

تصميم وتنفيذ منصة تجريبية لقياس الكفاءة والأداء الديناميكي لمحركات BLDC الكهربائية

محمد سالم عنيبة^{1*} ، صلاح الدين عمر دبك² ، أسامة سالم الشريري³

¹ قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

² قسم الحاسوب، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

³ قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

* البريد الإلكتروني (الباحث المرجعي): moh19822011@gmail.com

Design and Implementation of an Experimental Platform for Measuring the Efficiency and Dynamic Performance of BLDC Motors”

Mohamed S. Aniba^{1*}, Salaheddin O. Debbek², Osama S. Elsherariri³

¹ EEE, College of Electrical Electronic, Misrata, Libya

² ECE, College of Technical Sciences, Misrata, Libya

³ EEE, College of Electrical Electronic, Misrata, Libya

Received: 30-09-2025; Revised: 10-10-2025; Accepted: 31-10-2025; Published: 25-11-2025

الملخص:

تعد المحركات الكهربائية Brushless الخيار المناسب والمفضل لتصميم وبناء الطائرات المسيرة، يأتي ذلك نتيجة لكون المحركات من هذا النوع لا تحتوي على فرش كما في المحركات الكهربائية التقليدية ذات التيار المستمر وبالتالي تقليل الاحتكاك مما ينتج عنه زيادة كفاءة العمل وإطالة عمر المحرك. في هذه الورقة تم تصميم منصة لعرض قياس أداء هذا النوع من المحركات وذلك من خلال شبكة من الحساسات تتولى قراءة التيار والجهد والسرعة الدورانية للمحرك كما تقوم بقياس سرعة الهواء ومن ثم إرسال هذه القراءات إلى وحدة تحكم مركبة بنيت باستخدام لوحة تحكم Arduino Uno تتولى حفظ البيانات وتحليلها لتحديد معدل أداء المحرك في ظروف التشغيل المختلفة.

تضمن العمل على المنصة توفير شاشة لعرض المؤشرات المقاسة بالإضافة إلى وحدة تخزين لعرض حفظ البيانات للرجوع إليها مستقبلاً من أجل أعمال التحليل. كما تم في تصميم المنصة مراعاة أن تكون أداة سهلة الاستخدام ومرنة بما يتيح للمستخدم سواء كان فني صيانة أو باحث ومحظوظ استخدام البيانات التي توفرها لأغراض الصيانة الدورية أو تحسين أداء وتطوير المحرك.

الكلمات المفتاحية: محرك كهربائي، كفاءة، اردينو، تحكم، قياس.

Abstract:

Brushless electric motors are considered the optimal and preferred choice for designing and building unmanned aerial vehicles (UAVs). This is due to the fact that these motors do not contain brushes like traditional DC electric motors, which reduces friction and consequently increases operational efficiency and extends the motor's lifespan. In this paper, a tool was designed to measure the performance of the brushless electric motor using a network of sensors that monitor current, voltage and rotational speed. The system also measures airspeed and sends these readings to Arduino Uno control unit, which stores and analyzes the data to determine the motor's performance under various operating conditions.

The platform includes a LCD screen to show the measured indicators in real time, as well as storage unit to save the data for future analysis. The platform was designed to be user-friendly and flexible, allowing both maintenance or developers to utilize the data for routine maintenance or to enhance motor performance.

Keywords: electric motor, control, arduino, platform, measurement.

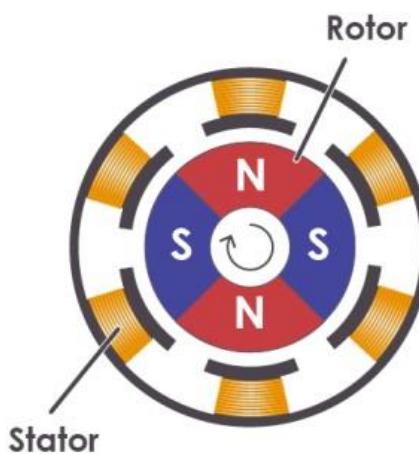
مقدمة:

يشهد العصر الحالي تطور غير مسبوق في مجال الطيران المسير وذلك يأتي نتيجة للتقدم الكبير في أنظمة الاتصال والتحكم الالكترونية الحديثة بالإضافة التي التطوير والتحسين الذي طرأ على المحركات الكهربائية والميكانيكية التي تستخدم في بناء الطائرات المسيرة وذلك من خلال تحسين أداء هذه المحركات من حيث الوزن واستهلاك الوقود وال عمر الافتراضي. تعد محركات Brushless من افضل المحركات المستخدمة في بناء الطائرات المسيرة وذلك لما تميز به من قوة في الأداء و توفير في الطاقة. يمثل تحسين كفاءة هذه المحركات عنصر حاسم ليس فقط في توفير الطاقة وتحسين الأداء، بل أيضا في دعم ابتكار وتطوير تطبيقات وتقنيات جديدة سواء في الطيران المسير او الروبوت او أي أدوات تبتكر مستقبلا بناء على تطوير وتحسين هذه المحركات.^{[5][1]}

تعود اولى الدراسات المرتبطة بالمحركات الكهربائية الى القرن التاسع عشر حيث قام العالم فارادي بوضع الأساس النظري الأولي للحركة الكهربائية ذلك من خلال اكتشافه ان يمكن توليد حركة دورانية عند تمرير تيار كهربائي في مجال مغناطيسي معين وهو ما يعتبر الفكرة الأساسية لمبدأ عمل المحركات الكهربائية. باستخدام هذا النوع من المحركات تم التركيز على تحسين أداء المحركات الكهربائية وذلك من خلال العمل على معالجة المشاكل الناتجة عن الاحتكاك والحرارة بهذه المحركات كما انه هناك مسار اخر في البحث والتطوير من خلال العمل على تحسين تصميم الملفات واختيار مواد موصلة اكثر جودة. اتجاه اخر اتخذه الباحث والمطوريون في تحسين المحركات الكهربائية تمثل في تطوير مواد مغناطيسية جديدة تساعد على تقليل الفاقد في الحرارة فاستخدمو فولاذ عالي النفاذية المغناطيسية كما عملوا على تطوير أنظمة تبريد وتهوية تساهم في تقليل درجات الحرارة الناتجة عن التشغيل لفترات الطويلة.^{[1][2]}

محركات Brushless او كما تعرف اختصاراً بـ BLDC Motors هي توجه اخر اعتمدته الباحث لتقليل الاحتكاك و الحرارة في المحرك وتحسين الأداء من خلال استخدام طرق تحكم الكتروني والتي يتم من خلالها تنظيم تدفق التيار الكهربائي بدقة و توفير استقرار و ثبات في حركة المحرك. كما تم استخدام خامات جديدة في التصنيع المحرك كمادة النبوديميوم والتي تعتبر من اقوى المواد المغناطيسية الدائمة مما ساهم في تحسين عزم الدوران وبالتالي زيادة كفاءة المحرك. عند الاتجاه للتطوير مركبات مسيرة سواء تطير في الجو او تسير في الطرقات ازداد الاهتمام باستخدام محركات Brushless نظراً لما توفر من خصائص يحتاجها العاملين في هذا المجال وتشمل كفاءة عالية، وزن خفيف، موثوقية، عزم دوران عالي، كما انها دخلت مجال الاستخدام الطبي في بعض أجهزة التشخيص والتصوير المقطعي الطبي وذلك بسبب أدائها الدقيق.[1]

مبدأ عمل محرك Brushless يعتمد على تحكم الكتروني في التيار المار عبر الجزء الثابت Stator وهو عبارة عن ملفات نحاسية مرتبة بشكل حلقة ليتم توليد حقل مغناطيسي الذي يتفاعل مع المجال المغناطيسي المتولد عن مغناطيس دائم متحرك Rotor موضوع في وسط حلقة الملفات النحاسية وبالتالي تنتج الحركة الدورانية المطلوبة كما مبين في الشكل 1 أدناه. يتم التحكم في قوة المجال المغناطيسي المتولد من الملفات من خلال وحدة تحكم الكترونية تعرف بمحكم السرعة الالكتروني ESC.



شكل 1: أجزاء محرك Brushless الكهربائي

كفاءة المحرك الكهربائي:

تعد كفاءة المحركات الكهربائية واحدة من اهم المعايير التي تستخدم لقياس اداء المحركات في مختلف التطبيقات وتعرف بانها نسبة الطاقة الميكانيكية الناتجة عن المحرك الى الطاقة الكهربائية المستهلكة به وبمعنى اخر تعكس الكفاءة قدرة المحرك على تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية (حركة) دوق فدان كبير للطاقة. مبدأ عمل المحركات الكهربائية هو تحويل الطاقة الكهربائية الى ميكانيكية من خلا عمود دوار ويتم ذلك من خلال مرور تيار الكهربائية عبر ملف في مجال مغناطيسي مما يولد قوة تعمل على تحريك العمود الدوار وبالتالي عزم الدوران، كفاءة المحرك تعتمد على نسبة نجاح المحرك في تحويل الكهرباء الى حركة ويتم حسابها

من خلال قسمة الطاقة الكهربائية التي تستخدم لتحريك الجزء المتحرك على الطاقة الميكانيكية المولدة بالمحرك، يتم بعد ذلك حساب خرج الطاقة الميكانيكية على صورة عزم دوران و السرعة الزاوية كما يتم حساب الطاقة الكهربائية المدخلة الى المحرك على أساس جهد كهربائي وتيار. عادة تكون الطاقة الميكانيكية المولدة من المحركة اقل من الطاقة الكهربائية المشغلة للمحرك بسبب فقدان الناتج عن ظروف التشغيل المحيطة او الاحتكاك والحرارة المتولدين بسبب دوران الأجزاء المتحركة في المحرك.[2]

يمكن حساب الطاقة الميكانيكية المولدة في المحرك من خلال قياس عزم الدوران والسرعة وذلك وفقا

للمعادلة التالية

$$P_{mech} = P_{out} = T * \omega$$

حيث:

Watt P_{out} طاقة الخرج و تمقس بالوات

N*m عزم الدوران و يمقس بالنيوتون متر

rad/s السرعة الزاوية و تمقس بالراد لكل ثانية

كما يمكن حساب السرعة الزاوية ω بمعرفة سرعة دوران المحرك في الدقيقة RPM من العلاقة التالية

$$\omega = \frac{RPM * 2\pi}{60}$$

حيث

rad/s السرعة الزاوية و تمقس بـ

rpm عدد دورات المحرك في الدقيقة

كما انه يتم تحديد الطاقة الكهربائية المستهلكة في المحرك من خلال المعادلة التالية:

$$P_{elec} = P_{in} = I * V$$

حيث

P_{in} تمثل طاقة الدخل و تمقس بالوات

I التيار الكهربائي و يمقس بالأمبير

V الجهد الكهربائي المستخدم و يمقس بالفولت

ويتم حساب كفاءة المحرك من خلال المعادلة

$$Motor Efficiency E = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

لقياس عزم الدوران T وذلك من خلال التعويض عن P_{out} و Pin بمعادلتيهما في معادلة كفاءة المحرك E لتصبح عندنا المعادلة التالية

$$T = \frac{I * V}{\omega} * E$$

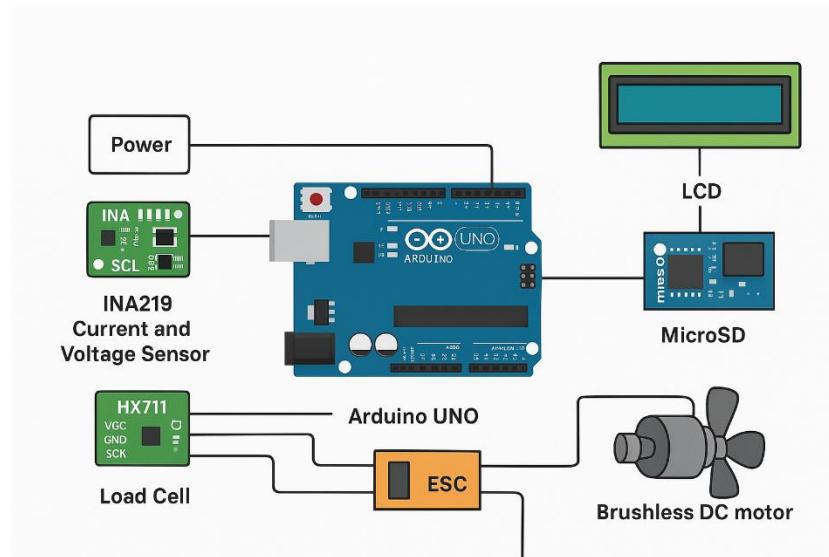
يعتبر قياس عزم الدوران مهم جدا خصوصا في بدايات التشغيل للمحركات الجديدة مما يتيح معرفة العزم المولود بالمحرك الجديد وبالتالي مقارنته مع العزم المنتج من نفس المحرك بعد فترات من التشغيل مما يتيح إمكانية تقدير العمر الافتراضي للمحرك بناء على الانخفاض في كفاءة المحرك وبالتالي المساعدة في اتخاذ قرار للصيانة او الاستبدال وغيرها. توجد عدة عوامل تؤثر على كفاءة عمل المحرك الكهربائي أهمها الحرارة والتي تنتج عن مقاومة المادة المصنوع منها الملف لمورر التيار الكهربائي والفقد المغناطيسي بسبب التغير المستمر في الحقل المغناطيسي داخل المحرك، بالإضافة الى ذلك فالاحتكاك والاهتزاز الناتجان عن الأجزاء المتحركة يؤذيان الى تقليل الكفاءة [4].

توفير اداة لقياس كفاءة المحرك الكهربائي مهم من اجل اعمال الصيانة الدورية او أغراض التقييم والتحسين والتطوير مستقبلا حيث ان توفر بيانات أداء المحرك أثناء العمل في ظرف التشغيل الطبيعية معلومات عن المحرك وإمكانية تقدير عمره الافتراضي وتقدير جدوى اجراء الصيانة له او استبداله في حال كانت الصيانة لا تعطي نتائج المطلوبة مقارنة بحالته عند بداية التشغيل، كما ان هذه البيانات تتيح للمهندسين والمطوريين معلومات مهمة تساعدهم في اختبار تطوير أداء المحرك واكتشاف عيوب غير ظاهرة أثناء التصميم والإنتاج و بالتالي تداركها قبل دمجها في التطبيقات النهائية [1][2][3].

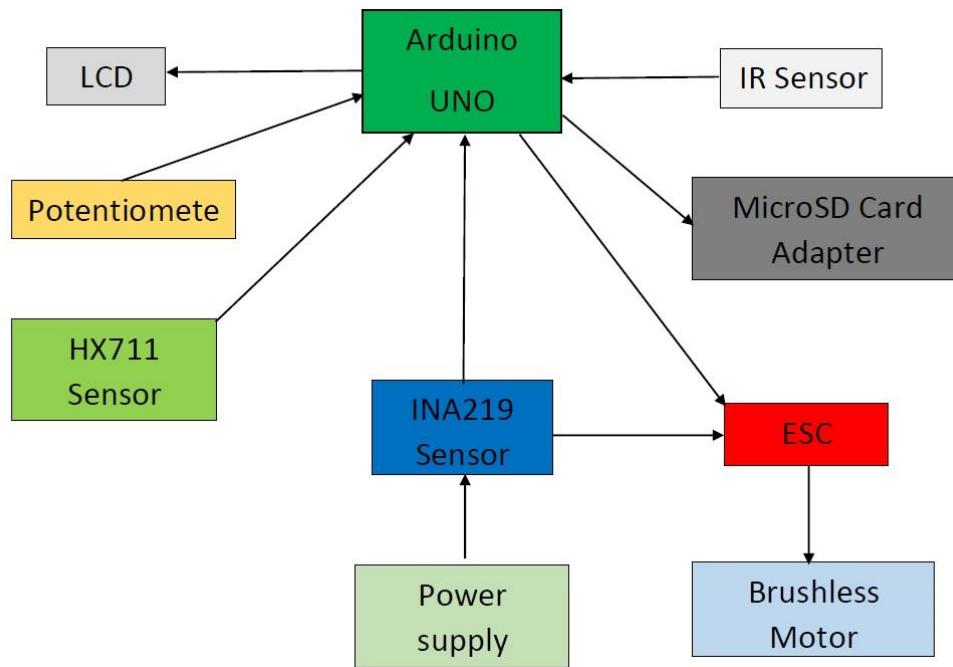
الجانب العملي

تم في هذا البحث تصميم وتنفيذ نموذج أولي لمنصة تجريبية مخصصة لقياس كفاءة المحركات الكهربائية من نوع **Brushless DC (BLDC)** اعتمد النظام على وحدة التحكم الدقيقة **Arduino UNO** باعتبارها المتحكم المركزي، حيث تم ربطها بمجموعة من الحساسات لقياس المؤشرات الكهربائية والميكانيكية اللازمة. شمل ذلك حساس الجهد والتيار نوع **INA219** المعروف بدقةه العالية، والذي يعد مناسباً لمراقبة استهلاك الطاقة الكهربائية للمحرك، إضافةً إلى حساس القوة **HX711** المكون من خلية حمل **Load Cell** قادرة على تحويل القوى أو الأوزان المؤثرة إلى إشارة كهربائية صغيرة يتم تضخيمها وتحويلها إلى إشارات رقمية قابلة للمعالجة. ولأغراض العرض الفوري للبيانات، جرى توصيل النظام بشاشة **LCD**، في حين تم استخدام وحدة قراءة بطاقة ذاكرة **MicroSD** لتخزين قراءات الحساسات بشكل مستمر لإجراء التحليل اللاحق. أما على الجانب الميكانيكي، فقد تم توظيف محرك كهربائي من نوع **BLDC** لإجراء الاختبارات العملية وقياس الكفاءة الفعلية للأداء، مع استخدام متحكم السرعة الإلكتروني **(ESC)** للتحكم في سرعة واتجاه دوران المحرك. وأخيراً،

تم تضمين مقاومة متغيرة للتحكم في التيار الداخل إلى المحرك، مما يتيح ضبط سرعته وفق متطلبات الاختبار.
 [13][11][9][7]



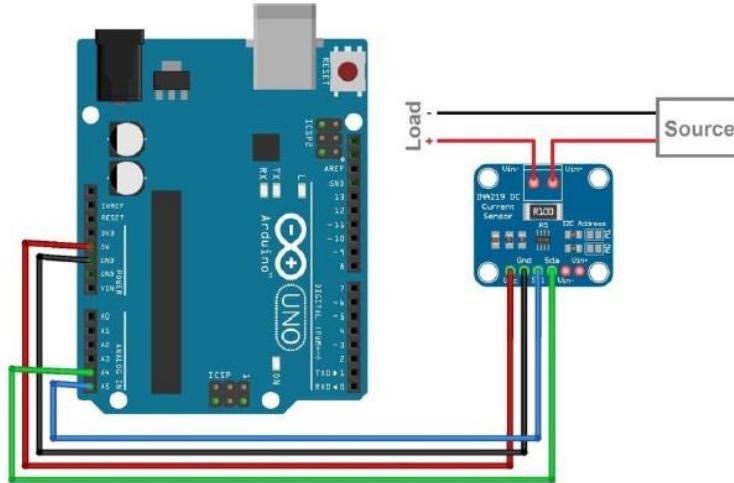
شكل 2: دائرة توصيل قياس كفاءة محرك



شكل 3: مخطط صنودقي يبين أجزاء منصة قياس كفاءة المحرك المصممة

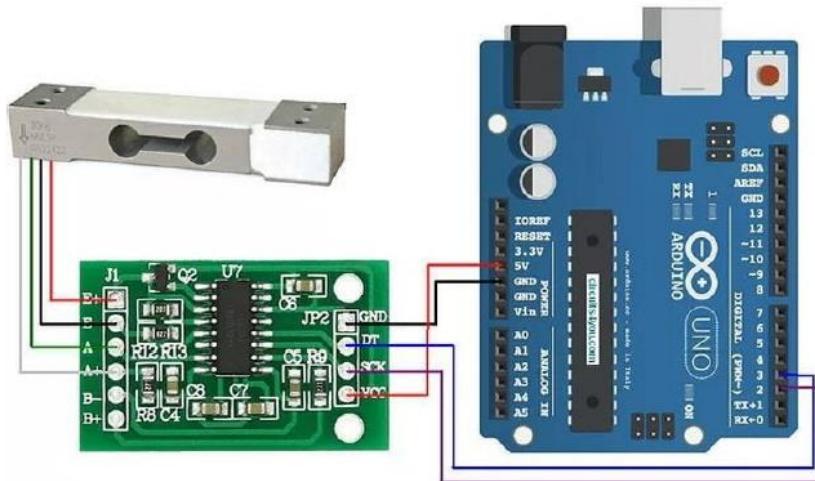
تم توصيل الحساسات بلوحة المتحكم اردينو اوتو حيث يتم أولاً توصيل حساس الجهد و التيار الكهربائي INA219 بالمصدر وبلوحة التحكم وذلك لغرض اخذ قياسات التيار والجهد عبر الحمل وتحليل استهلاك الطاقة

الشكل 3 يوضح كيفية التوصيل



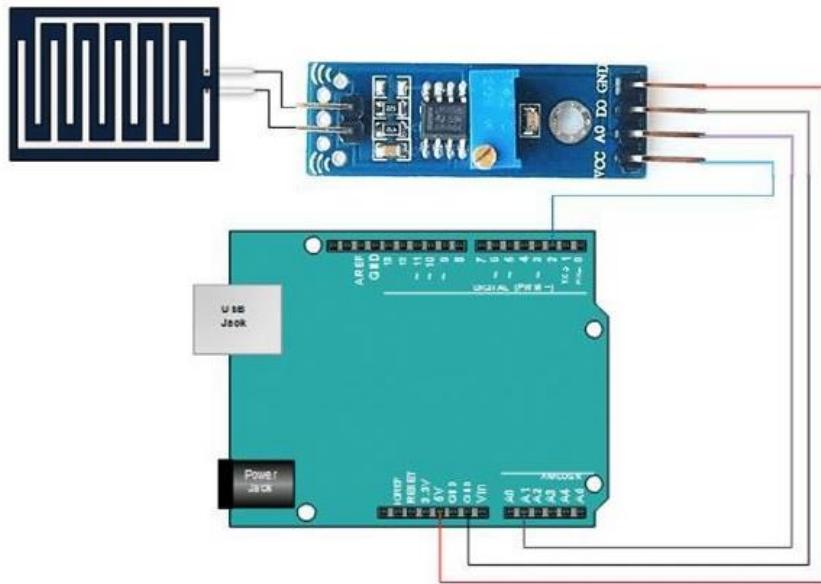
شكل4: توصيل حساس INA219 بالتحكم و الحمل

توصيل حساس القوة HX711 مع لوحة المتحكم وذلك لغرض قياسات الوزن و القوة الناتجة عن دوران المحرك ويكون التوصيل كما موضح في الشكل 4 أدناه:



شكل 5: توصيل حساس HX711 بالتحكم و الحمل

توصيل حساس السرعة الدورانية IR مع المتحكم وذلك لأغراض قياس عدد دورات المحرك RPM و الشكل 5 يوضح كيفية التوصيل.



شكل 6: توصيل حساس IR مع لوحة التحكم

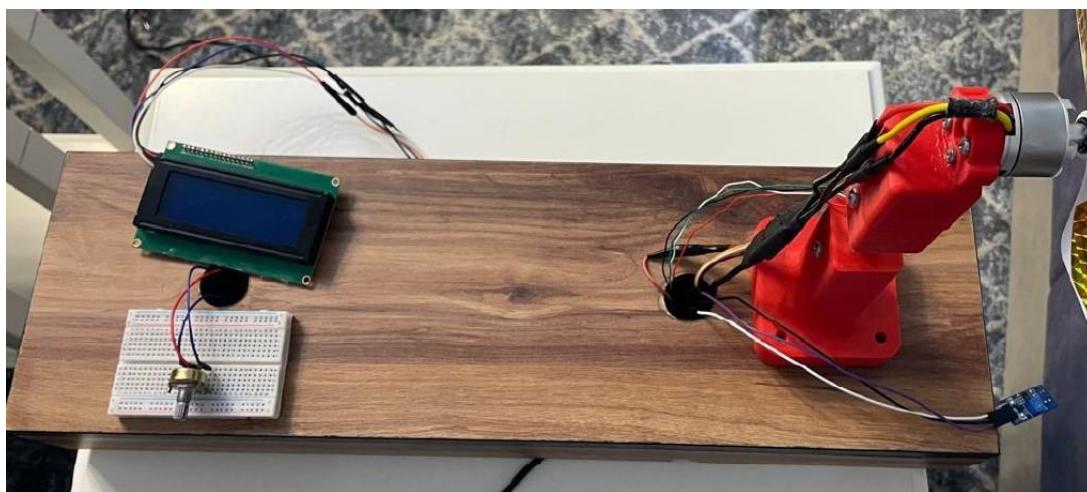
كما تم ربط شاشة العرض LCD و قاعدة بطاقة التخزين MICRO SD بلوحة الاردينيو

مؤشرات الأداء :

- الكفاءة الكهربائية = القدرة الميكانيكية الخارجة ÷ القدرة الكهربائية الداخلة.
- الاستجابة الديناميكية : مدى سرعة المحرك في الوصول إلى السرعة المطلوبة بعد تغير الحمل.
- ثبات السرعة : تقلبات السرعة عند حمل ثابت.

النتائج:

كما موضح في الشكل 7 المنصة المصممة موصولة بمحرك المراد قياس كفاءته، حيث تم تشغيل المحرك لمدة زمنية قدرها (365) ثانية، وخلال فترة التشغيل جرى تسجيل بيانات الجهد، التيار، والسرعة الدورانية لمحرك. كما تم قياس سرعة تدفق الهواء الناتجة عن دوران المروحة المرفقة بالمحرك باستخدام جهاز قياس سرعة الهواء (*Anemometer*).



شكل 7 نموذج منصة قياس كفاءة المحرك

الجدول (1) التالي يعرض البيانات الناتجة من تشغيل المحرك لمدة 365 ثانية والمسجلة بواسطة المنصة المصممة

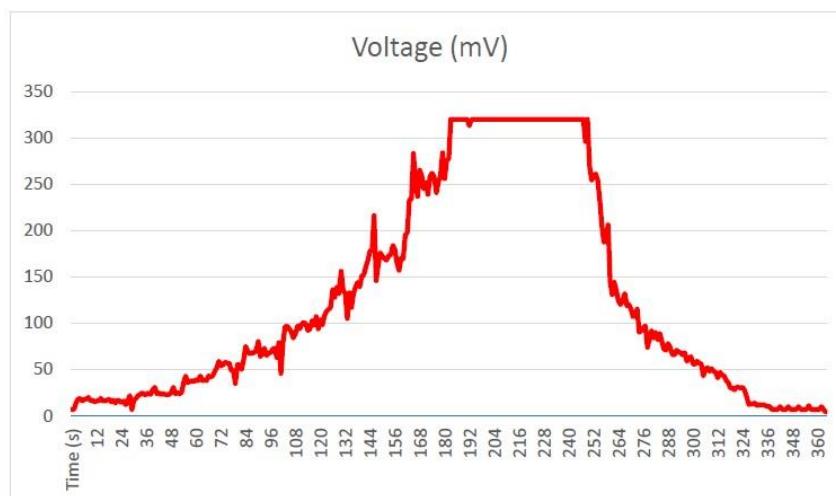
جدول 1 : بيانات المحرك خلال تشغيله لمدة 365 ثانية

سرعة الهواء (متر/ثانية) AIRSPEED (M/S)	السرعة الدورانية RPM	القدرة (غرام) FORCE (G)	القدرة (مللي وات) POWER (MW)	التيار (ملي امبير) CURRENT (MA)	الجهد (ملي فولت) VOLTAGE (MV)	الزمن (ثانية) TIME (S)
0	0	2.4	0.5	71	7	1
1.4	120	6.3	2	143	14	3
4.2	915	81.2	3.2	178	18	7
4	870	131.4	2.9	170	17	11
3.9	840	161.6	3.5	184	19	15
4.1	900	167.7	2	139	14	22
3.6	780	180.1	2.6	161	16	26
3.6	780	177	2.9	173	17	31
4.2	915	210.7	5.5	236	23	34
4.8	1065	261.8	5.9	214	25	38
5.5	1320	306.2	5.8	241	24	42
5.2	1260	325.3	5.8	253	23	46
5.3	1260	344.4	9.8	318	31	50
4.7	1005	364.5	12.4	347	36	55

5.1	1245	392.2	18.8	434	43	56
5.8	1395	525.8	15.5	394	39	65
6	1440	588.7	22.2	468	48	70
6.3	1515	609.4	27.6	529	52	71
6.8	1650	748	25.7	521	49	79
6.2	1500	729.3	11.7	332	35	80
6.7	1620	815.3	58	77	75	85
7.3	1770	922	577	722	80	91
7.4	1785	990.2	52.3	728	72	98
7.5	1815	1104.9	87.7	936	94	106
8.3	2010	1188.7	95.1	980	97	110
8.6	2070	1273.3	81.5	883	92	115
8.7	2100	1341.1	103.2	992	104	121
8.9	2160	1410.5	138.6	1210	115	125
9.4	2280	1642.3	145.8	1242	117	136
9.9	2385	1777.5	234.6	1540	152	142
10.5	2535	1906.8	315.9	1760	179	146
10.6	2550	1970.2	256.1	1576	163	149
11.1	2700	2215.2	531.3	2278	233	164
11.2	2715	2370.5	596	2395	249	167
11.1	2685	2494.1	672.9	2598	259	170
11.1	2685	2494.1	672.9	2598	259	170
11	2655	2636.1	683	2611	262	175
10.8	2625	2708.5	671.8	2592	259	179
11	2680	2861.1	983.3	3074	320	184
11.1	2705	3054.2	1001.7	3130	320	188
11.3	2730	3415.9	1024	3200	320	200
11.3	2750	3781.7	1024	3200	320	222
11.5	2760	3797.3	1024	3200	320	246
11.3	2740	3755.6	1024	3200	320	249

10.3	2475	3618.2	839.2	3111	270	251
10.3	2460	3431.4	689.7	2643	261	254
11.1	2685	2992	418.8	2034	206	260
9.4	2265	2414.9	140	1165	120	266
9	2175	2024.8	109.9	1031	107	272
8.5	2040	1624.4	65.3	788	83	280
8.2	1980	1450.8	61.3	765	80	286
7.5	1800	1212.3	45.5	669	68	295
7.2	1710	1083.3	31.7	563	56	301
6.5	1545	918.9	25.7	505	51	310
6.2	1500	815.7	18.5	427	43	316
4.9	1185	671.3	9.4	306	31	322
5.5	1335	568.9	4.1	207	20	327
3.2	780	416.7	1.6	122	14	331
2.6	645	244.7	1.1	106	10	338
2.5	615	169.4	0.5	70	7	342
0.7	60	82.6	0.5	69	7	349
0	0	67.3	0.5	69	7	351
0	0	24.7	0.2	39	4	365

في الشكل 6 رسم بياني يوضح منحنى الجهد بالنسبة للزمن و يلاحظ من الرسم ان المحرك يسحب جهد يصل الى 0.32 فولت، كما بين الرسم البياني الذي يليه منحنى التيار والقدرة بالنسبة للجهد الكهربائي حيث ان اعلى قيمة للتيار الذي تم سحبه تساوي 3.2 امبير و القدرة وصلت حتى 1.024 وات





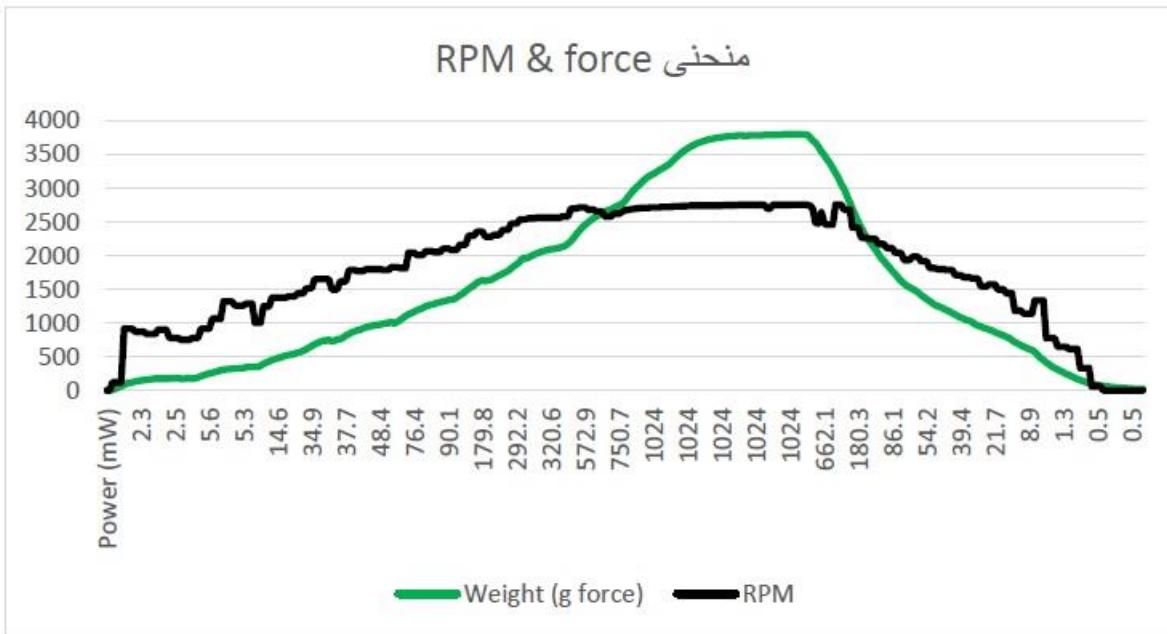
شكل 6 : منحنى الجهد بالنسبة للزمن ومنحنى التيار و القدرة مع الجهد

بالأخذ في الاعتبار قراءات القوة المأخوذة من حساس القوة HX711 ومقارنتها بالقدرة ان القوة تزداد تدريجيا بزيادة القدرة في المحرك لتصل الى اقصى قيمة للقوة عند اقصى قيمة للقدرة الشكل 7 يوضح منحنى القوة بالنسبة للقدرة ومن الرسم البياني نجد ان المحرك يولد قوة تساوي 3500 جرام عند اقصى قدرة 1.024 وات

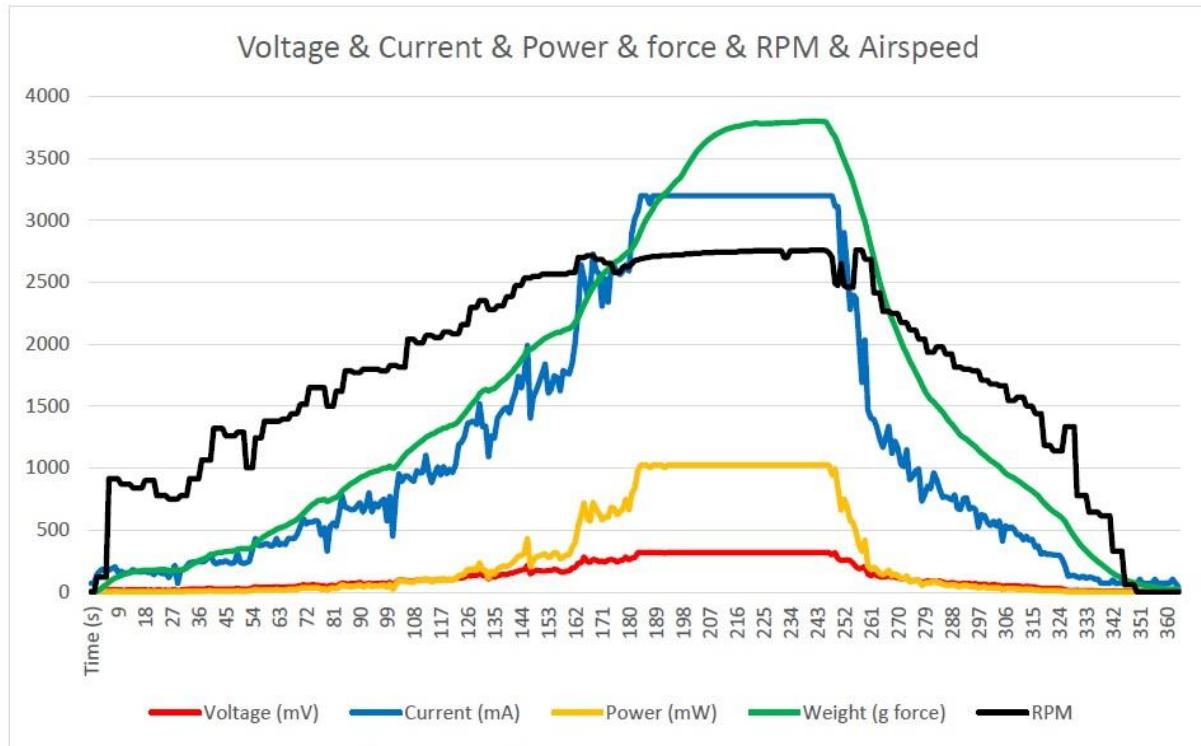


شكل 7: منحنى القوة بالنسبة للقدرة

من خلال قراءات السرعة الدورانية ورسم العلاقة بينها وبين القدرة نلاحظ انه بزيادة السرعة الدورانية زادت قدرة المحرك على انتاج قوة أكبر. الشكل 8 التالي يوضح رسم بياني يبين العلاقة بين السرعة الدورانية و القوة بالنسبة للقدرة



شكل 8: منحنى السرعة الدورانية و القوة بالنسبة الى القدرة



شكل 9: رسم بياني يظهر الجهد والتيار والقدرة والسرعة الدورانية بالنسبة للزمن

يظهر من خلال البيانات أعلاه في شكل 9 وجود علاقة مباشرة بين الجهد والتيار والقدرة حيث تزداد القيم وتتلاطم بالتزامن مع بعض مما يبين ان الحمل يخضع لتحكم تدريجي، كما ان القوة والسرعة الدورانية يظهرا نمطاً متشابهاً مما يدل على ان تأثير القوة مباشرة على سرعة الدوران.

المنصة المنفذة أظهرت كفاءة عالية في قياس وتسجيل قراءات مؤشرات تشغيل المحرك مما وفر بيانات مهمة تدعم قرارات تحسين تصميم المحرك او تحديد مدى كفاءة عمله، كما تميز المنصة بانها نفذت باستخدام مكونات متوفرة في السوق المحلي وبتكلفة منخفضة.

القراءات المسجلة من المنصة توفر لمهندس الصيانة او الباحث المطور معلومات مهمة عن نمط تشغيل المحرك وكمية الطاقة المستهلكة في ظروف تشغيل مختلفة مما يتيح تطوير أداء المحرك وتحسين استهلاك الطاقة كما يساعد في تحديد نقاط الخلل والعمل على إصلاحها، وذلك من خلال مقارنة بيانات تشغيل المحرك مع بياناته الأولية عند تشغيله أول مرة.

الاستنتاج

- تم تصميم منصة اختبار لقياس كفاءة المحرك الكهربائي، وأظهرت دقة عالية في تتبع مؤشرات التشغيل الرئيسية: الجهد، التيار، القدرة، القوة، السرعة الدورانية، وسرعة الهواء الناتجة عن المروحة.
- البيانات أظهرت علاقة مباشرة بين الجهد والتيار والقدرة، حيث تزداد هذه القيم وتتحفظ بالتزامن، مما يشير إلى أن المحرك يخضع لتحكم تدريجي أثناء التشغيل.
- قراءة القوة والسرعة الدورانية أظهرت نمطاً متشابهاً، مما يدل على تأثير القوة الناتجة بشكل مباشر على سرعة الدوران.
- عند أعلى قدرة مسجلة بلغت 1.024 وات، تمكن المحرك من توليد قوة تصل إلى حوالي 3500 جرام، مما يعكس كفاءته التشغيلية.
- المنصة أثبتت فعاليتها في توفير بيانات دقيقة وموثقة، باستخدام مكونات متوفرة محلياً وبتكلفة منخفضة، مما يجعلها أداة عملية لدعم مهندسي الصيانة والباحثين.
- القراءات المسجلة توفر إمكانية مراقبة نمط تشغيل المحرك، تحسين استهلاك الطاقة، وتحديد نقاط الخلل مقارنة بالبيانات الأولية للmotor.
- توفر المنصة وسيلة فعالة وموثقة لقياس كفاءة المحرك وتطوير أدائه، مما يدعم استدامة وكفاءة التشغيل في التطبيقات العملية.

التوصيات

- تحسين أداء المحرك: استخدام البيانات المسجلة لتحليل نمط تشغيل المحرك وتحديد نقاط التحسين لزيادة الكفاءة والقدرة الناتجة.
- المراقبة المستمرة: اعتماد المنصة كأداة مراقبة مستمرة لضمان استقرار الأداء وكشف أي انخفاض في الكفاءة أو وجود خلل مبكر.

- **تطوير المنصة:** إضافة مستشعرات لقياس درجة الحرارة والاهتزاز ودمجها مع أنظمة تحكم ذكية لجمع البيانات وتحليلها تلقائياً.

- **تحليل استهلاك الطاقة:** استخدام البيانات لتحديد الاستهلاك الفعلي للطاقة وتطوير استراتيجيات لتقليل الفاقد وتحسين الاستدامة التشغيلية.

المصادر والمراجع:

1. Muhamad Ariff Khalid1, Performance analysis of brushless DC motor with optimum magnetic energy for bicycle application, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2021
2. Candida.Y, Performance Analysis of BLDC Motors and its Various Control Strategies, International Journal of Scientific Research in Engineering and Management, 2023
3. Cristofaro Pompermaier, Performance evaluation of brushless DC permanent magnet motor using Finite Element Method, 2011
4. M N Yuniarto, Design and Performance Analysis of Brushless Direct Current (BLDC) Motor Controller for Electric Scooter, ISAIME 2019
5. Arduino LLC. (2023). Arduino UNO R3 Datasheet. Retrieved from <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
6. Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform. Maker Media, Inc.
7. Texas Instruments. (2015). *INA219 High-Side I2C Current/Power Monitor Datasheet*. Retrieved from <https://www.ti.com/product/INA219>
8. AVIA Semiconductor. (2013). *HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter for Weigh Scales Datasheet*.
9. Krishnan, R. (2010). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press.

10. Geras, J. F. (2010). Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. CRC Press.
11. IEEE Standard 112-2017: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE.
12. Hughes, A., & Drury, B. (2019). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications (5th ed.). Newnes.
13. ASTM D3464-12: Standard Test Method for Average Velocity in a Duct Using a Thermal Anemometer. ASTM International.
14. Anemometer Operating Manual 4
15. Arduino Programming Language Reference. (2023).