوع من أجل الدراسة العددية على.....	40
الشكل 48	العزم المطبق في الحالة الأولى من الدراسة العددية على.....	40
الشكل 49	الإذيارات الموافقة للعزم المطبق على برنامج.....	41
الشكل 50	عامل الأمان في الحالة الأولى من دراسة الميكانيزم المطاوع.....	41
الشكل 51	القوى المطبقة على برنامج Ansys في دراسة تحمل الميكانيزم المطاوع للحملة المفروضة.....	42
الشكل 52	عامل الأمان الناتج في حالة تطبيق الحملة المفروضة على الميكانيزم.....	42
الشكل 53	مكان تثبيت قاعدة الميكانيزم التقليدي.....	43
الشكل 54	القوى المطبقة على قاعدة الميكانيزم التقليدي.....	43
الشكل 55	التشوهات الحاصلة على قاعدة الميكانيزم التقليدي.....	43
الشكل 56	عامل الأمان الناتج عن تطبيق وزن المحركات على قاعدة الميكانيزم التقليدي.....	44
الشكل 57	مكان تثبيت الرابطة الأولى.....	44
الشكل 58	تطبيق القوة على الرابطة الأولى.....	44
الشكل 59	عامل الأمان الناتج على الرابطة الأولى.....	45
الشكل 60	مكان تثبيت الرابطة الثانية.....	45
الشكل 61	تطبيق القوة على الرابطة الثانية.....	45
الشكل 62	عامل الأمان الناتج على الرابطة الثانية.....	45
الشكل 63	معادلات المسار المستطيل على Matlab.....	49

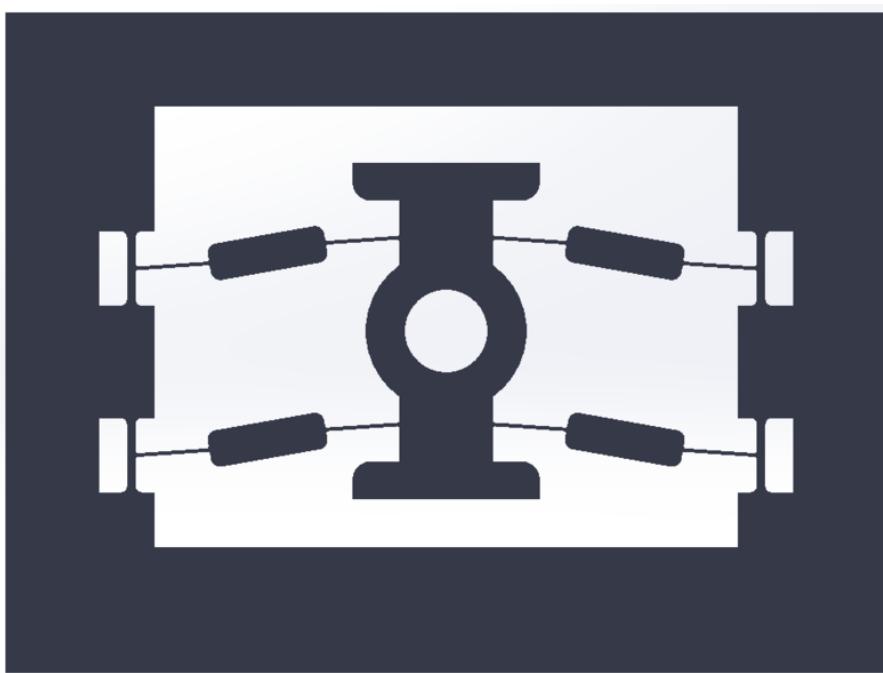
قائمة الجداول

الجدول 1 دفتر الشروط الوظيفية..... 2

مقدمة عامة

بدأ استخدام الميكانيزمات المطاوعة منذ العصور القديمة، إذ أنها استخدمت في العديد من المجالات مثل مبدأ القوس والسهم أو حتى بعض أنواع المنجنينقات، التي تعد بحد ذاتها ميكانيزمًا مطاوعًا باعتماده على مرونة خشب القوس لتحقيق الحركة المطلوبة. ومع مرور الوقت ازداد تعقيد هذا النوع من الميكانيزمات مع ازدياد تعقيد الآلات والميكانيزمات المطلوبة حيث أنت كحل للعديد من المشاكل التي تواجهها الميكانيزمات التقليدية مما أدى لثورة في الهندسة الميكانيكية.

تعتمد الميكانيزمات المطاوعة في عملها على مرونة المادة المصنوع منها الميكانيزم بدلاً من المفاصل والأجسام الصلبة، الأمر الذي يجعل الميكانيزم مؤلف من قطعة واحدة بكلفة أقل وتصنيع أسهل ملائماً للإنتاج الكمي. ومع تطور طرق التصنيع ووجود الطابعات ثلاثية الأبعاد في وقتنا الحالي، أصبح بإمكاننا تصميم وتصنيع ميكانيزمات مطاوعة معقدة الأشكال وصغيرة الأحجام مؤلفة من قطعة واحدة مطبوعة ويمكن حتى تصنيعها على المستوى النانوي في بعض التطبيقات التي تحتاج حركة دقيقة وموثوقة بمساحة عمل صغيرة جداً. يوضح الشكل (1) قلاب مطاوع بموضعه استقرار مصنوع على مستوى مجهر.

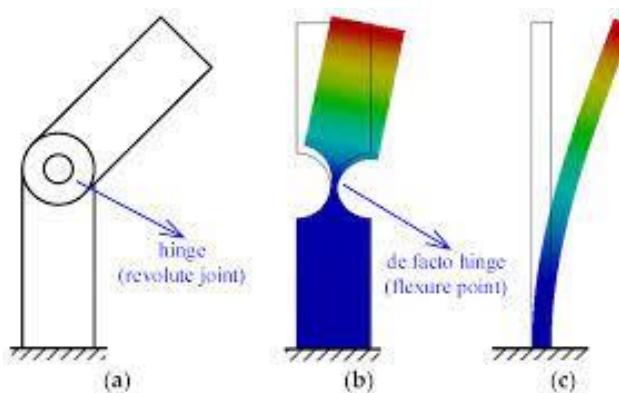


الشكل 1 مثال على استخدام ميكانيزم مطاوع بالمستوى المجهر

من ناحية أخرى فإن ميكانيزمات توجيه شعاع الدفع للأجسام الطائرة هي من المسائل الأهم في مجال الطيران ومركبات الفضاء، وهو مجال بحث دائم للوصول للحل الأمثل من ناحية دقة التوجيه والوثوقية العالية وخفة الوزن وهنا أنت فكرة استخدام الميكانيزمات المطاوعة في تحقيق المطلوب بدلاً من المسننات والروابط الكثيرة والمعقدة ذات الوزن العالي والخلوصات.

وفي هذا المجال تتمتع الميكانيزمات المطابعة بالعديد من المميزات الهامة التي تجعلنا نتوجه لاستخدامها بدلاً من الميكانيزمات التقليدية، فعلى سبيل المثال إلغاء الحاجة للمسننات والروابط الميكانيكية يخفف الوزن المحمي بشكل ملحوظ. بالإضافة إلى الدقة العالية بالحركة التي تساعد على تحكم سريع ودقيق بالجسم الطائر. كما أن وجود قطعة واحدة متحركة يزيد من القدرة على تحمل الأخطاء وتحويل الأخطاء التي يمكن أن تكون كارثية إلى أخطاء أقل خطورة مما يزيد من وثوقية الميكانيزم بشكل عام.

وأخيراً من المميزات التي تعتبر هامة في هذا المجال هي القدرة على تخفيف الطاقة الضائعة بسبب الاحتكاك والخسائر بين القطع المتحركة الموجودة في الميكانيزمات التقليدية مما يزيد من سلاسة الحركة وكفاءتها خصوصاً عندما تكون مصادر الطاقة محدودة بمثل التطبيقات الفضائية.



الشكل 2 مقارنة بين رابطة دورانية تقليدية ورابطة دورانية مطابعة

سنعمل في هذا المشروع على تصميم وتنفيذ ميكانيزم مطابع بدرجتي حرية دورانيتين لتحقيق توجيه شعاع الدفع لجسم طائر محقدين الشروط المطلوبة من ناحية الوزن والعزز و مجالات الحركة الواجب توافرها في الميكانيزم لأداء الوظيفة بشكل صحيح و مقبول. ثم سنقوم بالمقارنة بين هذا النوع من الميكانيزمات والميكانيزمات التقليدية التي تقوم بنفس الوظيفة. وأخيراً سنقوم باستعراض النتائج النظرية والعملية التي توصلنا إليها من خلال دراستنا.

1. التعريف بالمشروع

1.1. هدف المشروع

يهدف العمل في المشروع إلى تطبيق فكرة الميكانيزمات المطابعة Compliant Mechanisms في توجيه شعاع الدفع Thruster Orienting للأجسام الطائرة والمقارنة بين النتائج العملية لها والميكانيزمات التقليدية التي تؤدي نفس الوظيفة.

1.2. توصيف المشروع

عبارة عن آلية من الوصلات المرنة الخاصة تسمح بتجهيز شعاع الدفع لأنظمة الجوية حيث تبرز أهمية فكرة استخدام الميكانيزم المطابع في تقليل عدد القطع المتحركة وتأمين وثوقية أعلى فضلاً عن عمر تشغيل أطول مقارنة بالميكانيزمات التقليدية. تتميز بخفة الوزن مما يجعل استخدامها أكثر في المنظومات الجوية كالطائرات النفاثة على سبيل المثال وليس الحصر. بالنسبة للنماذج المخبرية الأولية تتميز بسهولة التصنيع على آلات الطباعة ثلاثية الأبعاد ذات الكلفة المنخفضة.

1.3. دفتر الشروط الوظيفية للمشروع

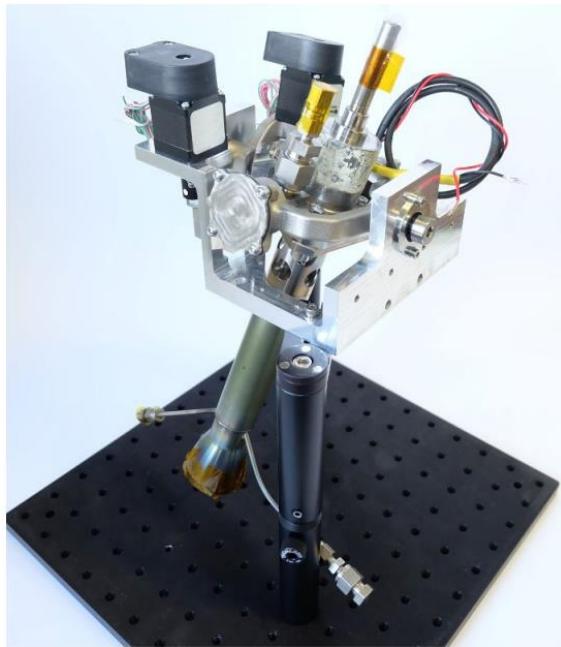
الجدول 1 دفتر الشروط الوظيفية

نوع الشرط	الشرط	أهمية الشرط
وظيفي	تجهيز شعاع الدفع للجسم الطائر	مطلوب
	يؤمّن مجالات الحركة بدرجتي حرية وفق رابطتين دورانيتين	مطلوب
	تحقيق سرعات دورانية عظمى على المحاورين لا تقل عن 15 دورة في الدقيقة	مطلوب
	دقة توجيه لا تقل عن 0.3°	مطلوب
هندسي	أبعاد أعظمية ارتفاع 180 mm × عمق 200 mm × عرض 200 mm)	مطلوب
	الاهتمام بالناحية الجمالية للتصميم	مقترن
حدّي	وزن مجلل قليل لا يزيد عن 400 g	مطلوب
	يستطيع التحكم بحمل 150 g التغذية عن طريق بطاريات قابلة للشحن	مقترن
طاقة		

2. الدراسة المرجعية

2.1. توجيه شعاع الدفع للأقمار الصناعية الصغيرة [1]

يوضح الشكل (3) أحد ميكانزمات توجيه شعاع الدفع لقمر صناعي صغير.



الشكل 3 نموذج ميكانزم توجيه شعاع الدفع لجسم طائر

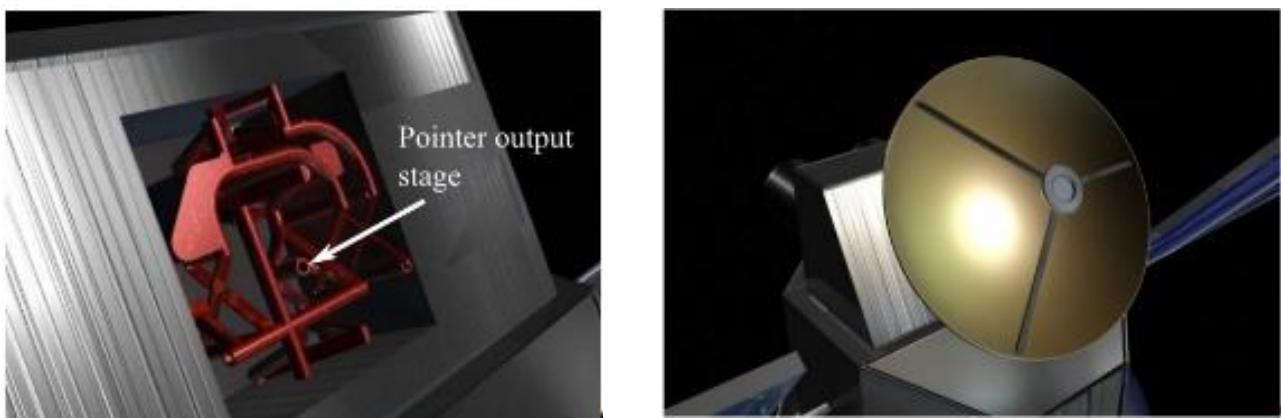
بالسنوات الحديثة ومع تقدم تكنولوجيا الأقمار الصناعية أصبحت هذه الأقمار صغيرة الحجم مما يستدعي حلولاً جديدة ومبتكرة من جميع النواحي وعلى وجه الخصوص من ناحية ميكانزمات التوجيه. ومن هنا أتى دفتر الشروط الخاص بهذه الوظيفة والذي هو حسب Perez وزملائه في [1] ينص على التالي:

- درجة حرية مستقلتين
- مجال حركة مخروط بزاوية رأس 10° إلى 15°
- دقة توجيه 0.3°
- سرعة عظمى $1.5^{\circ}/s$
- كتلة 0.5 Kg إلى 0.3 Kg

بالإضافة إلى شروط أخرى تتعلق بدورات العمل ودرجة الحرارة المتحملة وغيرها. والاختلاف حسب نوع المحرك المستخدم في شعاع الدفع.

2.2. استخدام الميكانيزمات المطاوعة في توجيه لاقط إشارة لقمر صناعي [2]

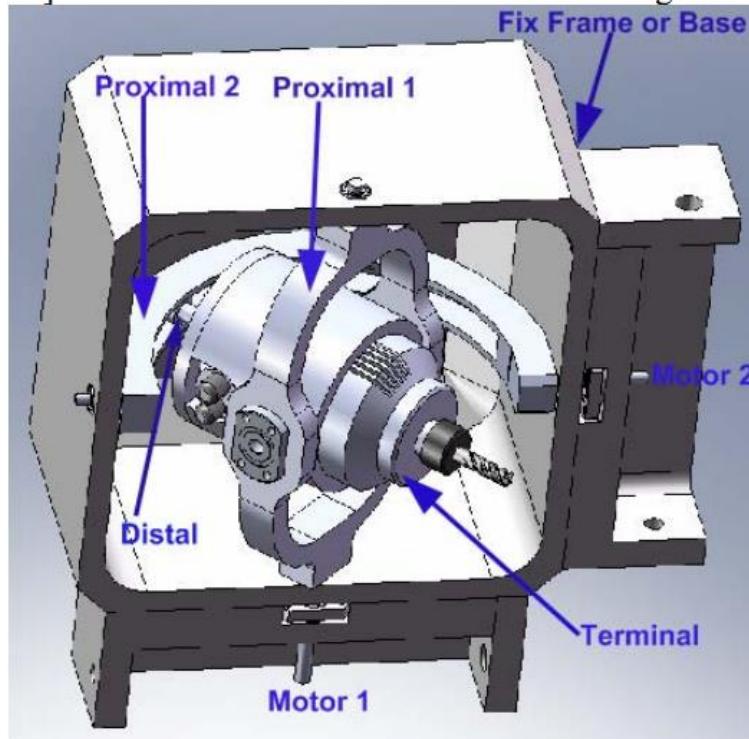
يوضح الشكل (4) تصميم لميكانيزم مطاوع مستخدم في توجيه لاقط إشارة لقمر صناعي ومقترح لتوجيهه شعاع الدفع لقمر صناعي. وحسب ما توصلوا إليه من نتائج عملية ونظرية فكان للميكانيزم المطاوع العديد من المميزات للعمل بهذا المجال مثل دقة الحركة وتحمل حمولات تصل لـ $N = 450$. كما تجاوز التصميم المتطلبات التي كان عليهم تأديتها. وتوصلوا إلى أن أداء الميكانيزم بالإضافة إلى قدرة التصنيع بالطباعة ثلاثية الأبعاد يجعله مناسباً للعديد من تطبيقات الفضاء ويؤمن أداء عالي في النظم متعددة المحاور بإلغاء الاحتكاك والاهتراء والخلوصات وال الحاجة للمزلقات. ومن الممكن مستقبلاً تحسين وأمثلة التصميم من ناحية الكتلة والحجم وغيرها من البارامترات التصميمية.



الشكل 4 استخدام الميكانيزمات المطاوعة في توجيه لاقط إشارة لقمر صناعي

2.3. ميكانيزم Agile Eye التفرعي [3]

أحد الميكانيزمات التي تؤدي وظيفة توجيه نهاية طرفية ما بدرجتي حرية وبفعالية هو الميكانيزم Agile Eye أو العين الرشيقه. وهو ميكانيزم تفرعي بدرجتي حرية دورانتين يؤمن حركة دقيقة ورشيقه. يوضح الشكل (5) هذا الميكانيزم واستخدامه في منصة بخمس درجات حرية. يستخدم هذا الميكانيزم في العديد من التطبيقات مثل توجيه كاميرا والعمليات الجراحية.

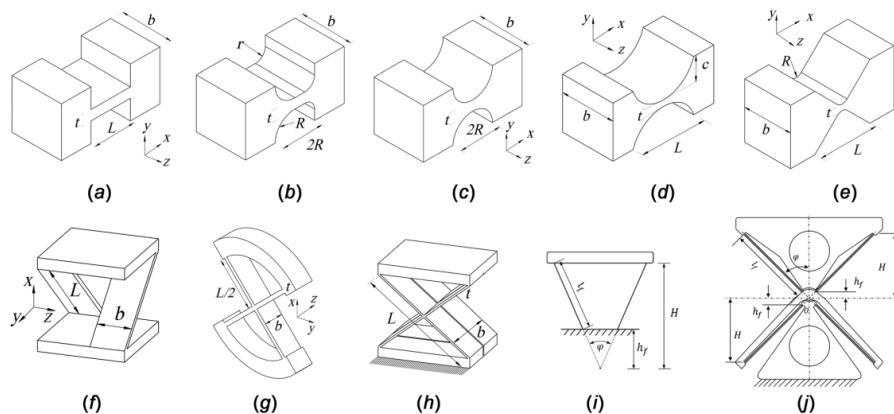


الشكل 5 الميكانيزم التفريعي Agile Eye

تم في هذا المشروع دراسة النموذج الهندسي والديناميكي للميكانيزم والتحكم به عملياً إلا أن النتائج العملية كانت مغایرة قليلاً للدراسة النظرية وكان السبب حسب ما ورد في [3] هو عدم دراسة عوامل الاحتكاك بين روابط الميكانيزم.

2.4. أنواع الروابط الدورانية المطاوعة [4]

يوضح الشكل (6) بعض أنواع الروابط الدورانية التي يمكن استخدامها لتحقيق حرفة دورانية بميكانيزم مطاوع. وتؤمن الدراسة مقارنة مفصلة لكل من الأنواع من حيث مجال الحركة الذي يمكن تأمينه والانزياح في المحور لكل من الأنواع بالإضافة لثابت الصلابة لها من أجل بارامترات محددة.



الشكل 6 بعض أنواع الروابط الدورانية المطاوعة التي يمكن استخدامها

بالمجمل كان النوع f يؤمن أكبر مجال حركة مع ازياح أكبر من الأنواع الأخرى إلا أنه يمكن تفاديه باستخدام رابطتين متاظرتين بدلاً من رابطة واحدة. يوضح الشكل (7) جدول المقارنة بين الأنواع التي تم عرضها.

Compliant revolute joints	Primitive flexure	Complex flexure	Notch-type	Leaf-spring	Tape-spring	Curve-beam	Contact-base	Range of motion θ_z (rad)	Axis drift δ_z (μm)	$\text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad} \times 10^{-3}$	$\text{N}/\text{mm} \times 10^{-3}$
Fig. 3(a) [36–39]	•	•						0.113	198.7	6.481	648.15
Fig. 3(b) [40]	•	•						0.06	4.2	0.112	—
Fig. 3(c) [36–39]	•	•						0.03	34	23.342	1267.6
Fig. 3(d)-a [41,42]	•	•						—	20.43	—	—
Fig. 3(d)-b [41,42]	•	•						—	7.103	—	—
Fig. 3(d)-c [42,43]	•	•						—	23.342	1267.6	55.05
Fig. 3(d)-d [44]	•	•						—	36.12	1832	—
Fig. 3(e) [44]	•	•						—	34.142	1585.1	—
Fig. 3(f) [38,45,46]	•	•						1.676	6620	0.0079	5.6
Fig. 3(g) [38]	•	•						0.419	82.8	0.0315	22.4
Fig. 3(h) [47]	•	•						0.838	130	0.0078	1.4
Fig. 3(i) [48,49]	•	•						0.173	34	0.094	11.2
Fig. 3(j) [48–51]	•	•						0.346	11.9	0.047	5.6

الشكل 7 جدول مقارنة بين أنواع الروابط الدورانية المطاوعة

2.5. أنواع المواد المستخدمة في الميكانيزمات المطاوعة [5]

يمكن استخدام العديد من المواد ذات خصائص المطاوعة والمرنة من أجل الميكانيزمات المطاوعة بشكل عام. وعلى وجه الخصوص فإن المواد شائعة الاستخدام في هذا المجال هي: الذهب والإيبوكسي وأنواع السيليكون. بالإضافة إلى مادة **fila flex** المناسبة للطباعة ثلاثية الأبعاد وأيضاً مادة **PLA** إلا أن مرونتها أقل مما يجعلها أقل مناسبة لتطبيقات الميكانيزمات المطاوعة، لكن ذلك لا يمنع من استخدام هذه المادة في بعض تطبيقات الميكانيزمات المطاوعة. ويوضح الشكل (8) ميكانيزم مطاوع مصنوع من مادة **PLA**.



الشكل 8 ميكانيزم مطاوع مصنوع من مادة **PLA**

3. التحليل الوظيفي

3.1. الوظيفة الرئيسية للنظام

الوظيفة الرئيسية المطلوبة من هذا النظام هي تأمين الحركة بدرجتي حرية دورانتين بمجالات الحركة والدقة المطلوبتين. وبالتالي فإن دخل النظام هو الأوامر الحركية والطاقة وخرجه هو التوجيه المرغوب على كل من المحورين. ويوضح الشكل (9) الوظيفة الرئيسية للنظام.

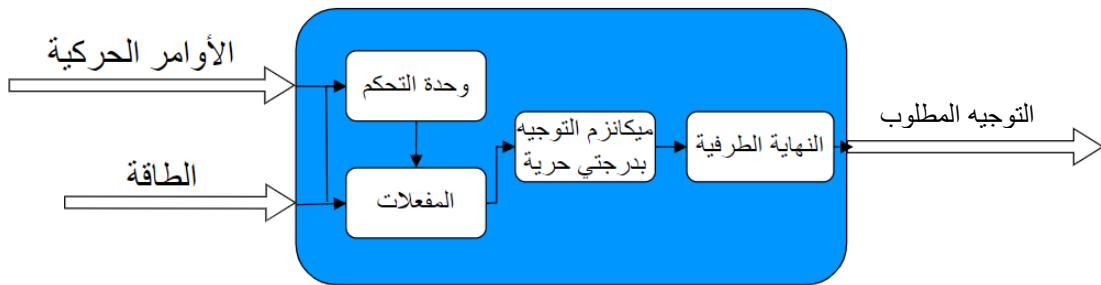


الشكل 9 الوظيفة الرئيسية للنظام

3.2. تحليل النظام لوظائفه الجزئية

ينقسم النظام لتأمين الحركة المطلوبة إلى عدة أجزاء كما هو موضح في الشكل (10):

- وحدة التحكم: التي تأخذ الأوامر الحركية وتفسرها لتعطي أوامر العمل للمفعولات.
- المفعولات: تأخذ الأوامر من وحدة التحكم وتنتج الحركة المطلوبة.
- ميكانزم التوجيه: وهو الجزء الأساسي الأهم في النظام والذي يحول الطاقة الميكانيكية الناتجة عن المفعولات إلى الحركة المرغوبة وبالتالي التوجيه المرغوب.
- النهاية الطرفية: والتي بدورها ستحول الحركة الناتجة عن الميكانزم إلى شكل يمكن التعامل معه للتتأكد من صحة الحركة ومقارنة النتائج عملياً.



الشكل 10 تقسيم النظام إلى وظائفه الجزئية

3.3. اختيار الحلول المناسبة لتحقيق الوظائف الجزئية

يوجد العديد من الحلول التي يمكن استخدامها من أجل كل وظيفة من الوظائف السابقة، ولذلك لا بد من مقارنة هذه الحلول واختيار الحل الأمثل لكل منها بناء على كلا الدراستين المرجعية والنظرية. بالإضافة إلى أن كل وظيفة تعتمد في اختيارها على الوظيفة التالية وبالتالي يجب اختيار الحلول من النهاية الطرفية صعوداً إلى وحدة التحكم المناسبة.

3.4. النهاية الطرفية

من أجل عمليات المقارنة لا بد من وجود مؤشر في النهاية الطرفية للميكانيزم يدل على زاوية الحركة المحققة على كل من محوري الدوران بشكل دقيق يسمح لنا بقياس الأخطاء ودقة التوجيه بدقة من رتبة 0.3° والتي هي الدقة المرغوبة من الجهاز.

- مسطرة مع منقلتين مرقمتين: هذا الحل الأبسط من ناحية المتطلبات إلا أنه يصعب الحصول على منقلة بأجزاء الدرجات كما أنها تجعل أمر قراءة القيم صعبة على المستخدم وتحتاج إلى التوقف عند كل وضعية للتأكد يدوياً من أن القيمة صحيحة.
- كاميرا مع جدار يبعد مسافة محددة: ويعتبر هذا الحل مكلفاً كما أنه يحتاج إلى معايرة دقيقة ومعالجة صورة للتحقق من الحركات.
- مؤشر ليزري مع جدار يبعد مسافة محددة: وهو حل متوسط التكلفة سهل التطبيق يدل بشكل مرئي وواضح على تحقيق الحركات المرغوبة من خلال رسم أشكال معينة على الجدار وتكرار الرسم عدة مرات للتأكد من وثوقية النظام وتكراريته. ويوضح الشكل (11) هذا المؤشر.



الشكل 11 المؤشر الليزري المستخدم كنهاية طرفية للنظام

ميكانيزم التوجيه

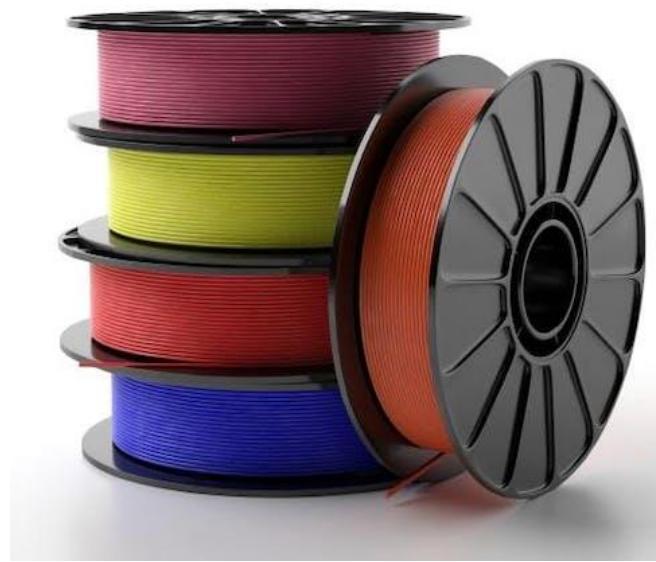
وهنا تكمن الغاية من المشروع وهي المقارنة بين نوعي الميكانيزمات المطاوعة والتقاليدية.

الميكانيزم المطاوع

أما من أجل الميكانيزمات المطاوعة فعلينا اختيار شيئاً:

- نوع المادة المستخدمة:

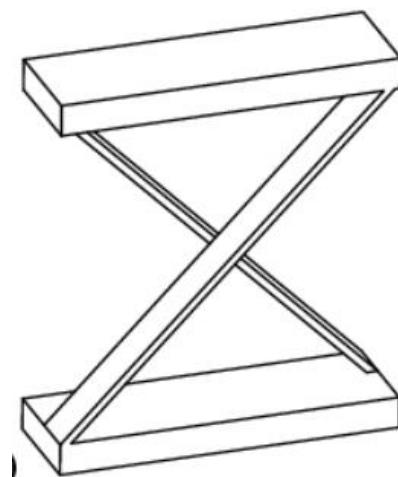
ويستخدم عادة من أجل التطبيقات الفضائية مادة التيتانيوم الذي يقاوم الحرارة والظروف القاسية بالإضافة إلى أنه يؤمن مرنة وصلابة للميكانزم بشكل عام. أما في حالة نموذج مخبري فيمكن استخدام عدة مواد منها مادة *PLA* المتوافرة في المخبر والتي تم اختيارها من أجل بناء النموذج.



الشكل 12 مادة *PLA* المستخدمة

- نوع الروابط الدورانية المستخدمة وبارامتراطها:

والتي تم اختيارها بناء على ما ورد في الدراسة المرجعية حيث تم اختيار النموذج *cross-axis pivot* الموضح في الشكل(13) والذي يؤمن مجال الحركة المطلوب.

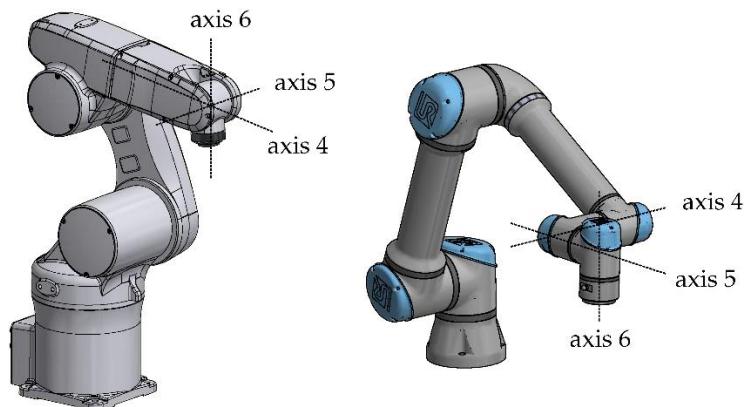


الشكل 13 الرابطة الدورانية *Cross-Axis Pivot* المطابعة

الميكانيزم التقليدي

يوجد خياران أساسيان باختيار ميكانيزم تقليدي وهي:
ميكانيزم تسلسلي:

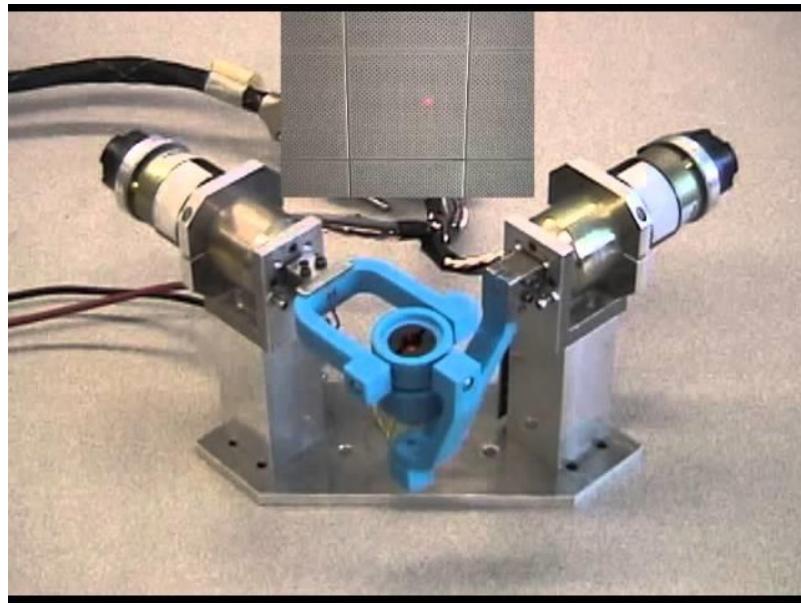
وهو الحل الأبسط من الناحية التصميمية ومن ناحية النمذجة الهندسية إلا أن للميكانيزمات التسلسلية بعض المشاكل مثل تحمل المحركات وزنها على بعضها البعض (والتي يمكن حلها تصميمياً). يوضح الشكل (14) نموذجاً لذراع روبوتية تسلسلية بست درجات حرية دورية نهتم فيها بالمحورين axis-5 و axis-6.



الشكل 14 نموذج عن ذراع روبوتية تسلسلية

ميكانيزم تفرعي:

بعد الحل التفرعي أكثر تعقيداً من ناحية النموذج الهندسي ومن الناحية التصميمية إلا أن له بعض المميزات التي نحتاجها في نظامنا مثل الجسأة ورشاقة الحركة التي تعطي دقة أفضل في تأدبة الحركة المرغوبة.



الشكل 15 نموذج عن حل تفرعي

3.5. المفعلات

يمكن استخدام العديد من أنواع المفعلات سنهتم بالمحركات منها وسنستعرض بعضًا من أنواع المحركات التي قد تكون مناسبةً لأداء الوظيفة المطلوبة:

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

❖ **المحركات الخطوية Stepper Motor:** المشكلة الأساسية باستخدام هذا النوع من المحركات هو وزنها الكبير نسبياً عادةً، بالإضافة إلى أن التحكم بالموضع فيها نسبياً يتحدد بالوضع الذي تم تشغيل المحركات فيه.

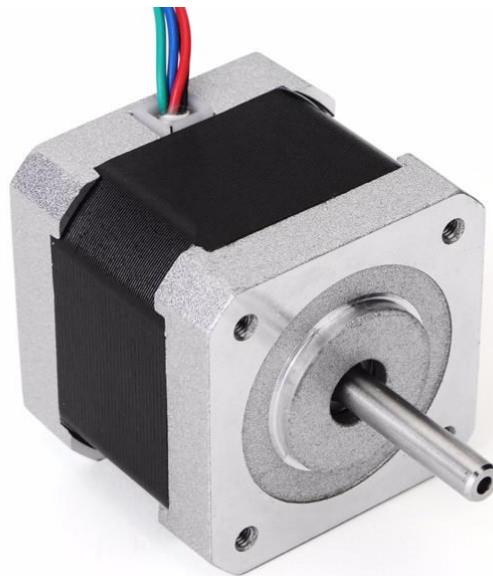
❖ **محركات Brushless DC Motor:** هذه المحركات هي الأنسب لتطبيقنا بعد إضافة Encoder مناسب لتتأمين التحكم بالسرعة والموضع المطلوبين. حيث تؤمن هذه المحركات استطاعة أعلى من أجل حجم أصغر وزن أقل، الأمر المهم تواجده في تطبيقنا لتوجيه شعاع الدفع لجسم طائر.

من هذه المحركات تم اختيار نوع Maxon EC45 Flat الموضح في الشكل (16) 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 وزن كلي 110 g.



الشكل 16 المحرك Maxon EC45 Flat

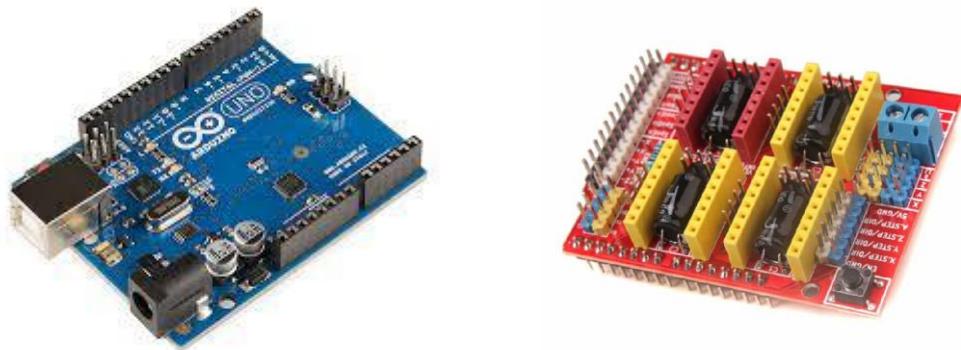
ملاحظة: المحرك المذكور لم يتوافر ولذلك تم استخدام محرك خطوي. يوضح الشكل (17) المحرك Nema-17 المختار والذي يؤمن عزم أعظمي 0.55 Nm عند التغذية بـ 12 V والسرعة 100 RPM .



الشكل 17 المحرك Nema-17 المستخدم

3.6. وحدة التحكم

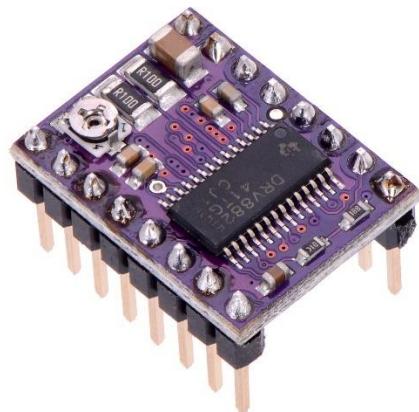
بما أننا نريد التحكم بمحركين من نوع Stepper فالحل الأنسب والأقل كلفة هو استخدام متحكم من نوع CNC Shield (18) مزود بـ Arduino Uno المبينة بالشكل (18) الذي له القدرة على التحكم بثلاث محركات خطوية سوية.



الشكل 18 بطاقة Arduino Uno و CNC Shield الخاصة بها

كما تؤمن بطاقة Arduino Serial تواصيل من خلاله إرسال الأوامر من الحاسوب إلى البطاقة ومن ثم إلى المحركات للقيام بالحركة المطلوبة.

نحتاج أيضاً لإيصال الأوامر إلى المحركات إلى Driver يقوم بتحويل الأوامر المنطقية إلى إشارات كهربائية يعمل من خلالها المحرك الخطوي. ومن أجل المحرك المستخدم Nema-17 نجد أنه تكفي دارة القيادة DRV8825 الموضح بالشكل (19). والذي يؤمن سحب تيار حتى 2.2 Amp الذي يكفي لقيادة محرك ذو سحب التيار الأعظمي 1.2 Amp Nema-17.



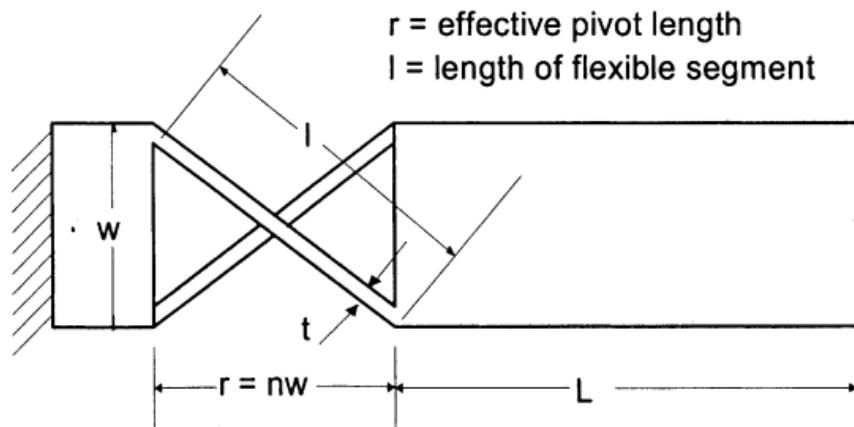
الشكل 19 دارة القيادة DRV8825

٤. الدراسة النظرية

4.1. الميكانيزم المطاوع

4.2. دراسة الرابطة الدورانية [6]

في هذه الفقرة سنقوم بدراسة الرابطة الدورانية Cross-Axis Pivot والتي تؤمن مجال الحركة المطلوب عند اختيار معاملات مناسبة. يوضح الشكل (20) هذه المعاملات ودلائلها.



الشكل 20 المعاملات الخاصة بـ Cross-Axis Pivot

من أجل تحديد الرابطة الدورانية من النوع Cross-Axis Pivot علينا أن نعين أربع بارامترات أساسية وهي:

- طول الصلع l
- سماكة الصلع t
- عرض الرابطة w
- طول الرابطة r ومنه نعرف النسبة بين الطول والعرض $n = \frac{r}{w}$

بالإضافة إلى اختيار المادة التي سنصنع منها الميكانيزم. وللقيام بهذا الاختيار علينا بداية نمذجة الرابطة:

نموذج نابض فتل ثابت صلابة K

يمكن حسب [6] نمذجة القطعة كرابطة دورانية بسيطة في مركزها بعلقة خطية بين العزم المطبق على الرابطة والزاوية الناتجة أي يمكن اعتبارها نابض فتل بسيط ثابت صلابة K وتعطى علاقته بالشكل:

$$K = \frac{K_0 EI}{2l} \dots (1)$$

حيث:

- عامل يونغ الخاص بالمادة E
- عزم عطالة المقطع $I = \frac{bt^3}{12}$ بحالة مقطع مستطيل بعرض b وسماكة t

• معامل الصلابة K_θ

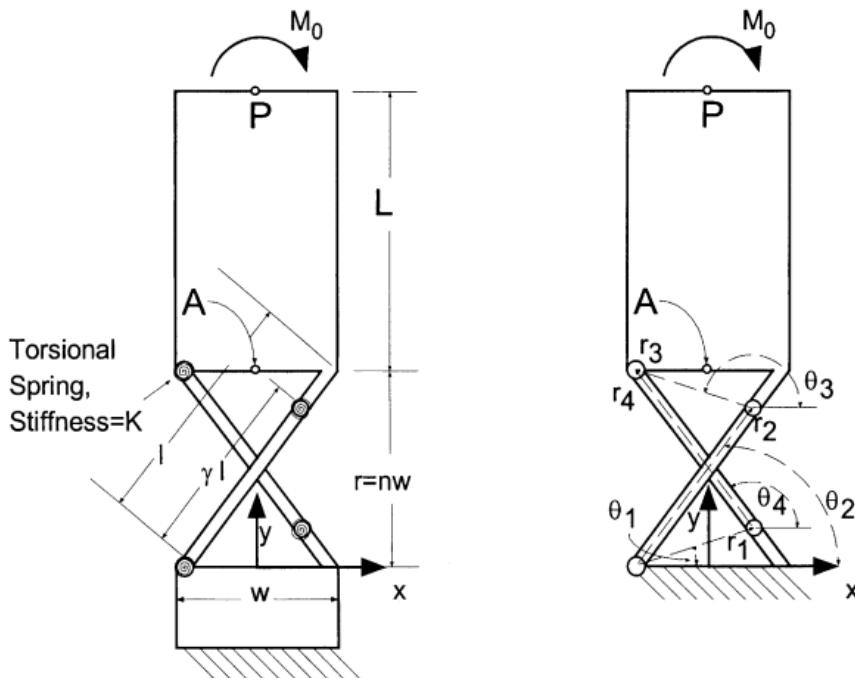
لتحديد معامل الصلابة يتم إيجاد أصغر خطأ L_K عند زاوية 1.1 rad فنحصل على العلاقة:

$$K_\theta = 5.300185 - 1.6866n + 0.885356n^2 - 0.2094n^3 + 0.018385n^4$$

وذلك من أجل $0.5 \leq n \leq 4$

نموذج four-bar

يعتبر النموذج السابق نموذجاً بسيطاً سهل الاستخدام والحساب مما يجعله مناسباً لغرض التصميم. لكن يبقى هذا النموذج أكثر دقة من سابقه الذي كانت فيه نسبة الخطأ حوالي 10%. تأتي فكرة هذا النموذج من كون القطعة متاظرة حول محور مار بمركزها مما يجعلنا قادرين على نمذجتها بنموذج ميكانيزم four-bar فنعرف الأربع زوايا $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ كما بالشكل (21) والذي يعد النموذج الخاص بالرابطة في اتجاه واحد للحركة (الاتجاه الآخر تكون فيه الروابط الثابتة في النهاية والتي تبعد مسافة γl معكوسه).



الشكل 21 نمذجة الرابطة four-bar بالنموذج Cross-Axis Pivot

حيث نعتبر أربع روابط دورانية بسيطة. اثنان منها بنهائيي الصلعين واثنان على بعد γl حيث γ معامل نصف القطر المميز ويحسب بنفس الطريقة التي أوجدت بها K_θ فيعطي بالعلاقتين:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = 2.208105 - 10.0489n + 27.83212n^2 - 37.7021n^3 + 25.032n^4 - 6.5358n^5, \quad 0.5 \leq n < 1 \\ \gamma = 0.811175 - 0.03329n + 0.008143n^2 - 0.00075n^3, \quad 1 \leq n \leq 4 \end{array} \right.$$

الزاويتين θ_3, θ_1 معلومتين بحسب بارامترات التصميم ويبقى معرفة θ_2, θ_4 والتي يمكن معرفتها من حل المعادلتين:

$$r_2C_2 + r_3C_3 = r_1C_1 + r_4C_4$$

$$r_2S_2 + r_3S_3 = r_1S_1 + r_4S_4$$

حيث:

$$r_2 = r_4 = \gamma l$$

$$r_1 = r_3 = \sqrt{(\gamma w)^2 + r^2(1 - \gamma)^2}$$

فتصبح المعادلة النهائية للعزم بحسب نموذج *four-bar* هي من الشكل:

$$M = T_2 + T_3 - (T_1 + T_2) \frac{r_3 S_{3-4}}{r_2 S_{4-2}} - (T_3 + T_4) \frac{r_3 S_{3-2}}{r_4 S_{4-2}} \quad \dots (2)$$

حيث:

$$T_1 = K(\theta_2 - \theta_{20})$$

$$T_2 = K(\theta_2 - \theta_{20} - \theta_3 + \theta_{30})$$

$$T_3 = K(\theta_4 - \theta_{40} - \theta_3 + \theta_{30})$$

$$T_4 = K(\theta_4 - \theta_{40})$$

حيث تدل الدالة 0 على الزاوية الابتدائية للرابطة ونعرف K ثابت صلابة كل من الروابط الدورانية البسيطة والمعرف بالعلاقة:

$$K = \gamma K_{\Theta,fb} \frac{EI}{l}$$

وهنا $K_{\Theta,fb}$ معرف بنفس الطريقة السابقة لـ K_Θ وتدل fb على أنه خاص بالنماذج *four-bar* ويعطي بالعلاقة:

$$\begin{cases} K_{\Theta,fb} = 1.075835 + 6.818114n - 13.6023n^2 + 11.52314n^3 - 3.53289n^4, & 0.5 \leq n < 1 \\ K_{\Theta,fb} = 2.241032 + 0.047655n - 0.00491n^2, & 1 \leq n \leq 4 \end{cases}$$

المجال الأعظمي للحركة

من أهم المعلومات التي يجب علينا معرفتها عن الرابطة هو مجال الحركة الأعظمي الذي تتحققه وذلك لاختيار البارمترات التصميمية الخاصة بالرابطة الدورانية التي تحقق دفتر الشروط. ولحساب هذه القيمة علينا إيجاد علاقة بين الإجهادات الأعظمي الذي تتعرض له الرابطة الدورانية والانزياح المطبق عليها.

ويمكن حسب ما ورد في [6] نمذجة العلاقة بعلاقة خطية من الشكل:

$$\sigma = \frac{S_\theta \theta Et}{2r} \dots (3)$$

حيث S_θ معامل الإجهاد يحسب من العلاقة:

$$S_\theta = 0.062998 + 1.884218n - 1.43653n^2 + 0.551786n^3 - 0.10523n^4 + 0.007889n^5$$

وذلك من أجل $0.5 \leq n \leq 4$

كما يمكن أيضاً نمذجة العلاقة بشكل أكثر دقة بعلاقة تربيعية من الشكل:

$$\sigma = \frac{Et}{2r} (S_1 \theta + S_2 \theta^2) \dots (4)$$

حيث يعطى كل من المعاملين S_1, S_2 بالعلاقة:

$$S_1 = 0.189394 + 0.899845n - 0.4333n^2 + 0.097866n^3 - 0.00839n^4$$

$$S_2 = -0.09799 + 0.982995n - 0.96184n^2 + 0.413319n^3 - 0.08387n^4 + 0.00653n^5$$

وذلك من أجل $0.5 \leq n \leq 4$

النمذجة على Matlab

من أجل اختيار بارامترات التصميم لا بد من دراسة المجال الأعظمي للحركة ولذلك قمنا بتطبيق المعادلات الخاصة بمجال الحركة على برنامج *Matlab* وذلك باختيار المادة *PLA*. نستخدم الخصائص الميكانيكية للمادة المذكورة في [7] حيث أن بارامترات الطباعة المستخدمة هي:

- *Printing velocity 50 mm/s*
- *Layer height 0.2 mm*
- *Filament width 0.4 mm*
- *Infill density 20%*

فختار خيارات الطباعة رقم 13 من الجدول المعطى في المرجع والموضح في الشكل (22) وبالتالي بحسب جدول الخصائص الميكانيكية بحسب رقم خيارات الطباعة الموضح في الشكل (23) يكون:

$$\sigma_{max} = 72.3 MPa$$

$$E = 2.41 GPa$$

N°	Filament Width [mm]	Layer Height [mm]	Infill Density (%)	Printing Velocity [mm/s]	LaY-Axiser Orientation	Infill
1	0.3	0.1	25	20	X-axis	Rectilinear
2	0.3	0.1	50	30	Y-axis	Linear
3	0.3	0.1	75	40	Z-axis	Honeycomb
4	0.3	0.2	25	30	Y- axis	Honeycomb
5	0.3	0.2	50	40	Z- axis	Rectilinear
6	0.3	0.2	75	20	X- axis	Linear
7	0.3	0.3	25	40	Z- axis	Linear
8	0.3	0.3	50	20	X- axis	Honeycomb
9	0.3	0.3	75	30	Y- axis	Rectilinear
10	0.4	0.1	25	30	Z- axis	Linear
11	0.4	0.1	50	40	X- axis	Honeycomb
12	0.4	0.1	75	20	Y- axis	Rectilinear
13	0.4	0.2	25	40	X- axis	Rectilinear
14	0.4	0.2	50	20	Y- axis	Linear
15	0.4	0.2	75	30	Z- axis	Honeycomb
16	0.4	0.3	25	20	Y- axis	Honeycomb

الشكل 22 جدول خيارات الطباعة

#	E (GPa)	Std	Rp _{0.2} (MPa)	Std	σ _{max} (MPa)	Std	ε	Std
1	2.36	0.18	53.8	3.19	64.2	8.18	4.72	1.16
2	3.06	0.07	83.5	0.95	96.0	2.98	4.90	0.64
3	1.79	0.03	11.8	1.74	11.8	1.74	0.70	0.13
4	2.74	0.03	69.7	4.10	79.0	4.97	4.68	1.10
5	1.23	0.10	7.92	1.58	7.96	1.58	0.81	0.24
6	2.71	0.03	60.1	3.09	80.8	2.36	5.85	0.50
7	0.59	0.05	6.71	1.76	6.7	1.76	1.20	0.22
8	2.78	0.11	60.6	3.45	64.1	4.43	3.37	0.32
9	2.81	0.06	65.1	3.61	79.2	6.11	4.91	0.59
10	2.29	0.29	37.1	4.04	37.1	4.04	1.64	0.05
11	3.34	0.19	67.9	3.16	83.7	4.53	4.57	0.17
12	3.69	0.08	95.3	4.26	120.0	1.38	5.34	0.20
13	2.41	0.07	50.2	6.97	72.3	8.23	5.72	0.18
14	3.45	0.33	85.0	3.67	104.6	2.16	4.98	0.17
15	2.07	0.21	26.2	3.34	26.1	3.34	1.49	0.41
16	3.19	0.06	73.4	1.15	83.8	3.87	4.09	0.36

الشكل 23 جدول الخصائص الميكانيكية لمادة PLA بحسب خيارات الطباعة

ونختار أيضاً البارامترات التصميمية:

$$t = 2 \text{ mm} \quad \bullet$$

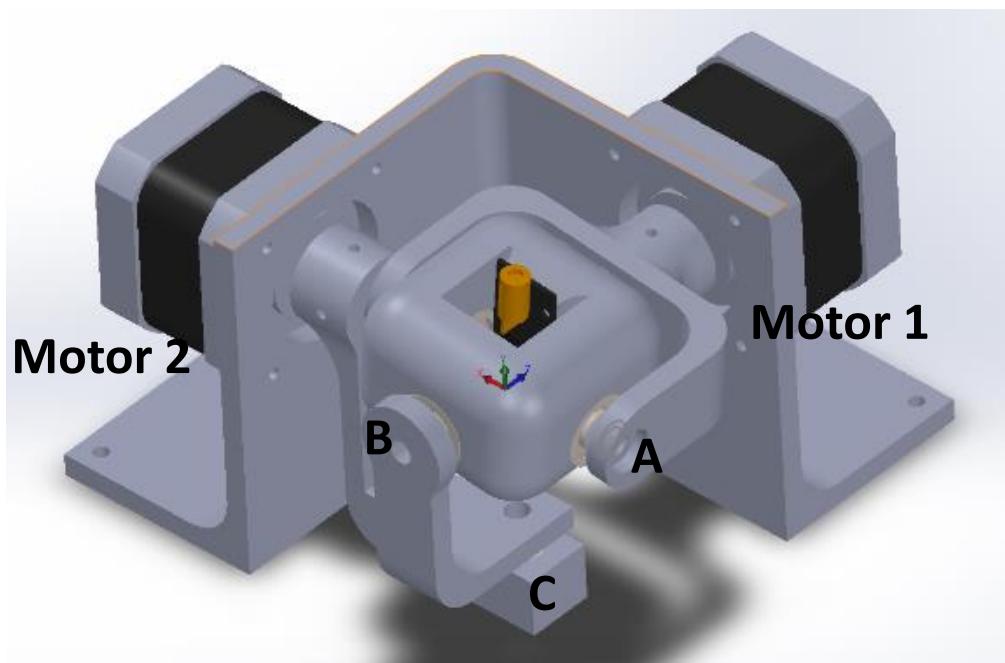
$$r = 50 \text{ mm} \quad \bullet$$

$$\begin{aligned} w &= 50 \text{ mm} & \bullet \\ l &= 67.88 \text{ mm} & \bullet \\ I &= \frac{bt^3}{12}, \quad b = 5 \text{ mm} & \bullet \end{aligned}$$

وكانت نتائج النمذجة بحسب المعادلة (4) أنه يمكن للرابطة الدوران بين قيمتين $\pm 63^\circ$ وهي تحوي المجال المطلوب $\pm 15^\circ$.

أما العزم الأعظمي المطلوب من أجل الزاوية 15° فكان $M = 0.067 \text{ Nm}$

4.3. الميكانيزم التقليدي التفرعي Agile Eye



الشكل 24 المخطط الحركي للميكانيزم 2DoF Agile Eye

نعرف ما يلي:

- الزاوية θ_1 زاوية المحرك الأول
- الزاوية θ_2 زاوية المحرك الثاني
- الزاوية α زاوية Roll حول المحور x المرتبط بالنهاية الطرفية
- الزاوية β زاوية Pitch حول المحور y المرتبط بالنهاية الطرفية
- الزاوية γ زاوية Yaw حول المحور z المرتبط بالنهاية الطرفية
- النقاط A, B, C كما هو موضح في الشكل (24)
- محاور الإحداثيات x, y, z للجملة الموضحة في الشكل (24)
- المسافة r بين المبدأ والنقطة B وهي تساوي المسافة بين المبدأ والنقطة A
- المسافة h بين المبدأ والنقطة C

النموذج الهندسي المباشر

نريد في النموذج الهندسي المباشر الحصول على علاقة كل من α و γ بزوايا المحرك θ_1 و θ_2 .

فنبأً أولاً من تحديد النقاط A, C حيث نجد بسهولة أن $(A = (-rC_1, rS_1, 0)$ و $C = (0, -hC_2, hS_2)$ وأن $R_\alpha \cdot R_\gamma$ مضربين بشعاع انزياح بمقدار r على المحور z وبالتالي تصبح $B = R_\gamma \cdot R_\alpha \cdot (0, 0, -r)^T$

حيث:

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\alpha & -S_\alpha \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} C_\gamma & -S_\gamma & 0 \\ S_\gamma & C_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

يبقى إذاً إيجاد ثلات معادلات تربط إحداثيات النقطة B بال نقطتين A, C . المعادلة الأولى تأتي من أن النقطة B تتحرك حركة وفق كرة حول المركز O ومنه:

$$x_B^2 + y_B^2 + z_B^2 = r^2 \dots (*)$$

المعادلة الثانية هي نتيجة أن البعد BC ثابت وهو مساو لـ $\sqrt{r^2 + h^2}$

$$x_B^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2 = r^2 + h^2 \dots (**)$$

المعادلة الثالثة هي نتيجة أن البعد BA ثابت وهو مساو لـ $\sqrt{2}r$

$$(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + z_B^2 = 2r^2 \dots (***)$$

بحل المعادلات $(**), (***)$ نصل لحل x_B, y_B, z_B بدلالة θ_1, θ_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_B = \tan \theta_1 * \frac{r}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \\ y_B = \frac{r}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \\ z_B = \frac{1}{\tan \theta_2} * \frac{r}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \end{array} \right.$$

ومنه وبالعودة للمعادلة (eq):

$$\begin{bmatrix} \tan \theta_1 * \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \\ \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \\ \frac{1}{\tan \theta_2} * \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 + \frac{1}{\tan^2 \theta_2}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\alpha S_\gamma \\ -S_\alpha C_\gamma \\ C_\alpha \end{bmatrix} \dots (5)$$

وبالتالي يمكن عزل γ من قسمة المركبتين 1,2 ومن ثم تعويضها في ناتج قسمة المركبتين 3,2

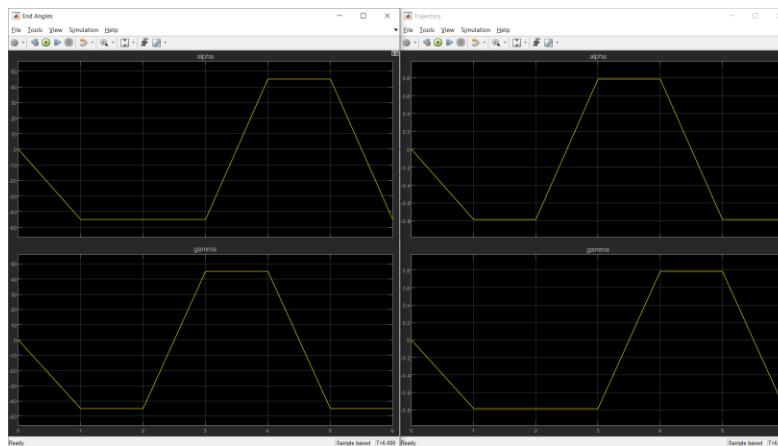
$$\begin{cases} \gamma = -\theta_1 \\ \alpha = \text{atan}\left(-\frac{\tan \theta_2}{\cos \gamma}\right) \end{cases} \dots (6)$$

النموذج الهندسي العكسي

في هذه الفقرة سنستعمل نفس المعادلة (5) ولكن بهدف الحصول على θ_1, θ_2 من α, γ المعلومتين في هذه الحالة. ومنه ينتج الحل مباشرة منها. ومنه:

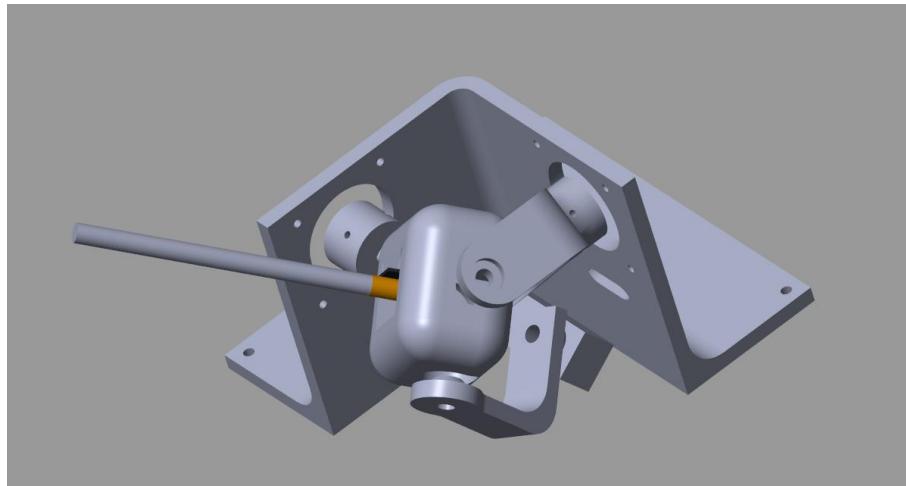
$$\begin{cases} \theta_1 = -\gamma \\ \theta_2 = \text{atan}(-\cos \gamma \tan \alpha) \end{cases} \dots (7)$$

تم تطبيق هذا النموذج على برنامج Matlab وإجراء محاكاة للميكانيزم باستخدام SimMechanics والتحقق من نتائج النمذجة وهذا ما يوضحه الشكل (25).



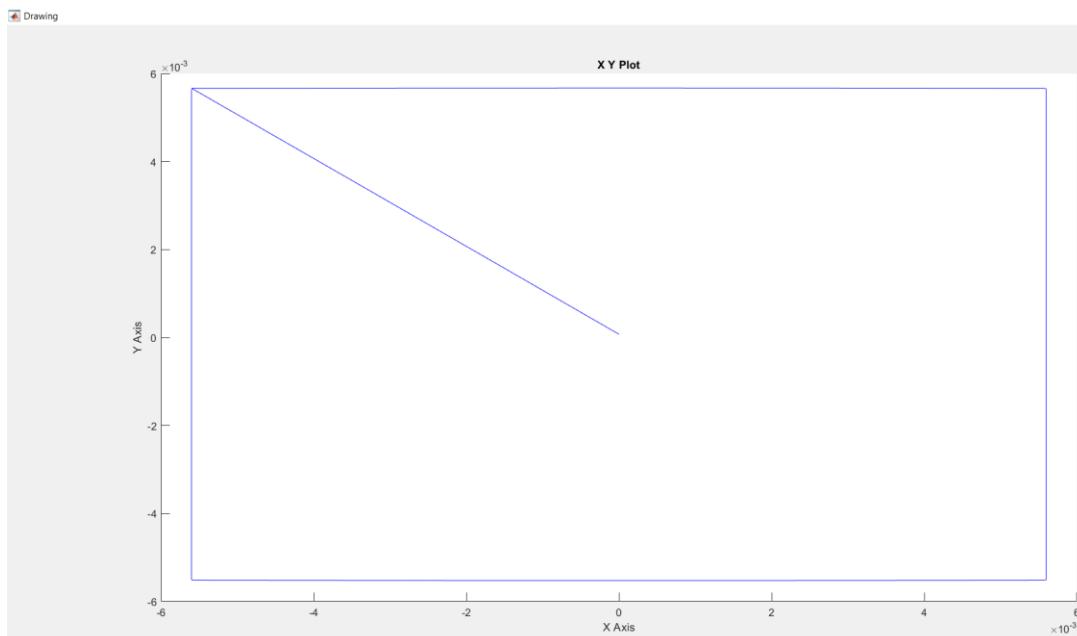
الشكل 25 الإشارة المرغوبة والإشارة الناتجة عند تطبيق النموذج الهندسي العكسي على الميكانيزم التقليدي

$$\text{كما يوضح الشكل (26) وضعية الميكانيزم في} \\ \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{4} \\ -\frac{\pi}{4} \end{bmatrix}$$



الشكل 26 نتائج محاكاة النموذج الهندسي العكسي في الوضعية $\left[-\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4} \right]$

ويوضح الشكل (27) إحداثيات النهاية الطرفية على المحورين y, x عند تحريك الميكانيزم وفق مسار مستطيل عن طريق تقطيع المسار وتحويل الإحداثيات الديكارتية إلى إحداثيات كروية تكون فيها الزوايا هي الزوايا المرغوبة من الميكانيزم.



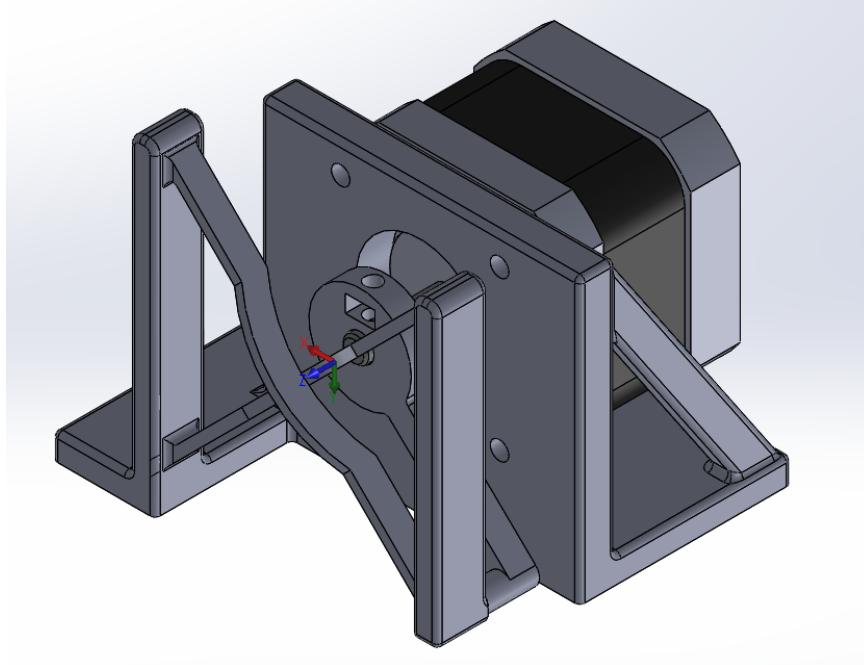
الشكل 27 المسار المرسوم باستخدام الميكانيزم على المحاكاة

5. التصميم الميكانيكي

5.1. الميكانيزم المطاوع

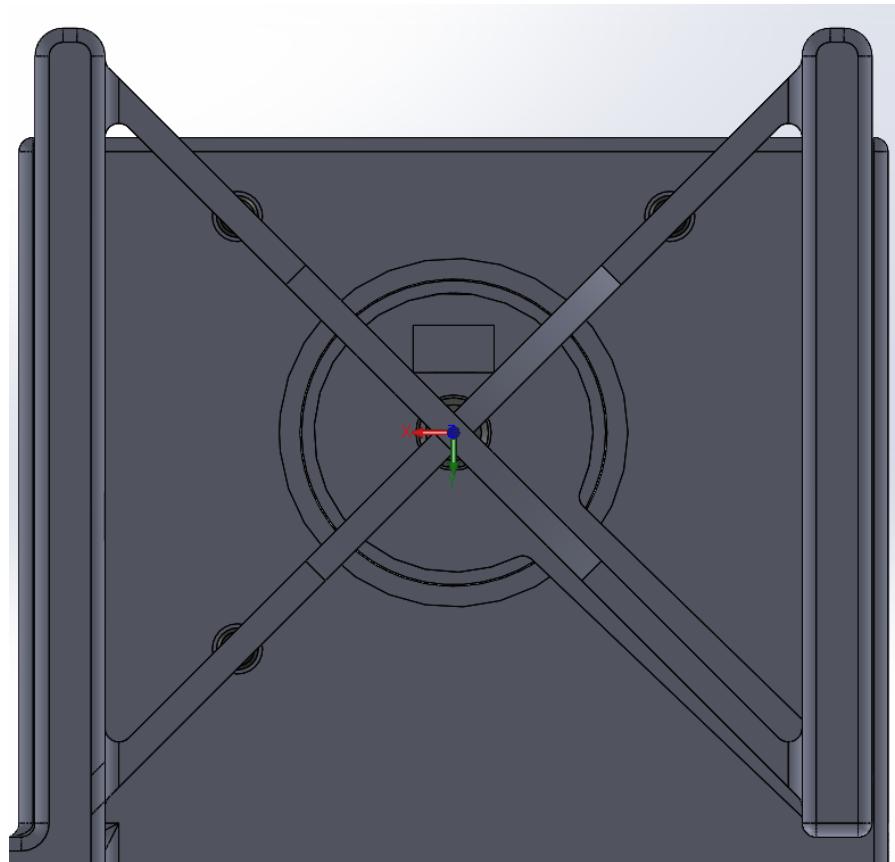
تصميم الرابطة الدورانية

انطلاقاً من الدراسة النظرية نستعمل نفس البارامترات التصميمية المذكورة. فنصل لتصميم الرابطة الدورانية المطاوعة لنقوم باختبار قدرة المحرك على تدوير الرابطة لوحدها قبل تصميم الميكانيزم كاملاً بدرجتي الحرية، فكان الشكل النهائي للتصميم مع المحرك المختار كما هو موضح بالشكل (28).



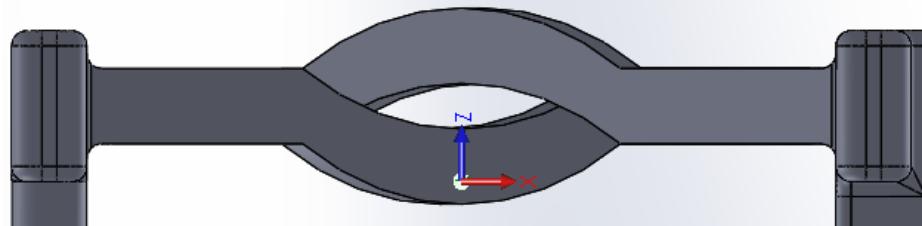
الشكل 28 تصميم الرابطة الدورانية المطاوعة مجمعة

وهو عبارة عن رابطة دورانية من النوع Cross-Axis Pivot موضحة بالشكل (29)، مع قاعدة لتنبيت المحرك Nema-17 المستخدم يتم ربطه مع الميكانيزم من خلال قارنة موضحة بالشكل (31).

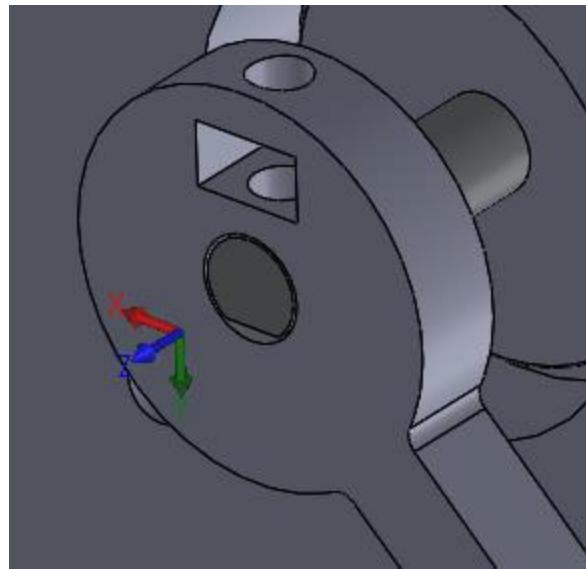


الشكل 29 تصميم الرابطة الدورانية Cross-Axis Pivot

تم تصميم ضلعي الرابطة بحيث يكونا بالمركز لإلغاء عدم التنازن وجعل القوى حول محور الدوران فقط كما هو موضح بالشكل (30).



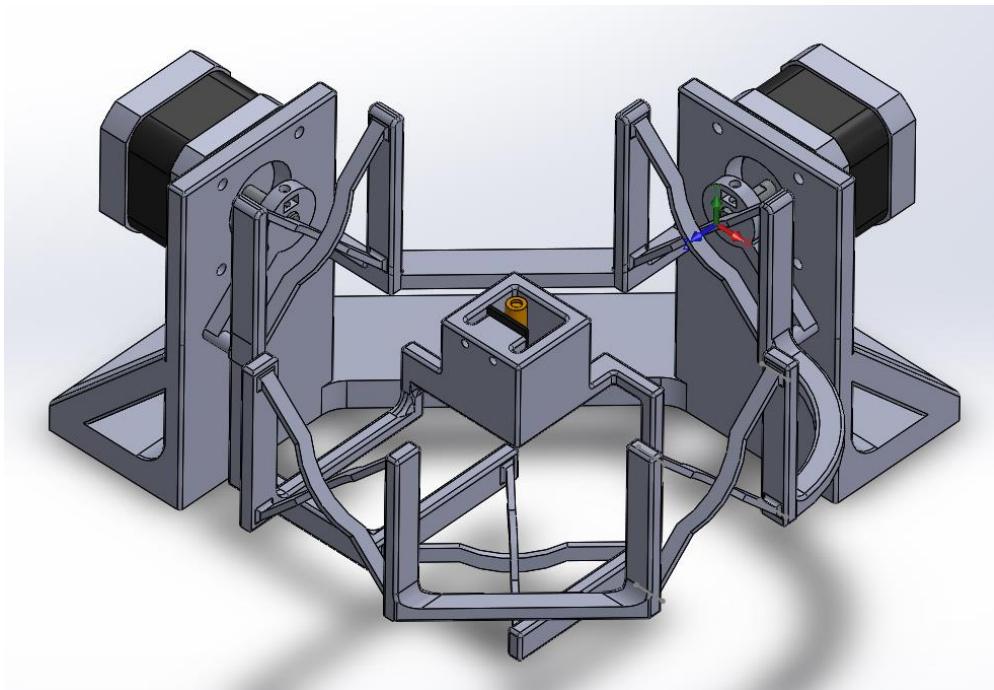
الشكل 30 مسقط علوي للرابطة الدورانية يوضح تصميم الضلعين



الشكل 31 تصميم القارنة التي تربط محور المحرك مع الميكانيزم

التصميم الكلي للميكانيزم المطاوع بدرجتي الحرية

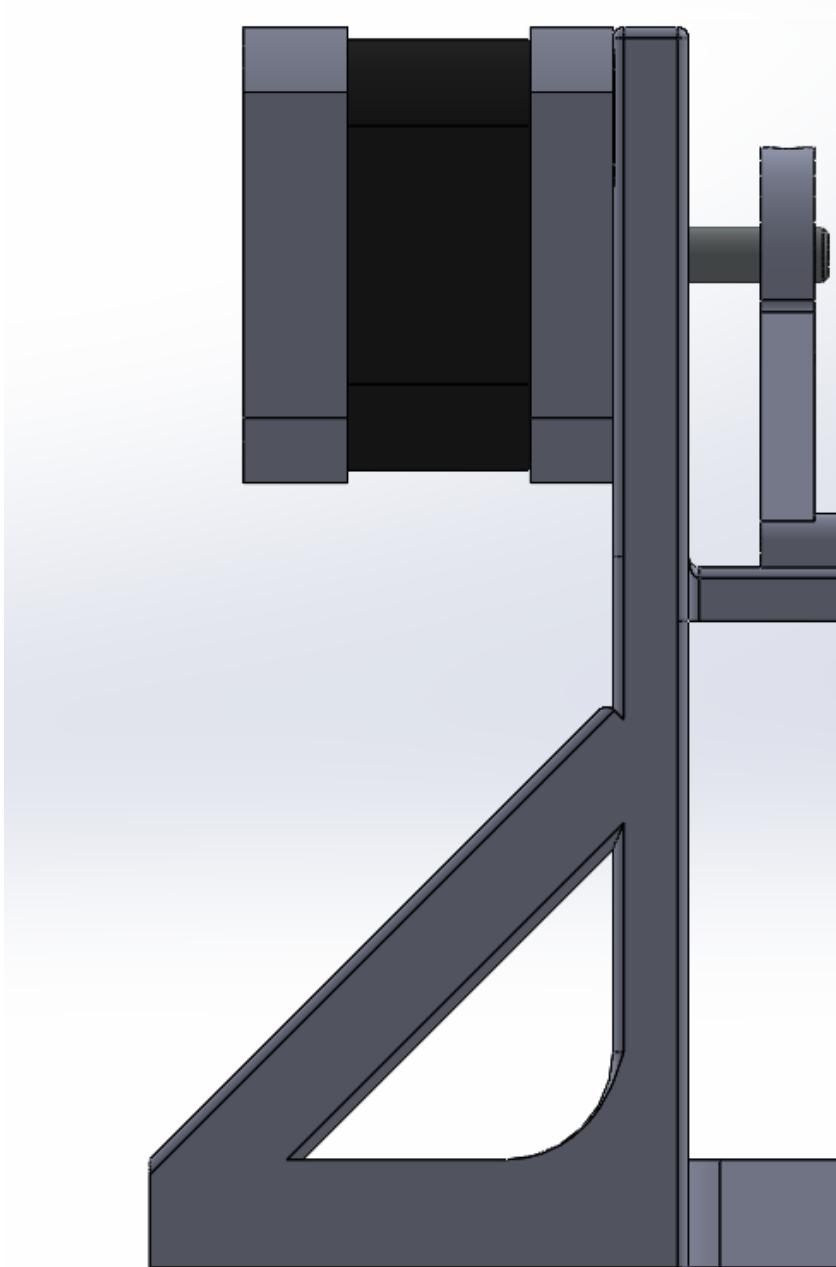
يتكون الميكانيزم من مجموعة من الروابط الدورانية المطاوعة المماثلة للرابطة المدروسة سابقاً والمبنية في الفقرة السابقة، وهي ذات نموذج حركي متوافق تماماً للميكانيزم التقليدي التفريعي Agile Eye الذي تمت دراسته وسيتم توضيح تصميمه لاحقاً. فهو عبارة عن خمس روابط دورانية تصل بينها مجموعة من الوصلات الجاسة وترتبط في نهايتها بال نهاية الطرفية التي تتكون من حامل للمؤشر الليزري المستخدم. ويوضح الشكل (32) التصميم النهائي للميكانيزم المطاوع بدرجتي الحرية الدورانيتين.



الشكل 32 التصميم النهائي للميكانيزم المطاوع

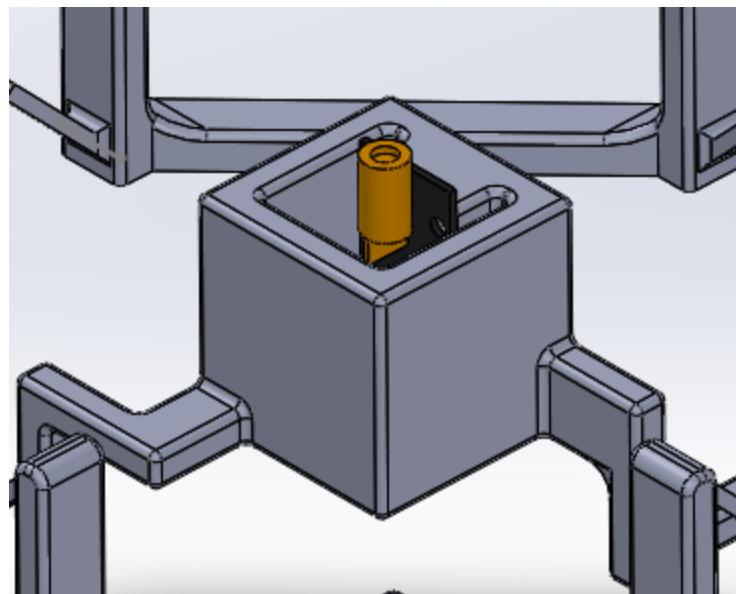
أما طريقة تثبيت المحركات فهي مماثلة للطريقة المبينة في الفقرة السابقة التي توضح تصميم القارنة لربط محور دوران المحرك مع الميكانيزم.

تم أيضاً رفع الميكانيزم قليلاً عن الأرض من أجل قدرة الميكانيزم على الحركة بحرية، مما أدى الحاجة لاستخدام أعصاب لتحمل وزن المحركات دون استخدام مفرط للمواد. ويوضح الشكل (33) توضيع الأعصاب على جسم الميكانيزم.



الشكل 33 أعصاب تثبيت المحرك على جسم الميكانيزم

تنتهي كل من السلاسلتين في النموذج الحركي للميكانيزم بوصلة تتصل مع النهاية الطرفية فنجد وصلتين متصلتان بها، وهو ما يوضحه الشكل (34).

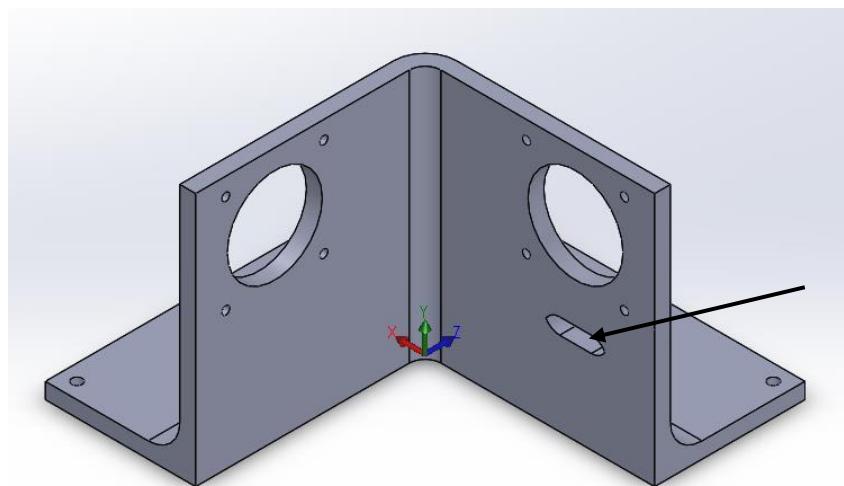


الشكل 34 وصلات اتصال النهاية الطرفية بالميكانيزم المطابع

5.2. الميكانيزم التقليدي

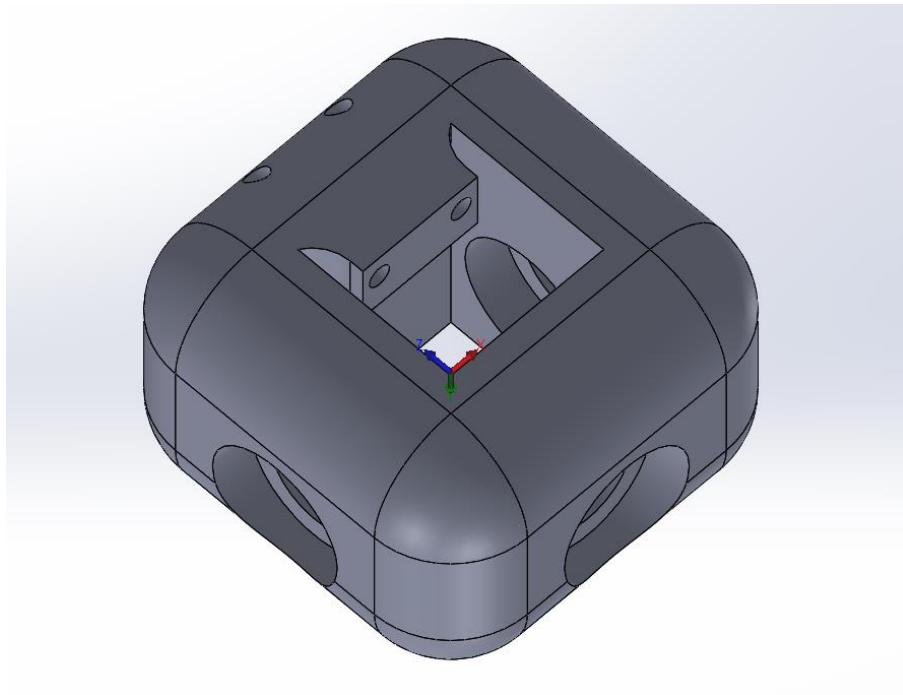
يتتألف الميكانيزم من خمس قطع أساسية وهي:

- القاعدة: ومهما تبيّن المحرّكات وتأمين الأساس الذي يستند عليه الميكانيزم، ويوضح الشكل (35) هذه القطعة. أما الثقب الموجود في جدار القطعة، والمشار إليه بسهم، فمهمته تأمين مرور أسلاك المؤشر الليزري إلى المتحكم.

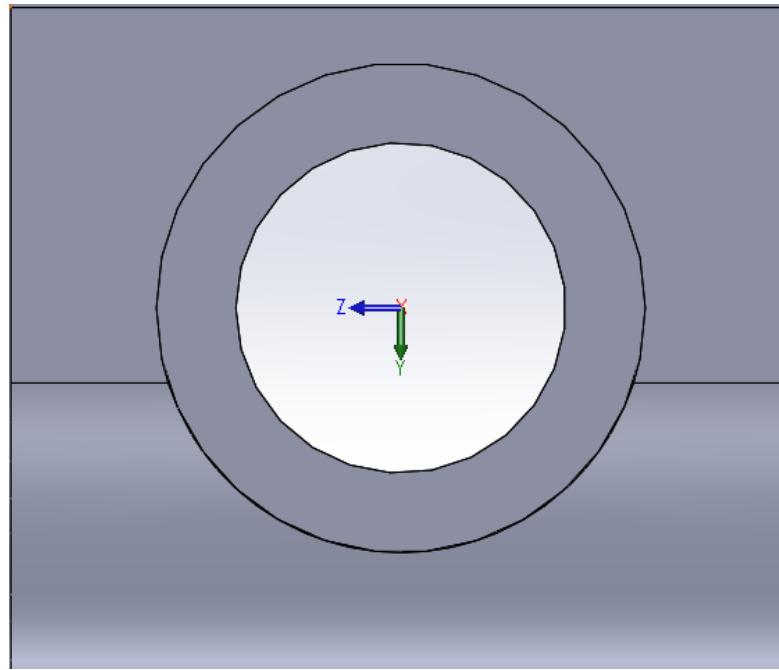


الشكل 35 قطعة القاعدة في الميكانيزم التقليدي

- النهاية الطرفية: و مهمتها حمل المؤشر الليزري و تأمين الرابطة الدورانية مع كل من الرابطة الأولى والقطعة الثانية من الراتة الثانية. لتأمين هذه الروابط الدورانية تم استعمال رولمانات $5 * 5 * 16$ mm المتوفرة في المخبر والتي تؤدي الوظيفة المطلوبة حيث أن الحمولات المفروضة صغيرة جداً بالمقارنة مع الحمولات التي تستطيع هذه الرولمانات تحملها، فكان اختيار الرولمانات له وظيفة تصميمية من حيث الأبعاد حيث يكون مناسباً لحجم القطعة. من أجل كل رابطة دورانية تم استعمال رولمانين بينهما كتف يضغط على الحلقة الخارجية لكلا الرولمانين دون أن يلامس الحلقة الداخلية له. ويوضح الشكل (36) والشكل (37) القطعة والكتف بين الرولمانين.

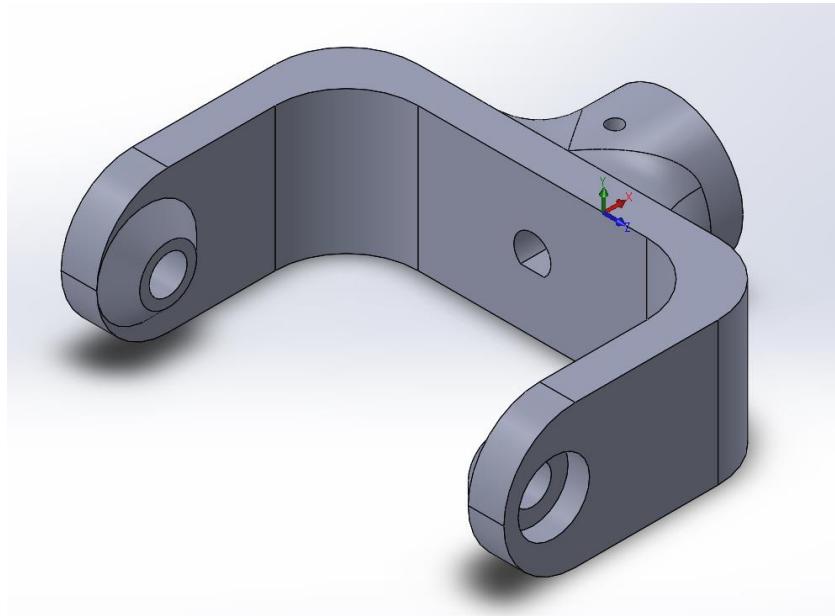


الشكل 36 قطعة حامل المؤشر الليزري في الميكانزم التقليدي

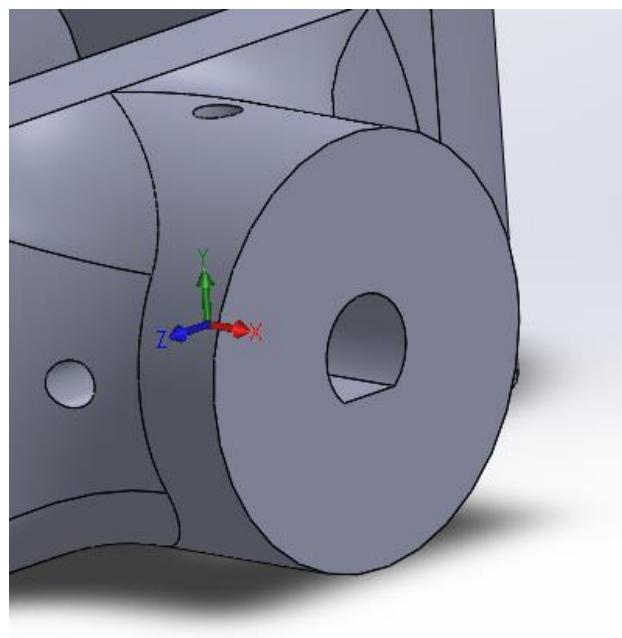


الشكل 37 واحد من مسامع الروملمات في قطعة حامل المؤشر

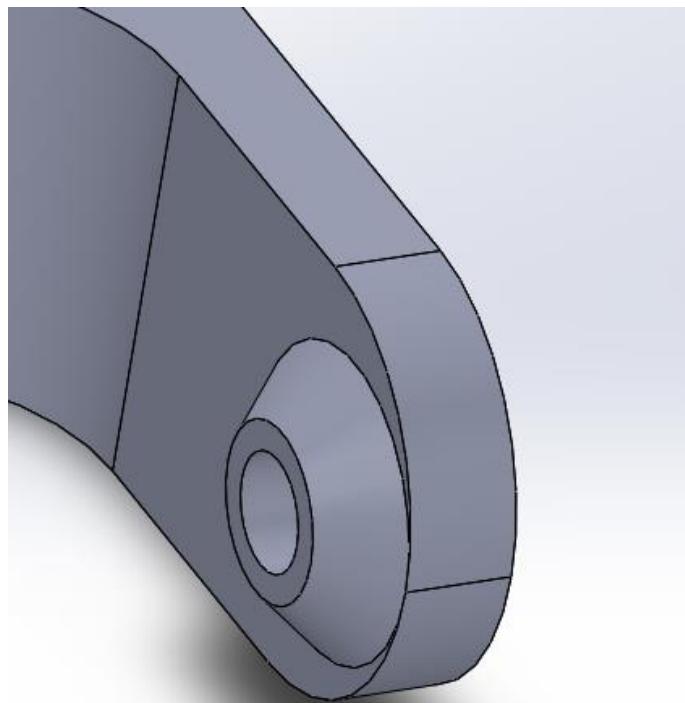
- الرابطة الأولى: وتحمّل هذه الرابطة درجة الحرية الأولى عن طريق اتصالها مع المحرك من خلال قارنة من جهة وكتف يضغط على الحلقة الداخلية لرولمان حامل المؤشر من جهة أخرى. ويوضح كل من الأشكال التالية هذه القطعة والقارنة والكتف على الترتيب.



الشكل 38 الرابطة الأولى في الميكانيزم التقليدي

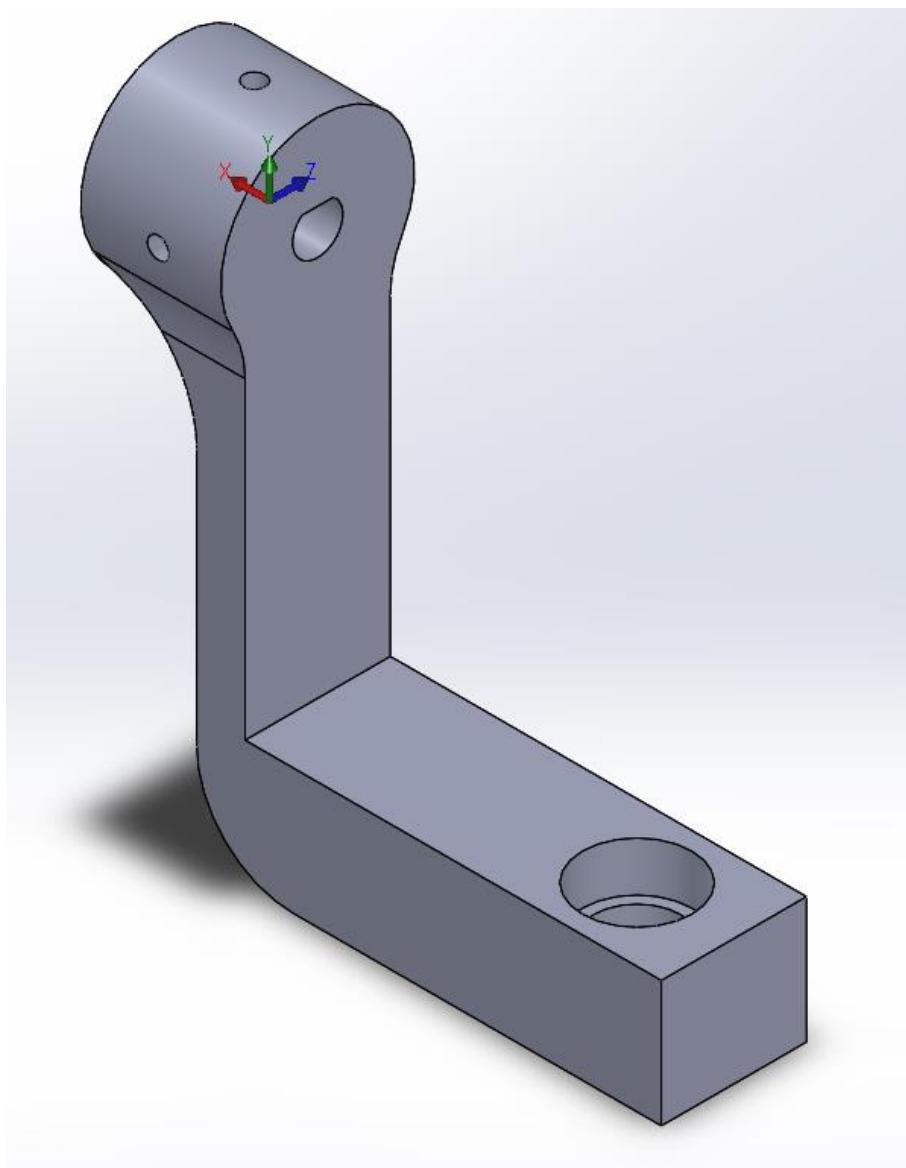


الشكل 39 القارنة التي تربط الرابطة الأولى مع المحرك



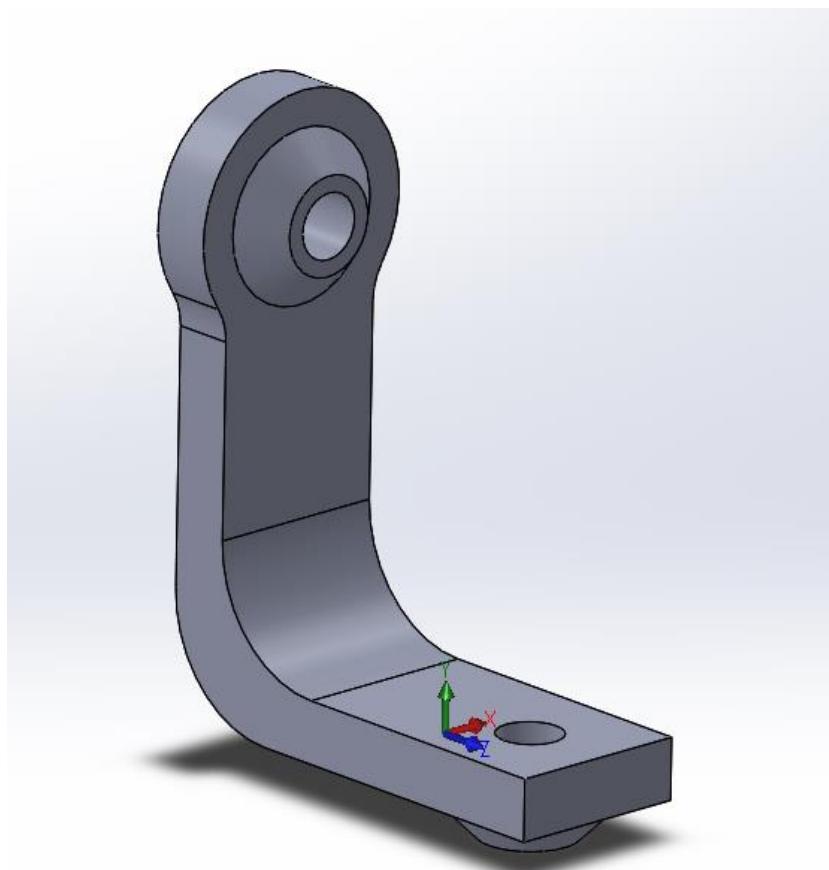
الشكل 40 الكتف الذي يضغط على الحلقة الداخلية للرولمان

- القطعة الأولى من الرابطة الثانية: وهدفها ربط المحرك مع القطعة الثانية من الرابطة الثانية عن طريق رولمانين $5 * 5 * 11$ mm من جهة القطعة الثانية بينما كتف مماثل لقطعة حامل المؤشر من جهة، وقارنة تربط القطعة مع محور المحرك مماثلة للرابطة الأولى من الجهة الأخرى. ويوضح الشكل (41) تصميم القطعة.



الشكل 41 القطعة الأولى من الرابطة الثانية في الميكانيزم التقليدي

- القطعة الثانية من الرابطة الثانية: ومهمتها ربط القطعة الأولى من الرابطة مع قطعة حامل المؤشر عن طريق كتفين من كلا الجهازين يضغطان على الحلقتين الداخليتين للرولمانين الموجودين فيهما. ويوضح الشكل (42) هذه القطعة.



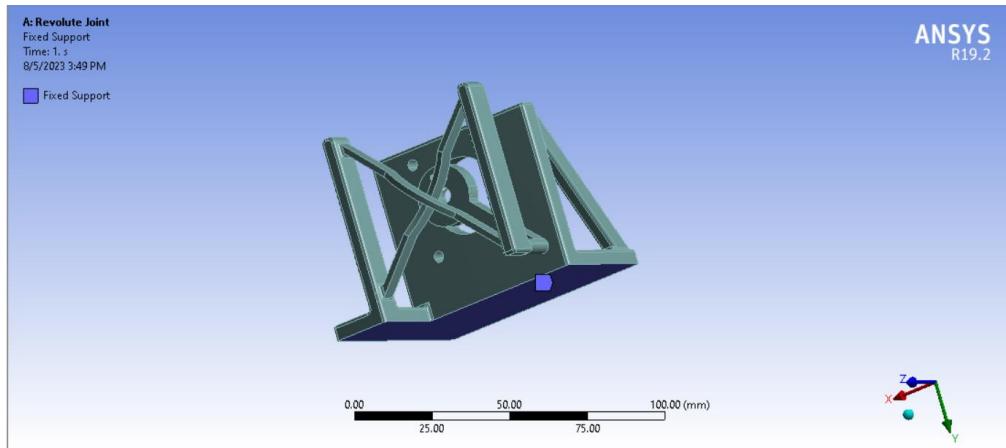
الشكل 42 القطعة الثانية من الرابطة الثانية في الميكانزم التقليدي

٦. الدراسة الإنسانية

6.1 دراسة الميكانيزم المطاوع

دراسة الرابطة الدورانية

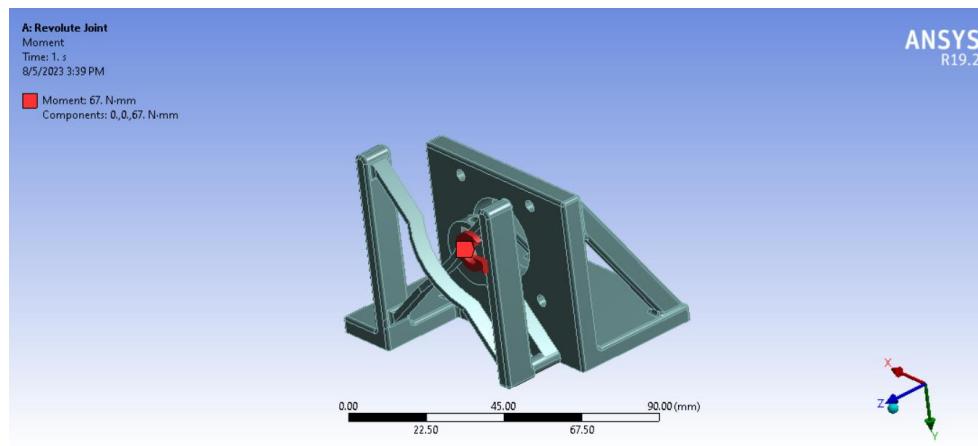
في هذه الفقرة سنقوم بتنبيت الرابطة الدورانية من قاعدتها كما هو موضح بالشكل (43)، وتطبيق العزم في محور دوران المحرك لدراسة استجابة الرابطة وعامل الأمان المحقق عند تدويرها بالزوايا المطلوبة.



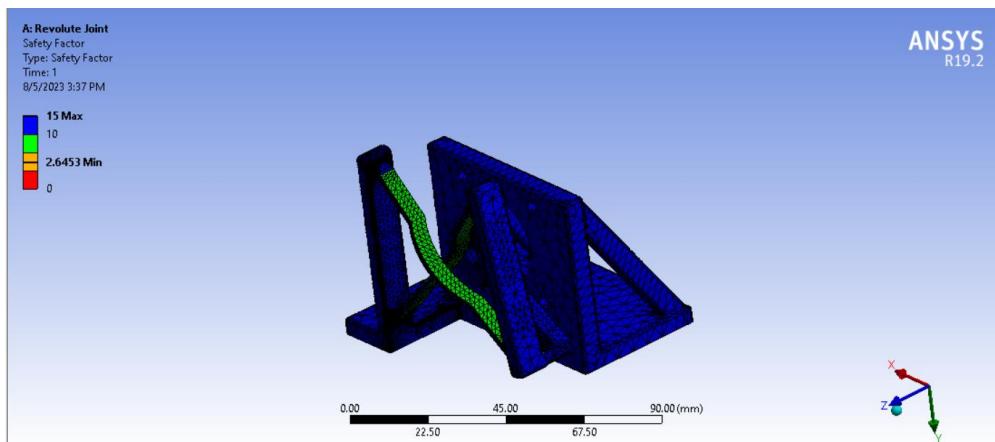
الشكل 43 مكان تثبيت الرابطة الدورانية في الدراسة العددية على Ansys

عامل الأمان

نقوم بتطبيق عزم $M = 67 \text{ Nmm}$ على محور دوران المحرك لرابطة دورانية وحيدة كما هو موضح في الشكل (44)، فكان عامل الأمان الأصغرى 2.6 كما هو ظاهر بالشكل (45)، وهو يعد عامل أمان مناسب.



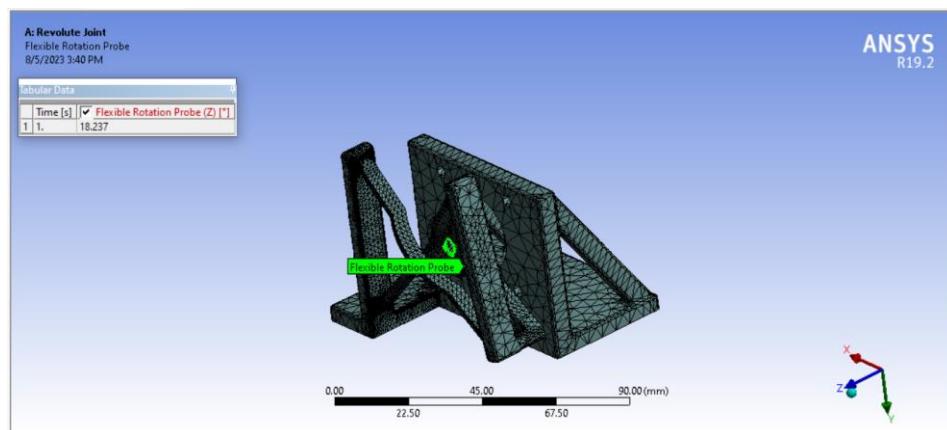
الشكل 44 العزم المطبق في الدراسة العددية للرابطة الدورانية على برنامج Ansys



الشكل 45 عامل الأمان للرابطة الدورانية على برنامج Ansys

الزاوية الموافقة للعزم المدروس

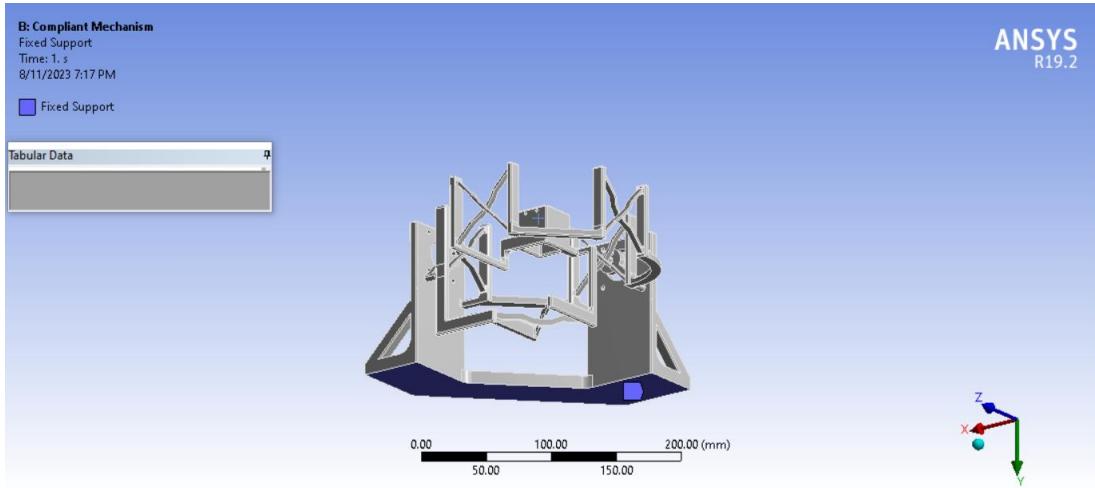
حسب الدراسة النظرية فإن العزم المطبق يفترض أن يسبب دوران بزاوية 15° إلا أنه بالدراسة العددية على برنامج Ansys كانت الزاوية الموافقة للعزم المطبق $M = 67 \text{ Nmm}$ هي 18° كما يوضح الشكل (46)، ويعود السبب في هذا الاختلاف بشكل عام إلى أن النموذج الذي تم تطبيقه لحساب الزاوية هو نموذج نابض الفقل المتمركز في مركز الرابطة الدورانية وهو كما تحدثنا في فصل الدراسة النظرية نموذج أقل دقة لا يوافق تماما الواقع، لكن لغرض الدراسة وتحديد البارامترات التصميمية نجد أن النتيجة كانت مناسبة وبالإضافة إلى أنها حصلنا على دوران أكبر من المطلوب وبالتالي عامل أمان أفضل.



الشكل 46 زواية دوران الرابطة عند تطبيق العزم المفروض على المحرك على برنامج Ansys

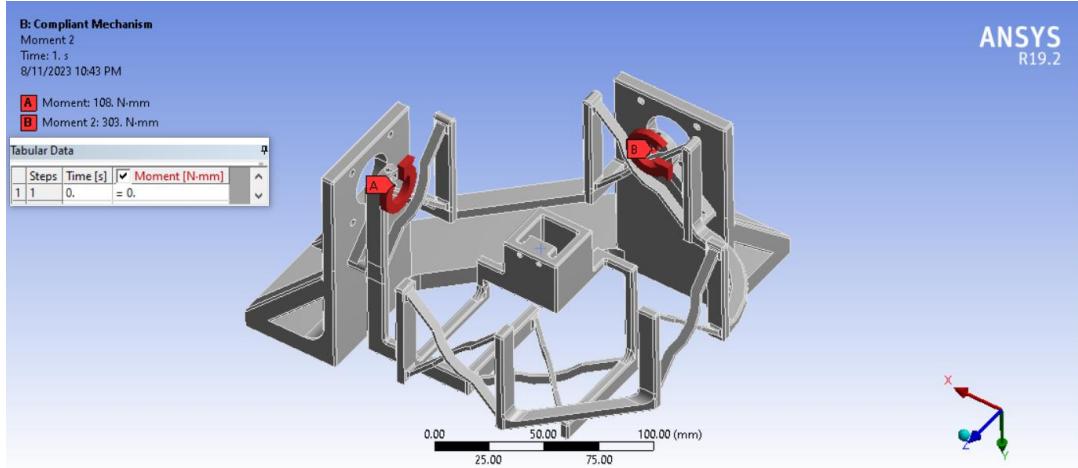
دراسة الميكانيزم كاملا

في هذه الفقرة قمنا بتنبيت الميكانيزم من الأسفل من القاعدة كما هو موضح بالشكل (47). ومن ثم دراسة الميكانيزم في حالتين: الأولى بتطبيق عزوم على محاور دوران المحرك لتحقيق الإزاحة 15° المطلوبة والثانية بتطبيق الحمولة $g = 150$ المفروضة مع أوزان المحركات $g = 240$ المختارة.



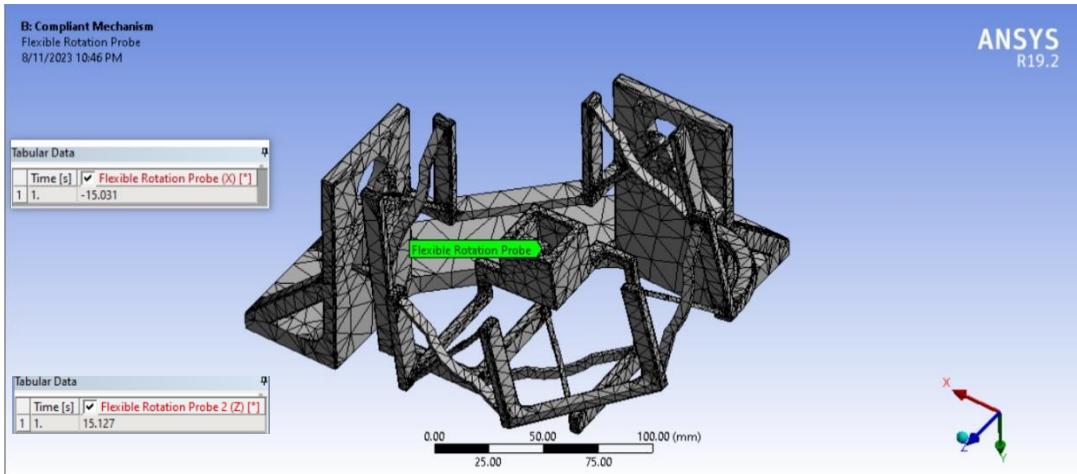
الشكل 47 تثبيت الميكانيزم المطابع من أجل الدراسة العددية على Ansys

من أجل الحالة الأولى كانت العزوم المطبقة كما هو موضح بالشكل (48)، وكانت النتائج هي كالتالي.



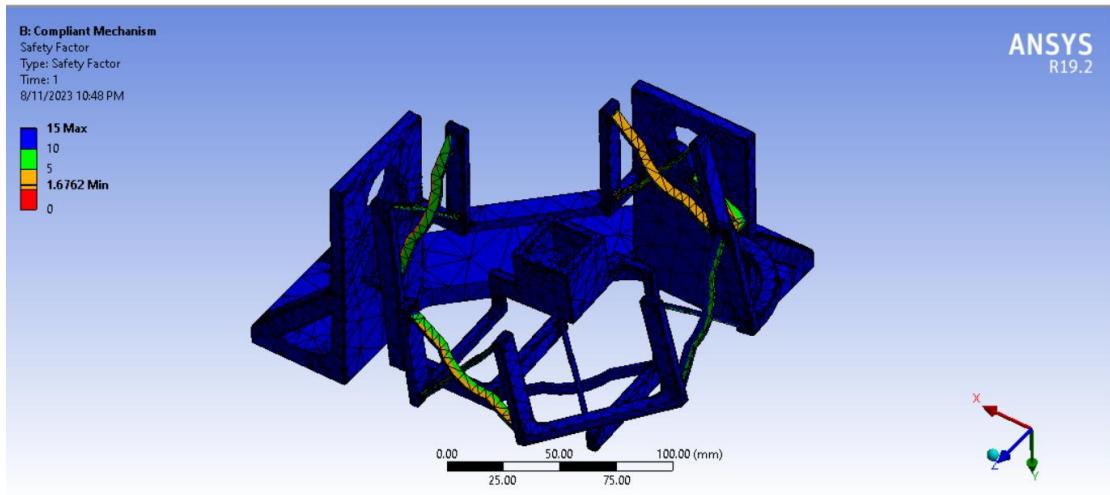
الشكل 48 العزوم المطبقة في الحالة الأولى من الدراسة العددية على Ansys للميكانيزم المطابع

أما الانزياحات فكانت كما يوضح الشكل (49).



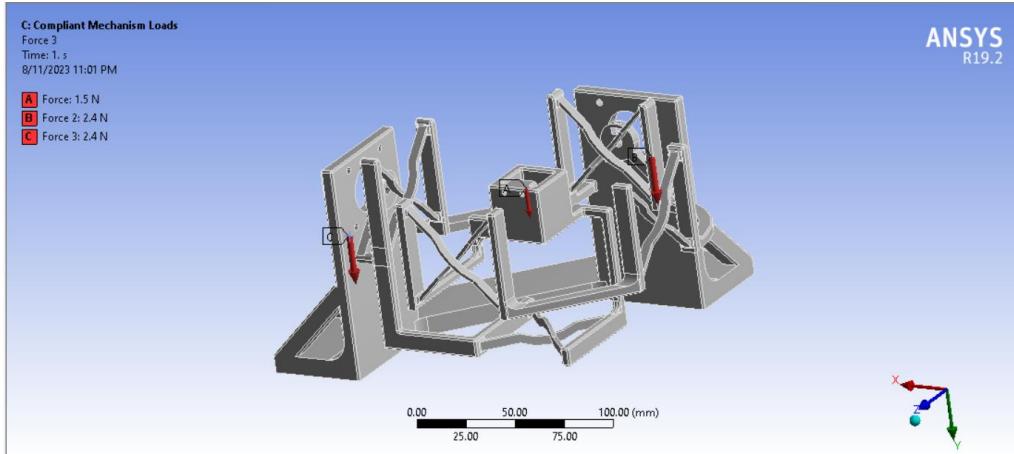
الشكل 49 الانزياحات الموافقة للعزم المطبقة على برنامج Ansys

وأخيراً عامل الأمان كان بالقيمة الصغرى 1.68 كما يوضح الشكل (50)، وهو عامل أمان مناسب.



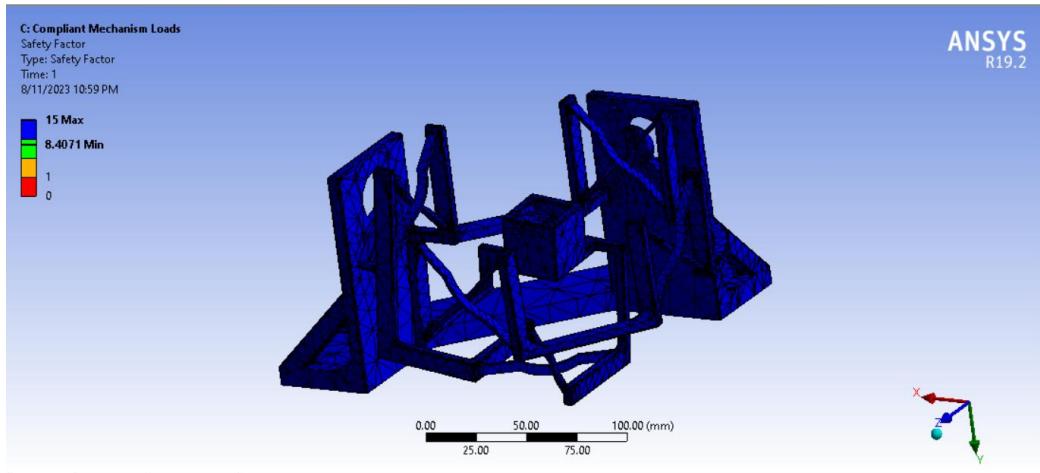
الشكل 50 عامل الأمان في الحالة الأولى من دراسة الميكانيزم المطابق

أما الحالة الثانية فتم وضع قوى تماثل وجود ثقل الحمولة والمحركات وعرض عامل الأمان الناتج. ويوضح الشكل (51) توضيع القوى.



الشكل 51 القوى المطبقة على دراسة تحمل الميكانيزم المطاوع للمحولة المفروضة

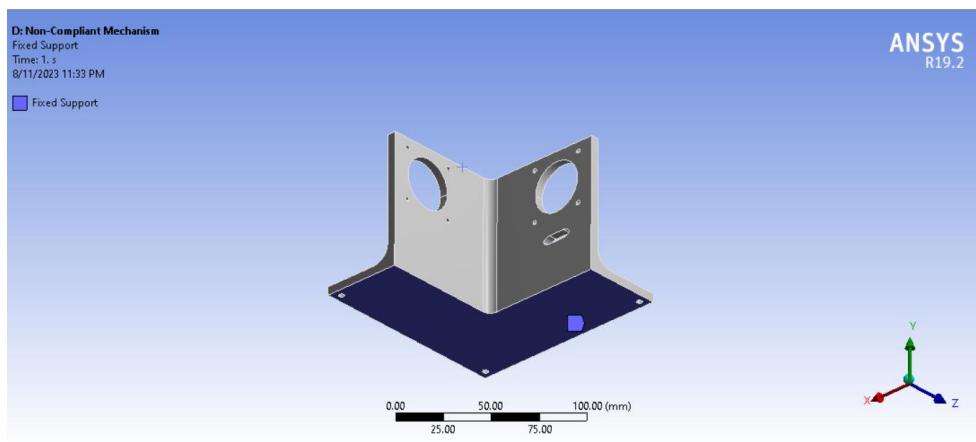
ويوضح الشكل (52) عامل الأمان الأصغرى 8.41 الناتج.



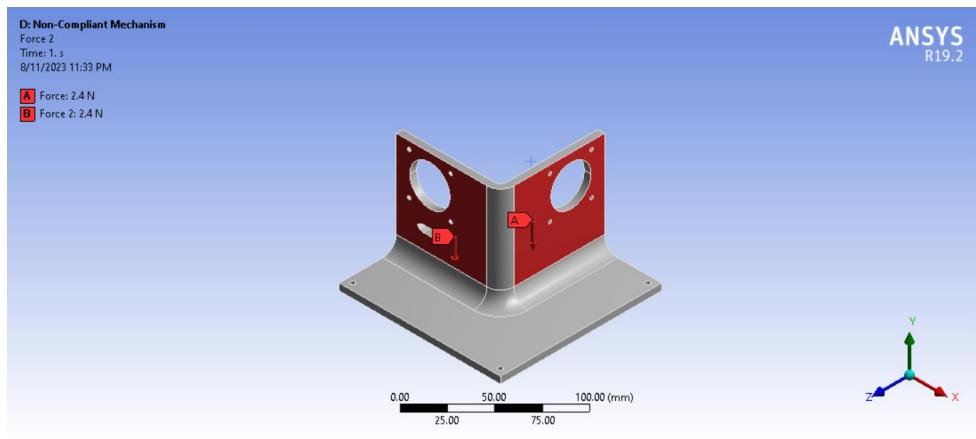
الشكل 52 عامل الأمان الناتج في حالة تطبيق الحمولة المفروضة على الميكانيزم

6.2. دراسة الميكانيزم التقليدي

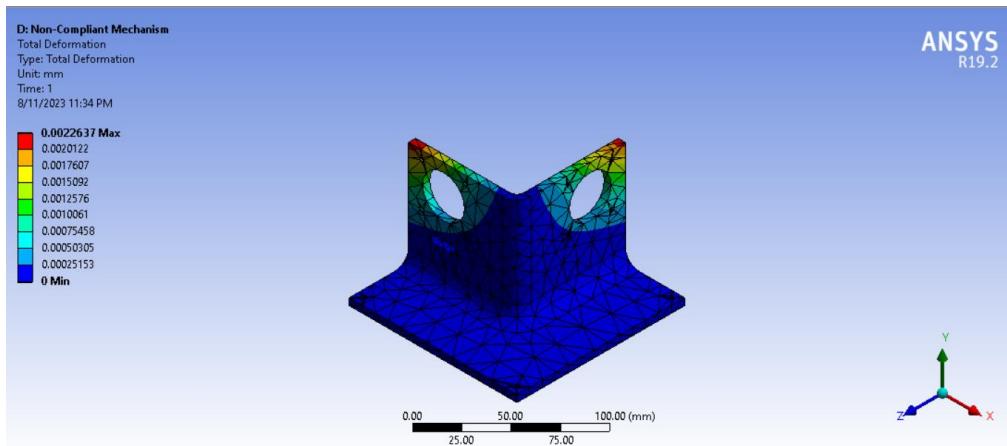
هنا تمت دراسة الميكانيزم على عدة أقسام، القسم الأول يعني بتحمل القاعدة لحمل المحركات، ويوضح الشكل (53) مكان تثبيت القاعدة. والشكل (54) يوضح القوى المطبقة على القاعدة لمحاكاة وزن المحركات. أما الشكل (55) والشكل (56) فيوضحان على الترتيب التشوه الأعظمي الحاصل وعامل الأمان.



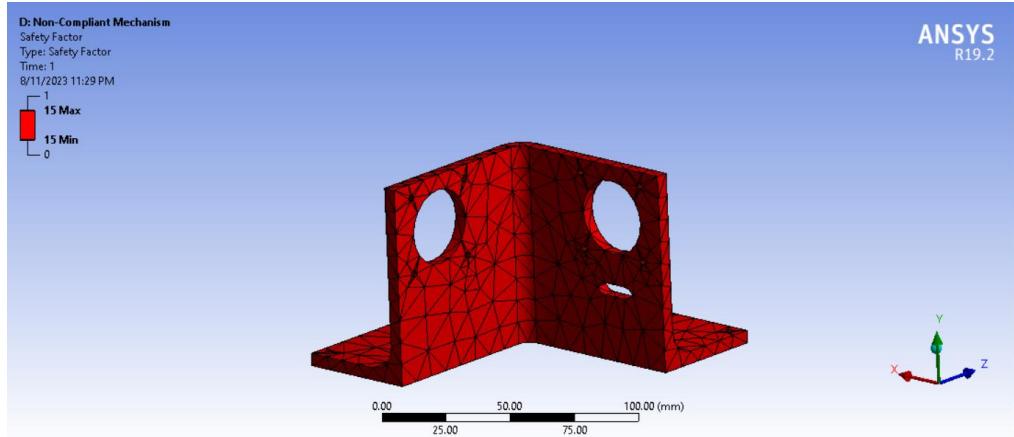
الشكل 53 مكان تثبيت قاعدة الميكانيزم التقليدي



الشكل 54 القوى المطبقة على قاعدة الميكانيزم التقليدي

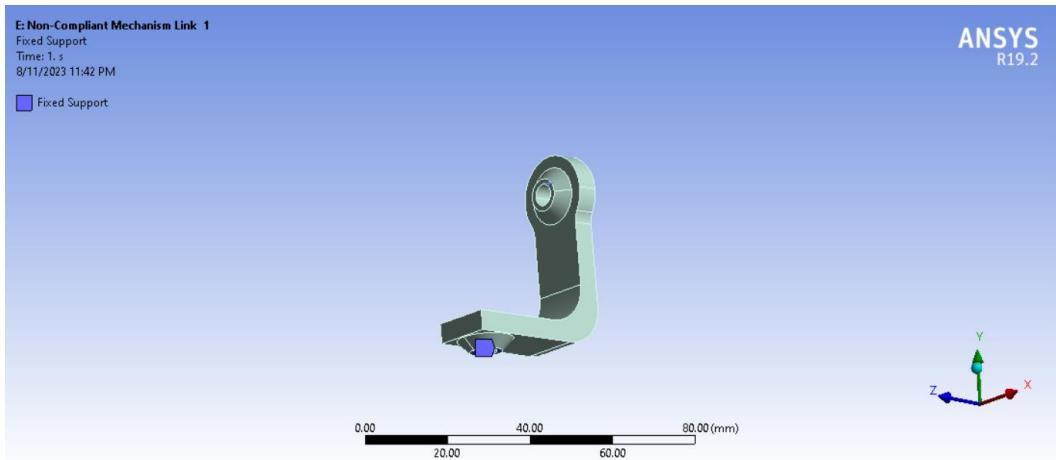


الشكل 55 التشوهات الحاصلة على قاعدة الميكانيزم التقليدي

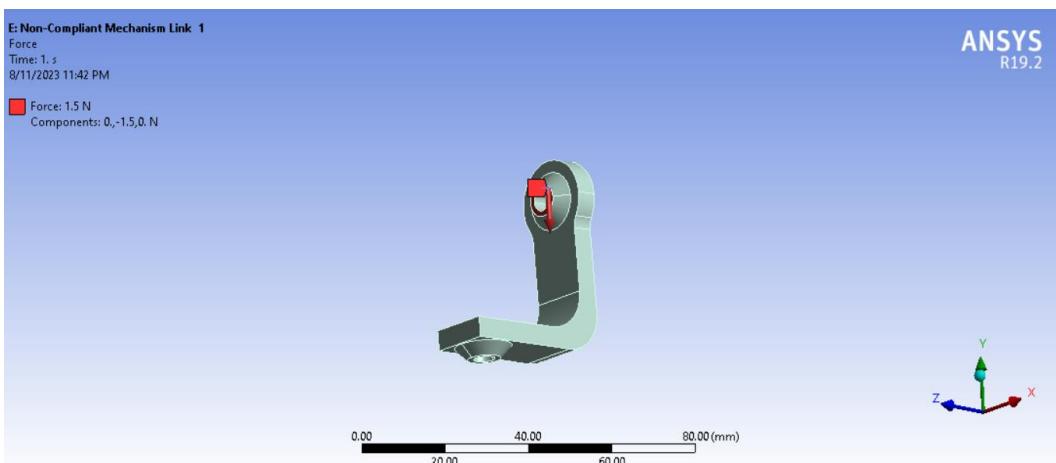


الشكل 56 عامل الأمان الناتج عن تطبيق وزن المحركات على قاعدة الميكانيزم التقليدي

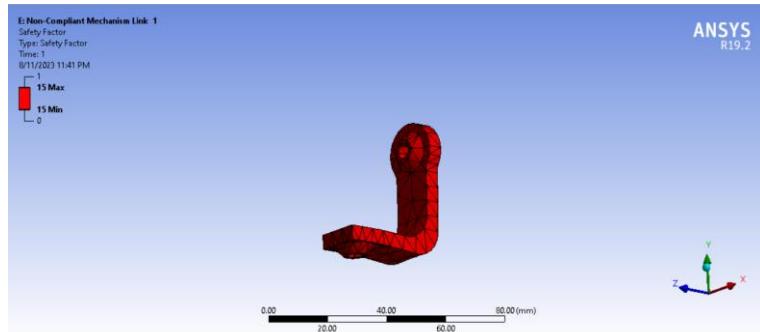
أما من أجل دراسة الرابطتين فتم تثبيتهما كما هو موضح بالشكلين (57) و(60) ووضع كامل ثقل الحمل عليهما كما هو موضح بالشكلين (58) و(61) ومن ثم كان عامل الأمان الناتج كما هو موضح بالشكلين (59) و(62).



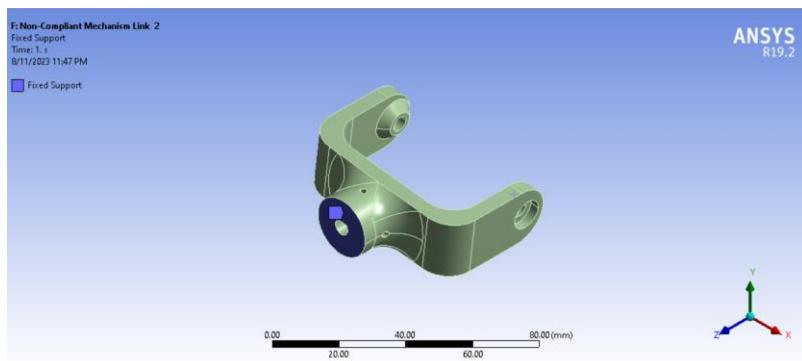
الشكل 57 مكان تثبيت الرابطة الأولى



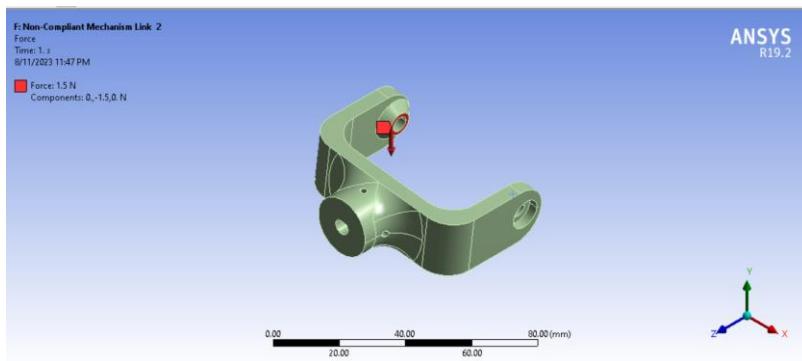
الشكل 58 تطبيق القوة على الرابطة الأولى



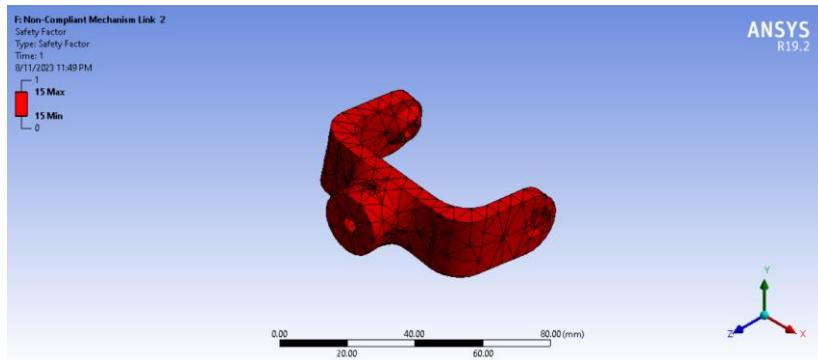
الشكل 59 عامل الأمان الناتج على الرابطة الأولى



الشكل 60 مكان تثبيت الرابطة الثانية



الشكل 61 تطبيق القوة على الرابطة الثانية



الشكل 62 عامل الأمان الناتج على الرابطة الثانية

7. الجزء الإلكتروني

7.1. الدارات المستعملة

من أجل التحكم بالمحركات الخطوية كان لا بد من استخدام دارة قيادة مناسبة وتم اختيار دارة DRV8825 القادرة على تحمل التيارات التي تسحبها المحركات Nema-17 المستخدمة. ولسهولة التواصل مع الحاسب تم استعمال دارة Arduino Uno كمتحكم لإرسال أوامر الحركة للمفعلات حيث أن المتحكم Arduino يؤمن القدرة على التواصل بشكل تسلسلي مع الحاسب مما يسهل عملية إرسال الأوامر من الحاسب إلى المتحكم. فكان يجب استعمال دارة تؤمن التوافق بين دارات القيادة والمتحكم ولهذا تم استعمال دارة CNC-Shield المتواقة مع Arduino Uno والتي يمكن من خلالها التحكم بثلاثة محركات خطوية في آن واحد.

7.2. التغذية

أما التغذية فكانت عن طريق استعمال Power Supply وتغذية المحركات الخطوية من خلالها بتغذية 12 Volt المناسبة لهذا النوع. وذلك بموجب أن المشروع عبارة عن نموذج مخبري بغایة المقارنة والاختبار وبالتالي لا يوجد داع للتغذية عن طريق بطاريات مستقلة.

8. الكود البرمجي

ينقسم الكود البرمجي بشكل عام إلى حزتين أساسين، الأولى هو كود Matlab والذي يحوي نمذجة الميكانيزمات وتوليد المسارات بالإضافة إلى جزء تراسل مسؤول عن إرسال مواضع المحركات المطلوبة إلى بطاقة Arduino. أما الجزء الثاني فهو كود Arduino الذي يفسر الأوامر المحصلة من Matlab ويحولها لأوامر حركية ليرسلها لدارات قيادة المحركات للتحكم بها.

8.1. كود Matlab

ينقسم إلى ثلاثة أجزاء رئيسية:

- تابع توليد المسار المطلوب: وهو عبارة عن تابع يأخذ الزمن كدخل له ويعطي خرجين هما الزاويتان α, γ المرغوبتان للحصول على المسار المطلوب. ويتم حساب الزاويتين عن طريق تحويل إحداثيات المسار المطلوب من الإحداثيات الديكارتية إلى الإحداثيات الكروية. أما المسار فهو مسار مستطيل مرسوم على مسافة *distance* من النهاية الطرفية وفق المعادلات التالية:

```

vx = (xd-x0)/sec;
vy = (yd-y0)/sec;
x = x0 + vx*t;
y = y0 + vy*t;
alpha = atan2(x,distance);
gamma = atan2(y,distance);

```

الشكل 63 معادلات المسار المستطيل على Matlab

حيث:

- x_0, y_0 هما إحداثيات نقطة البداية للمستقيم
- x_d, y_d هما إحداثيات نقطة النهاية للمستقيم
- sec* هي عدد الثواني المرغوب فيها الانتقال من البداية للنهاية
- t* هو الزمن الحالي
- α, γ هما الزاويتان المرغوبتان من الميكانيزم
- تابع حساب النموذج الهندسي العكسي: ومهمته تحويل الزوايا المرغوبة الناتجة عن توليد المسار إلى زوايا للمحركات تحقق التوجيه المطلوب.
- البرنامج الأساسي: ومهمته استدعاء التابع السابق من أجل الحصول على زوايا المحركات المطلوبة وإرسلتها إلى بطاقة Arduino عن طريق تراسل Serial لتحقيق الحركة المطلوبة.

8.2. كود Arduino

من أجل التحكم بمحركات Nema-17 تم استخدام المكتبة AccelStepper المتاحة على بيئة Arduino IDE والتي تعطي إمكانية التحكم بكل من موضع وسرعة وتسارع المحركات الخطوية، بالإضافة إلى إمكانية مزامنة المحركات مع بعضها البعض للحصول على حركة متزامنة سلسة لرسم المسار المطلوب. أما مصدر هذه الأوامر فيكون على شكل سلسلة حرفية مرسلة من Matlab تخبر المتحكم Arduino بالقيم الواجب إعطاؤها لكل من المحركات.

9. التنفيذ والنتائج العملية

9.1. القطع المطبوعة قبل وبعد التجمیع

9.2. المقارنة من ناحية الوزن

9.3. المقارنة من ناحية الدقة

10. الخاتمة والآفاق المستقبلية

تم في هذا المشروع دراسة عملية على الميكانيزمات المطاوعة والروابط الدورانية المطاوعة بالإضافة إلى تصميم وتنفيذ ميكانيزم مطاوع بدرجتي حرية قادر على تلبية المتطلبات الوظيفية لتحرير شعاع الدفع لجسم طائر. كما تم تنفيذ نوع آخر من الميكانيزمات محققاً نفس المتطلبات بهدف المقارنة والدراسة فكان وزن الميكانيزم التقليدي أعلى من الميكانيزم المطاوع كما تمت ملاحظة وجود خلوصات بالميكانيزم التقليدي على نقىض الميكانيزم المطاوع الذي لا يوجد فيه خلوصات ميكانيكية وهو ما يوافق الدراسة النظرية. من الممكن مستقبلاً إجراء اختبار على التعب وعدد دورات العمل لكلا الميكانيزمين حيث أنه من المتوقع أن يعمل الميكانيزم المطاوع لفترات أطول دون الحاجة لصيانة. كما يمكن أمثلة تصميم الميكانيزم المطاوع من حيث العزم المطلوب لتحقيق مجال العمل وتنفيذ الميكانيزم باستخدام مواد أخرى قابلة للطباعة ثلاثة الأبعاد مختلفة عن PLA تحقق مجال عمل أوسع بوزن أقل ووزن أخف. كما يمكن العمل على نشر ورقة بحثية في المقارنة بين الميكانيزمين من الناحية العملية، حيث أن هذا المجال يعد مجالاً بحثياً حالياً للعديد من الأوراق التي تتناول مختلف جوانب الميكانيزمات المطاوعة واستخداماتها.

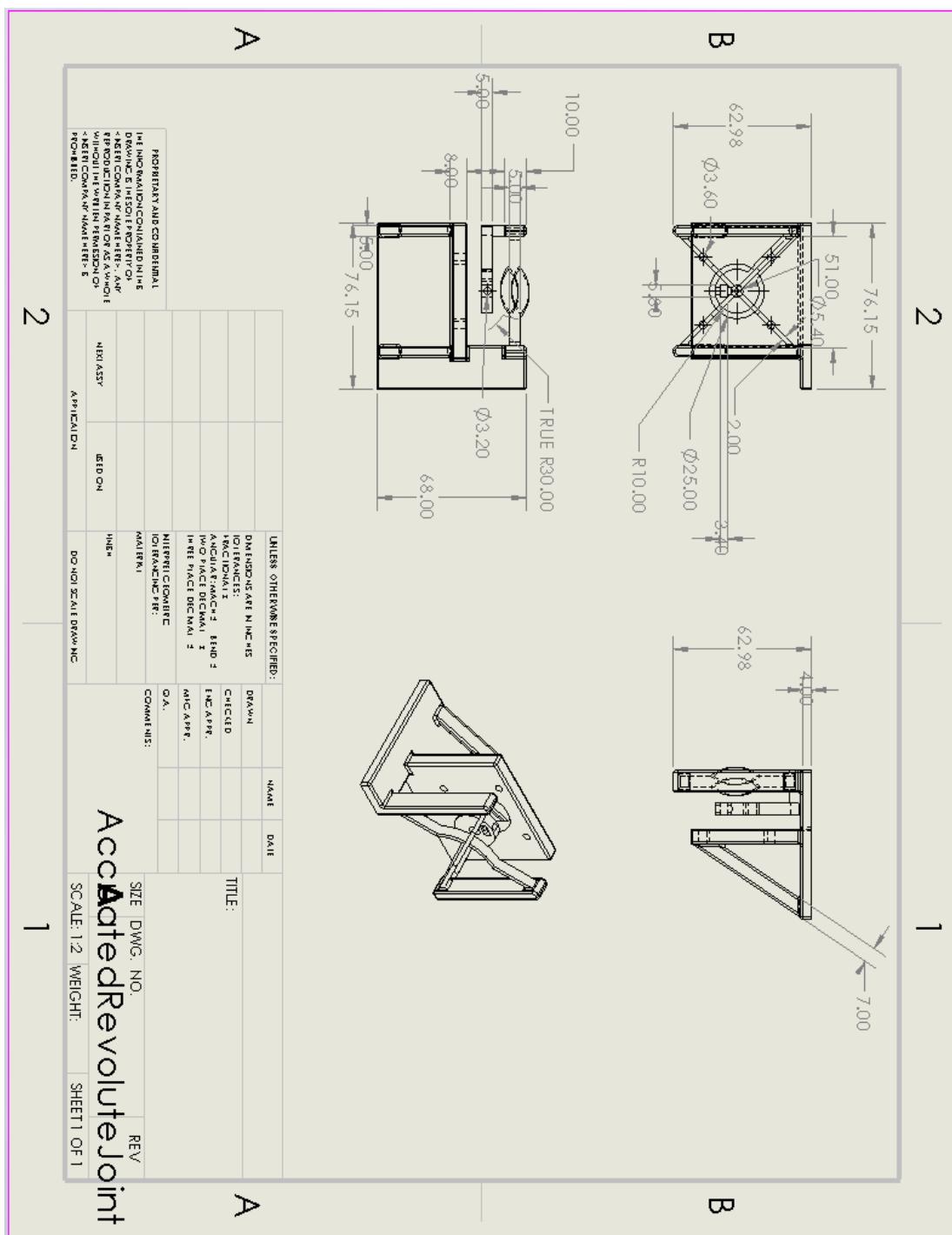
11. المراجع

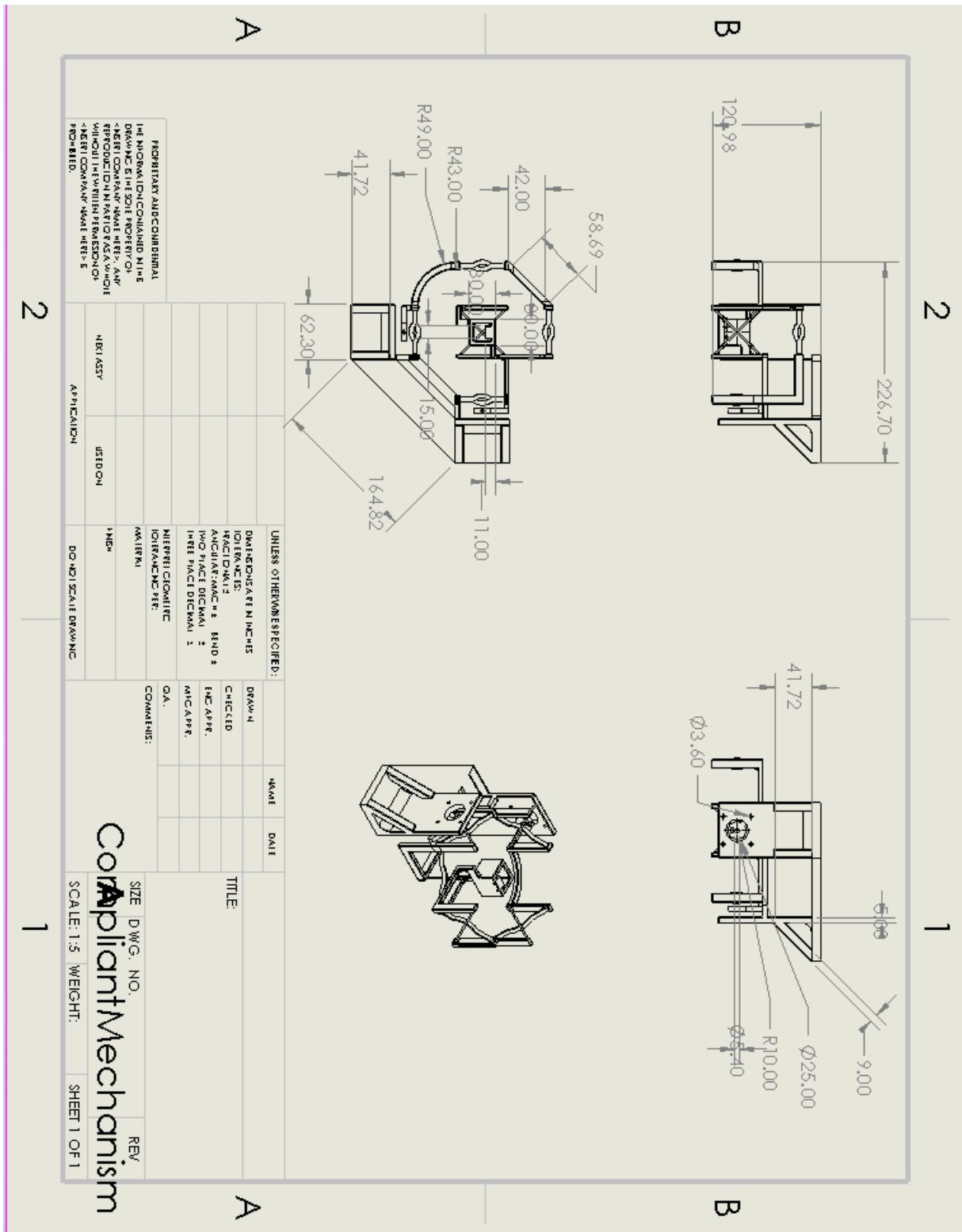
- [1] M. D. Perez, M. Poucet and D. D. Nascimento, "DEVELOPMENT OF THRUSTER POINTING MECHANISMS FOR CUBESAT & SMALL SATELLITE APPLICATIONS," *LMO-UK*, 2013.
- [2] E. G. Merriam, J. E. Jones, S. P. Magleby and L. L. Howell, "Monolithic 2 DOF fully compliant space pointing mechanism," *Mech. Sci*, vol. 4, p. 381–390, 2013.
- [3] R. UR-REHMAN, S. CARO, D. CHABLAT and P. WENGER, "Kinematic and Dynamic Analysis of the 2-DOF Spherical Wrist of Orthoglide 5-axis," *Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes*.
- [4] D. F. Macheckposhti, N. Tolou and J. L. Herder, "A Review on Compliant Joints and Rigid-Body Constant Velocity Universal Joints Toward the Design of Compliant Homokinetic Couplings".
- [5] J. Shah, J. Soni and P. Moradiya, "A Review of Compliant Mechanisms Manufactured by using 3D Printing Technology," *Special Edition ICRPMSME*, 2021 .
- [6] B. D. Jensen and L. L. Howell, "The modeling of cross-axis flexural pivots," *Mechanism and Machine Theory*, p. 461–476, 2002.
- [7] J. A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, J. Llumà, O. Traver-Ramos, G. Gomez-Gras and J. J. R. Rovira, "Mechanical Properties of 3D-Printing Polylactic Acid Parts subjected to Bending Stress and Fatigue Testing," *Special Issue of the Manufacturing Engineering Society 2019 (SIMES-2019)*, 2019.

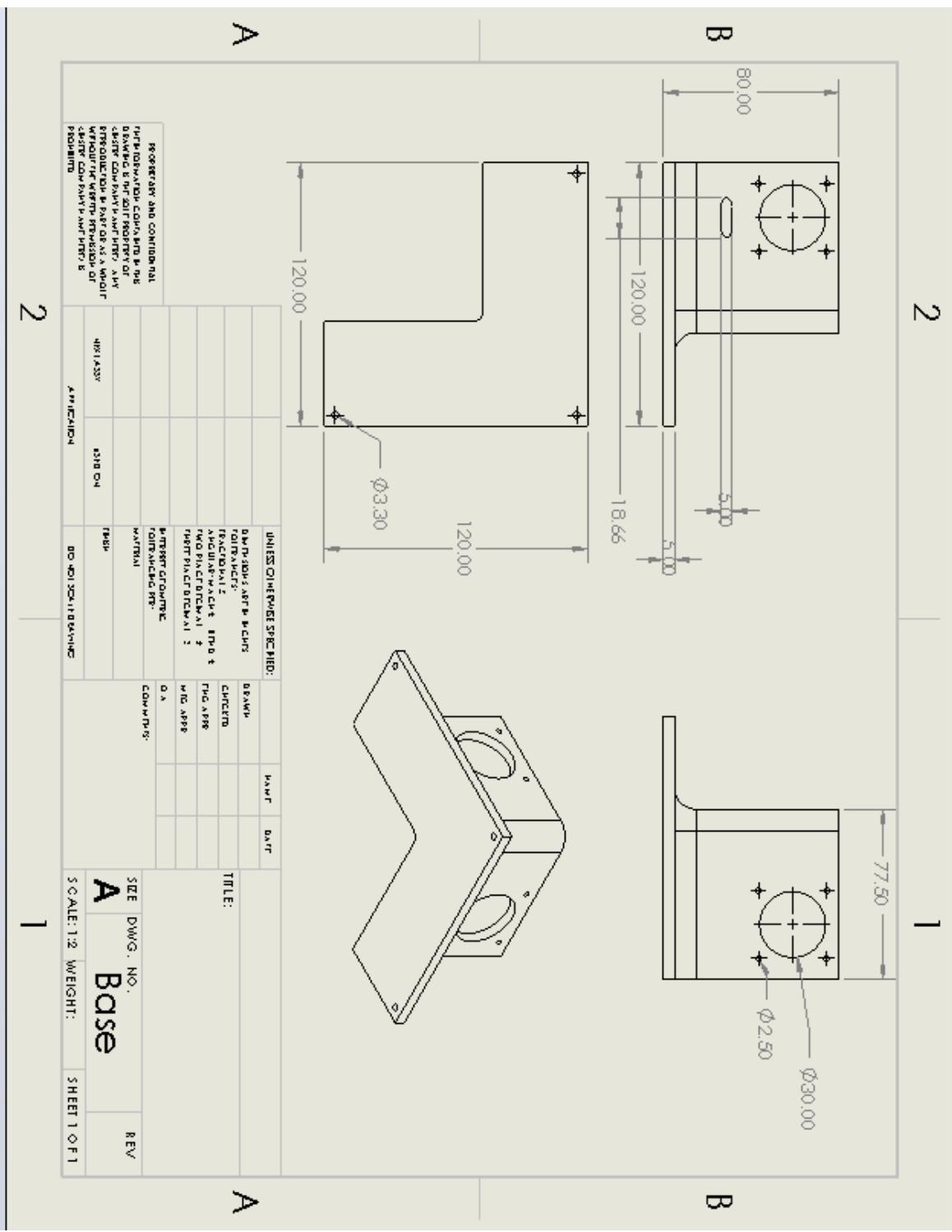
الملحق 12. الملاحق

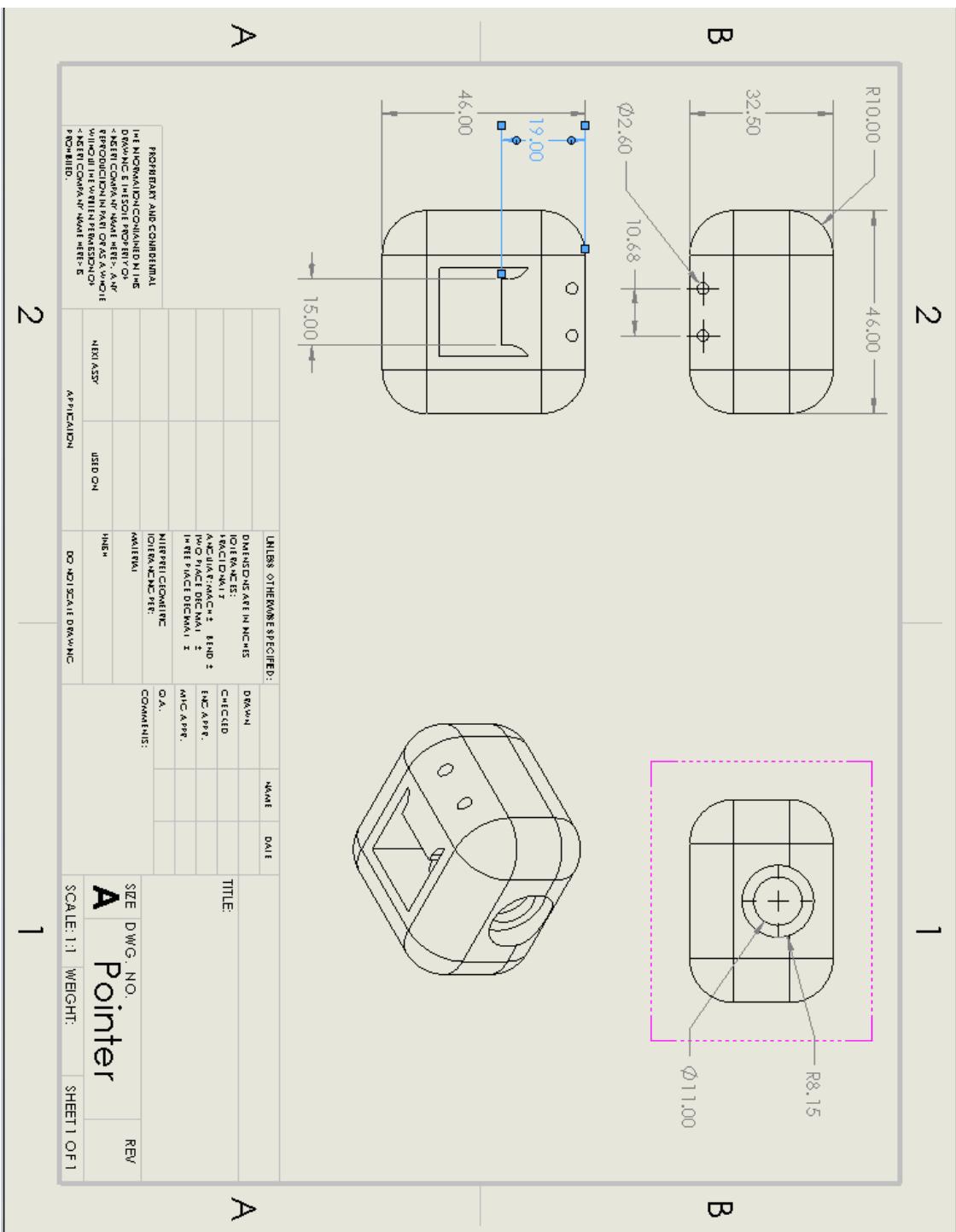
ملحق -أ-

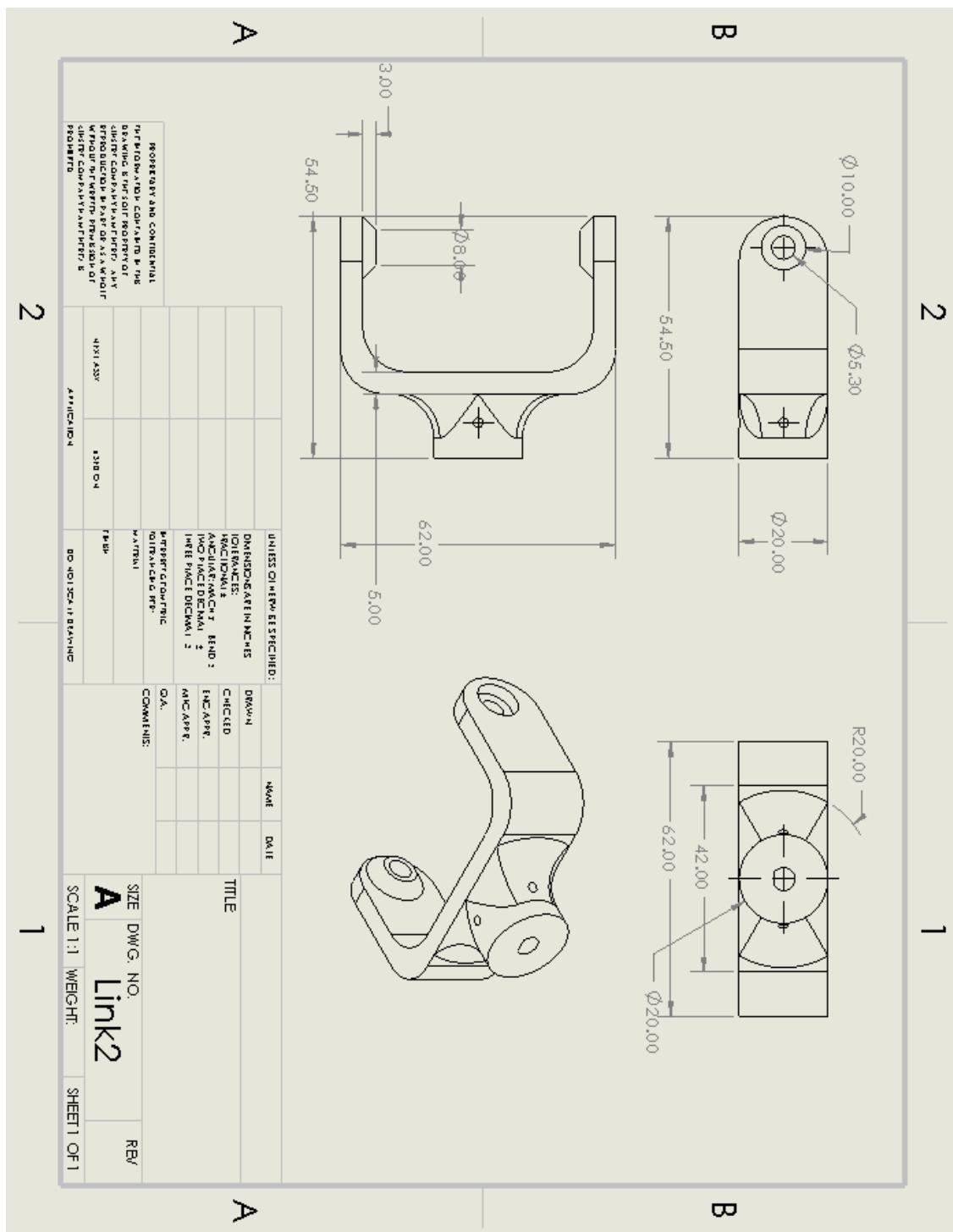
المخططات الإفرادية للقطع

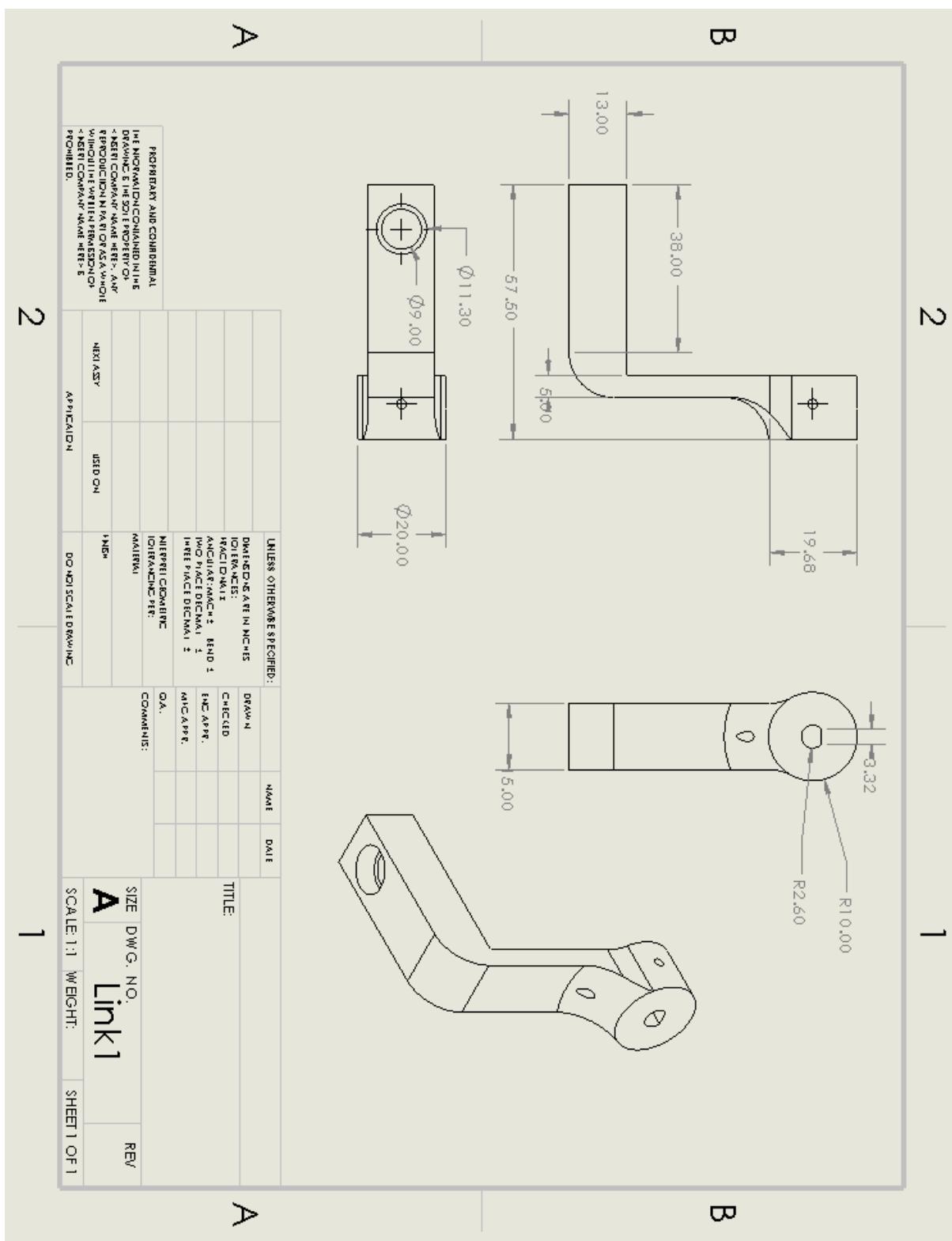


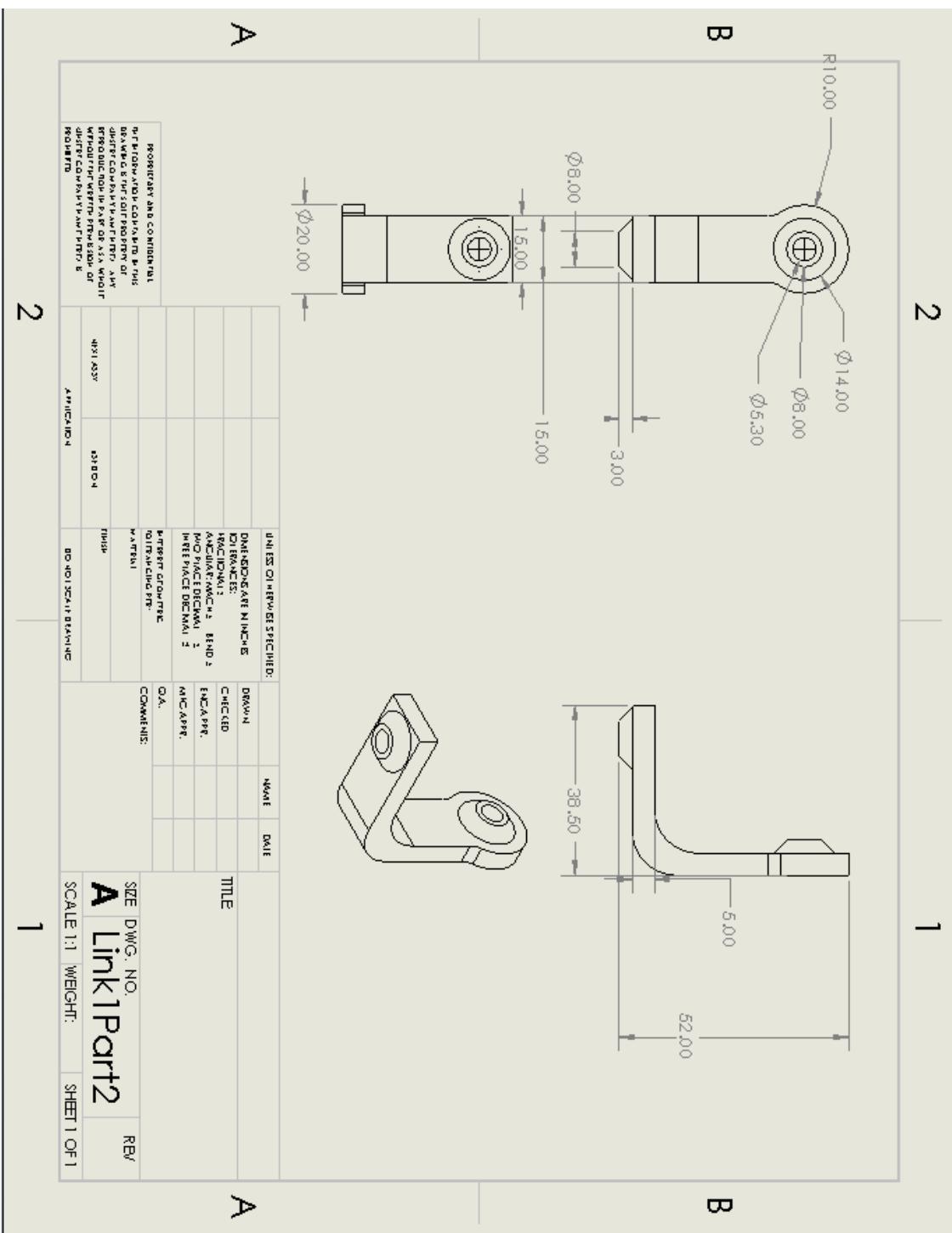












محلق - بـ

Maxon EC45 Flat محرك

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

maxon flat motor

Part Numbers

V1 with Hall sensors	397172	402685	402686	402687
V2 with Hall sensors and cables	411812	411814	411815	411816

Motor Data (provisional)
Operating Range
Comments

Specifications
Continuous operation

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*	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	gcm²	181	181	181	181

Assigned power rating
Short term operation

In observation of 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.

The motor may be briefly overloaded (recurring).

Other specifications
maxon Modular System
Details on catalog page 36

V1
Planetary Gearhead
Encoder MILE

Values listed in the table are nominal.

Connection	V1	V2 (AWG 24)	Planetary Gearhead
Pin 1	Hall sensor 1*	Motor winding 1	Ø42 mm
Pin 2	Hall sensor 2*	Motor winding 2	3 - 15 Nm
Pin 3	V _{dc} 4.5 ... 18 VDC	Motor winding 3	Page 363
Pin 4	Motor winding 3	Hall sensor 3*	
Pin 5	GND	GND	
Pin 6	Hall sensor 1*		
Pin 7	Motor winding 1		
Pin 8	Hall sensor 2*		
	Motor winding 2		
	Hall sensor 3*		

*Internal pull-up (7 ... 13 VDC) on V_{dc}.
Wiring diagram for Hall sensors see p. 47.

Cable for V1
Spur Gearhead
Notes

Connection cable Universal, L = 500 mm 339380
Connection cable to EPOS, L = 500 mm 354045

V2
Recommended Electronics:

21 Ambient temperature -20 ... +100°C

Notes Page 36

ESCON 36/3 EC 455
ESCON Mod. 50/4 EC-S 455
ESCON Module 50/5 455
ESCON 50/5 457
DEC Module 50/5 459
EPOS4 50/5 463
EPOS4 Mod./Comp. 50/5 463
EPOS2 P 24/5 470
MAXPOS 50/5 473

April 2019 edition / subject to change

ملحق -ج محرك Nema-17

Quick Reference NEMA size 17 1.8° 2-phase stepper motor



Schneider
Electric

Notes and Warnings

Installation, configuration and maintenance must be carried out by qualified technicians only. You must have detailed information to be able to carry out this work.

- Unexpected dangers may be encountered when working with this product!
- Incorrect use may destroy this product and connected components!

For more information, go to www.jimshome.com

Specifications

1.5 Amp motors	Single length	Double length	Triple length
Part number	M-1713-1.5*(1)	M-1715-1.5*(1)	M-1719-1.5*(1)
Holding torque	oz-in 30	60	75
	N-cm 25	50	65
Detent torque	oz-in 1.7	2.1	3.5
	N-cm 1.2	1.5	2.5
Rotor inertia	oz-in-sec² 0.0000536	0.0000937	0.0011952
	kg-cm² 0.038	0.057	0.082
Weight	oz 7.4	8.1	12.7
	grams 210	230	360
Phase current	amps 1.5	1.5	1.5
Phase resistance	ohms 1.3	2.1	2.0
Phase inductance	milliH 2.3	9.0	3.85

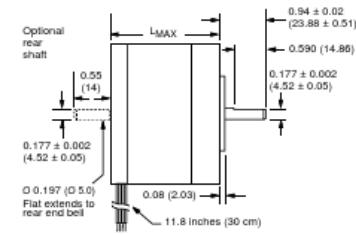
(1) Indicate S for single-shaft or D for double-shaft. Example M-1713-1.5S

Wiring and Connections

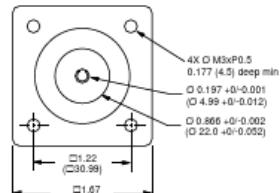
Signals and wire colors	
Phase A	Red
Phase /A	Blue
Phase B	Green
Phase /B	Black

Mechanical Specifications

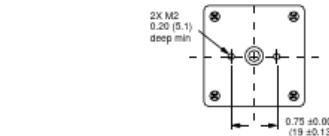
Dimensions in inches (mm)



FRONT VIEW



REAR VIEW (Reduced)



Motor stack length inches (mm)	Single	Double	Triple
LMAX	1.34 (34.0)	1.57 (40)	1.82 (46)

Part Numbers

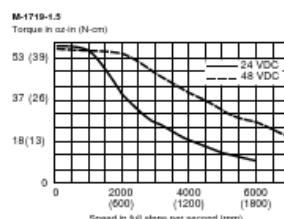
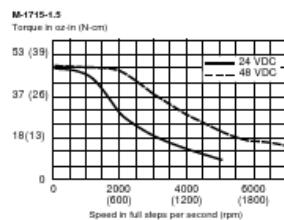
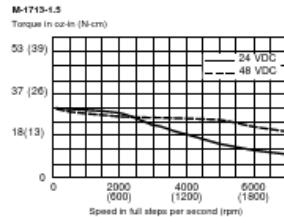
Example:	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 S
Stepper motor frame size	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 S
M-17 = NEMA 17 (1.7" / 42 mm)	
Motor length	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 S
13 = single stack	
15 = double stack	
19 = triple stack	
Phase current	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 S
1.5 = 1.5 Amps	
Shaft	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 S
S = single, front shaft only	
D = double, front and rear shafts	
Optional optical encoder (1)	M - 1 7 1 3 - 1 . 5 E 8 1 0 0
E8 = Single-end	
ED = Differential	
Line count	
100, 200, 250, 400, 500 or 1000 (2)	

(1) An encoder replaces the shaft designator in the part number.

(2) All encoders have an index mark, except the 1000 line count version.

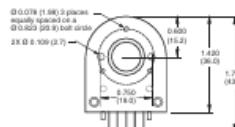
NEMA17 stepper motor Quick Reference R060210

Torque-speed performance
Measured at 1.5 Amps RMS



Optical Encoder Option

Dimensions in Inches (mm)



Connectivity



wire function

- 1 Brown Ground
- 2 Violet Index+
- 3 Blue Channel A-
- 4 Orange +5 VDC Input
- 5 Yellow Channel B

optional interface cable available: ES-CABLE-2

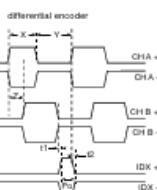
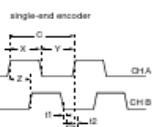


pin function

- 1 no connect
- 2 +5 VDC Input
- 3 Ground
- 4 no connect
- 5 Channel A -
- 6 Channel A +
- 7 Channel B -
- 8 Ground
- 9 Index -
- 10 Index +

Interface cable included

Timing



Parameter

Symbol	Mn	Typ	Max	Units
Cycle error		5	5.5	%
Symmetry		150	190	%
Quadrature		40	90	100
Index pulse width	Po	60	60	120
Index rise (after Ch A or B fall)	RI	-300	100	250
Index fall (after Ch A or B fall)	RF	70	150	1000
				ns

C One cycle: 360 electrical degrees (°).

X/Y Symmetry: the measure of the relationship between X and Y, nominally 180°.

Z Quadrature: the phase lead or lag between channels A and B, nominally 90°.

Po Index pulse width, nominally 90 ns.

RI Index rise (after Ch A or B fall).

RF Index fall (after Ch A or B fall).

NOTE: Rotation is as viewed from the cover side of the encoder.

ملحق -د- دارة القيادة DRV8825

[Product Folder](#) [Sample & Buy](#) [Technical Documents](#) [Tools & Software](#) [Support & Community](#)



DRV8825

SLVSA73F –APRIL 2010–REVISED JULY 2014

DRV8825 Stepper Motor Controller IC

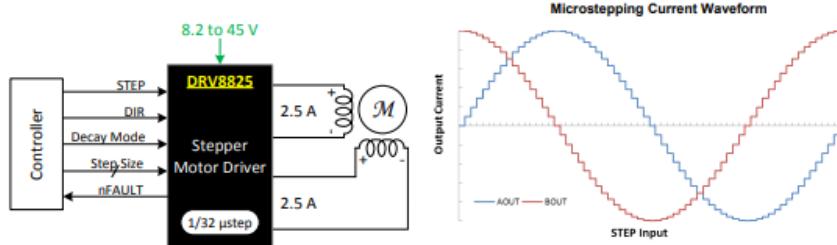
1 Features

- PWM Microstepping Stepper Motor Driver
 - Built-In Microstepping Indexer
 - Up to 1/32 Microstepping
- Multiple Decay Modes
 - Mixed Decay
 - Slow Decay
 - Fast Decay
- 8.2-V to 45-V Operating Supply Voltage Range
- 2.5-A Maximum Drive Current at 24 V and $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Simple STEP/DIR Interface
- Low Current Sleep Mode
- Built-In 3.3-V Reference Output
- Small Package and Footprint
- Protection Features
 - Overcurrent Protection (OCP)
 - Thermal Shutdown (TSD)
 - VM Undervoltage Lockout (UVLO)
 - Fault Condition Indication Pin (nFAULT)

2 Applications

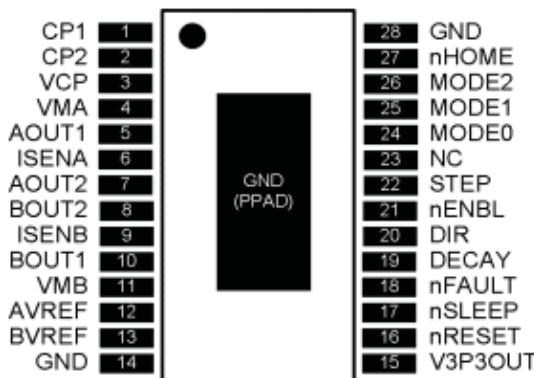
- Automatic Teller Machines
- Money Handling Machines
- Video Security Cameras
- Printers
- Scanners
- Office Automation Machines
- Gaming Machines
- Factory Automation
- Robotics

4 Simplified Schematic



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

6 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

PIN		I/O ⁽¹⁾	DESCRIPTION	EXTERNAL COMPONENTS OR CONNECTIONS
NAME	NO.			
POWER AND GROUND				
CP1	1	I/O	Charge pump flying capacitor	Connect a 0.01- μ F 50-V capacitor between CP1 and CP2.
CP2	2	I/O	Charge pump flying capacitor	
GND	14, 28	—	Device ground	
VCP	3	I/O	High-side gate drive voltage	Connect a 0.1- μ F 16-V ceramic capacitor and a 1-M Ω resistor to VM.
VMA	4	—	Bridge A power supply	Connect to motor supply (8.2 to 45 V). Both pins must be connected to the same supply, bypassed with a 0.1- μ F capacitor to GND, and connected to appropriate bulk capacitance.
VMB	11	—	Bridge B power supply	
V3P3OUT	15	O	3.3-V regulator output	Bypass to GND with a 0.47- μ F 6.3-V ceramic capacitor. Can be used to supply VREF.
CONTROL				
AVREF	12	I	Bridge A current set reference input	Reference voltage for winding current set. Normally AVREF and BVREF are connected to the same voltage. Can be connected to V3P3OUT.
BVREF	13	I	Bridge B current set reference input	
DECAY	19	I	Decay mode	Low = slow decay, open = mixed decay, high = fast decay. Internal pulldown and pullup.
DIR	20	I	Direction input	Level sets the direction of stepping. Internal pulldown.
MODE0	24	I	Microstep mode 0	MODE0 through MODE2 set the step mode - full, 1/2, 1/4, 1/8/1/16, or 1/32 step. Internal pulldown.
MODE1	25	I	Microstep mode 1	
MODE2	26	I	Microstep mode 2	
NC	23	—	No connect	Leave this pin unconnected.
nENBL	21	I	Enable input	Logic high to disable device outputs and indexer operation, logic low to enable. Internal pulldown.
nRESET	16	I	Reset input	Active-low reset input initializes the indexer logic and disables the H-bridge outputs. Internal pulldown.
nSLEEP	17	I	Sleep mode input	Logic high to enable device, logic low to enter low-power sleep mode. Internal pulldown.
STEP	22	I	Step input	Rising edge causes the indexer to move one step. Internal pulldown.
STATUS				
nFAULT	18	OD	Fault	Logic low when in fault condition (overtemp, overcurrent)

(1) Directions: I = input, O = output, OD = open-drain output, IO = input/output