

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	3
2. A propeller tulajdonságai	3
3. A propeller tervezése	6
3.1. Optimális propeller kiszámítása	7
3.2. Tömeg meghatározása	7
3.3. Motor	8
3.4. Propeller kiválasztása	8
4. Propellerek Gyártása	10
4.1. Propeller tervezése	11
4.2. <i>JavaProp</i>	12
4.3. <i>FreeCAD</i>	12
4.4. <i>Slic3r</i>	12
5. Tesztkörnyezet felépítése	14
5.1. Szenzorok	16
5.1.1. Remote Data Unit (RDU)	17
5.1.2. Fordulatszám-mérő szenzor	18
5.1.3. Hőmérséklet szenzorok	19
5.1.4. Mérleg	19
5.2. Komponensek	20
5.2.1. Akkumulátor	20
5.2.2. Motor	22
5.2.3. Electronic Speed Control (ESC):	22
5.2.4. Állvány	23
5.2.5. Naze32 repülés vezérlő	24
6. Tesztkörnyezet programozása	25
6.1. Tesztelés folyamata	25
6.2. Adatok tárolása	29
7. Propeller Teszt	30
7.1. Propeller hatékonysága	30
7.2. Motor és Teljes hatékonyság	31
8. Eredmények	32
8.1. Motor hatásfoka	33
8.2. Teljes rendszer teljesítménye	36
8.3. Teljes rendszer hatásfoka	38
8.4. Mérőkönyezet hibabecslése	39
9. Kitekintés	42

1. Bevezető

A propeller alakítja át a motorok nyomatékát vonóerővé. Ezért különösen fontos számunkra a megfelelő propeller kiválasztása vagy igényeink szerinti gyártása. Továbbá befolyásolja a drón repülési idejét, maximális sebességét, gyorsulását, a rendszer hatásfokát és stabilitását. Attól függően, hogy számunkra melyek az elsődleges tulajdonságok, ugyanazon drónhoz másfajta propeller szükséges.

A dolgozat első részében ismertetem a propeller tulajdonságait, majd kiszámítok a saját szempontjaim szerint egy "optimális propellert", ahol a stabilitás lesz az elsődleges.

Ezt követően bemutatom a tervezés folyamatát, kezdetektől a gyártásig. A propeller teszteléséhez szükség volt egy saját mérőállomást kifejlesztésére, valamint ennek használatához egy mérőprogram megírására is. Az így kapott eredményeket ismertetem és a tesztelés során kapott eredményeket bemutatom. Az eredmények között szerepel a 3D nyomtatóval nyomtatott propellerek adatait is, mely tulajdonságait összehasonlítom a gyári propellerrel. Valamint vizsgálom a 3D nyomtatás képességeit a drón propellerek gyártásában.

2. A propeller tulajdonságai

A számításokhoz szükséges propeller adatainak egyrészét a gyártók megadják, mint.:

- propeller átmérő
- propeller emelkedése
- propeller forgási iránya¹
- propeller maximális fordulatszáma (csak néhány gyártó adja meg, pl.: APC[3])

A többi adat viszont már nem publikus:

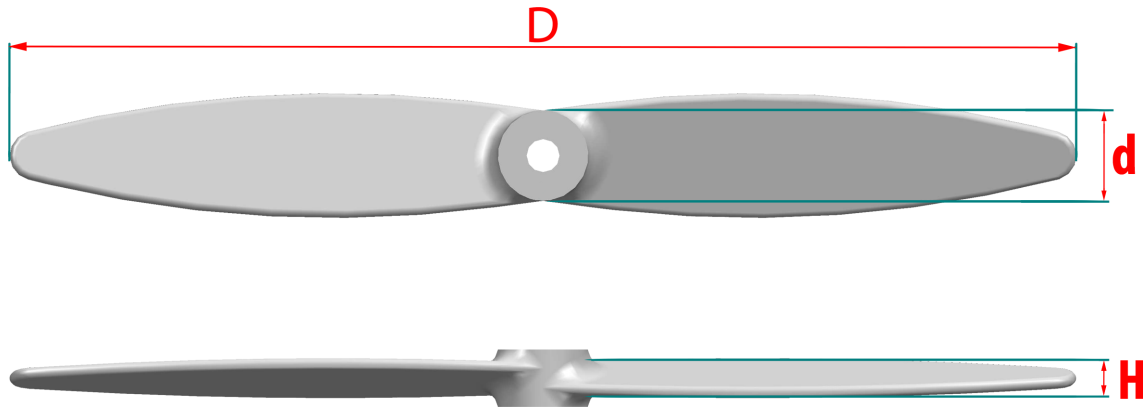
- propeller profilja
- propeller hatékonysága

Vannak olyan adatok mint például a propeller ideális fordulatszámának meghatározása, amihez szükséges a drón pontos tömegének meghatározása.

Az alábbi részben ismertetem a propeller tulajdonságait és a számításukhoz szükséges képleteket.:

Légcsavar átmérő (D) [mértékegysége: *inch* vagy *milliméter*]: Annak a felületnek az átmérője, melyet a propeller forgás közben lefed. Ez kétoldalú légcsavaroknál egyszerűen a propeller átmérőjének felel meg. Lásd: (1. ábrán).

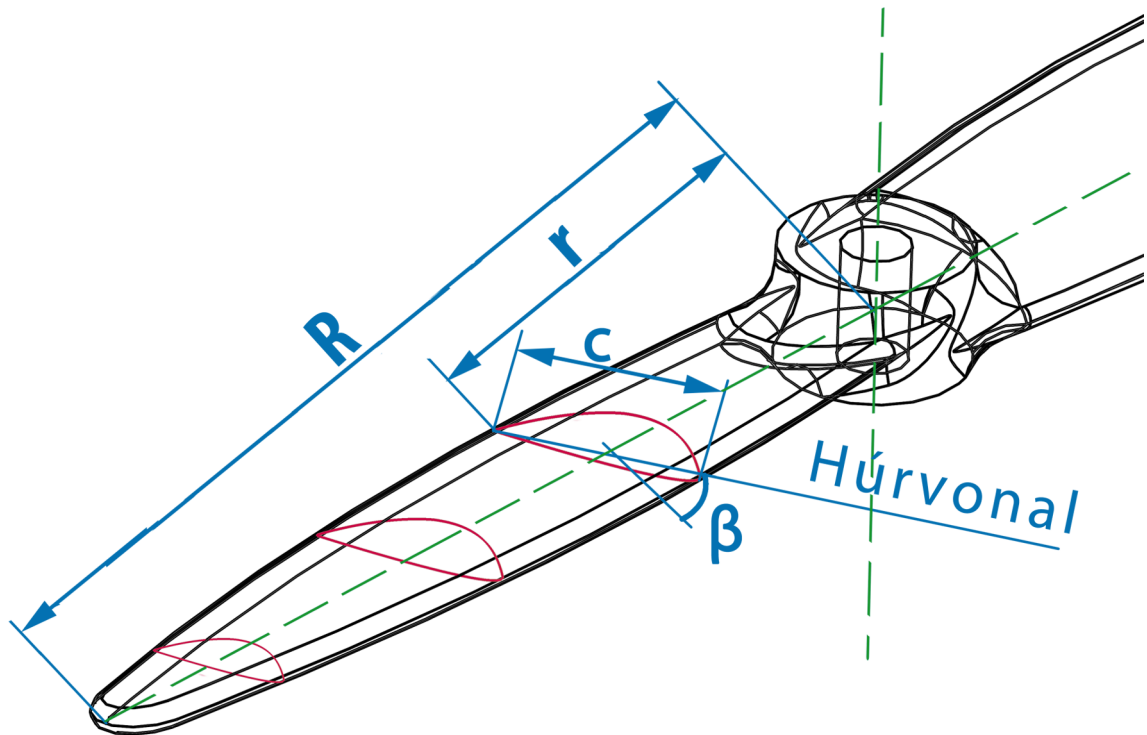
¹ Óramutató járásával megegyező vagy ellentétes. Ez a fellépő forgatónyomaték kompenzálása miatt szükséges. Ez az oka, amiért nagyrészt páros számú légcsavarból építik a drónokat.



1. ábra. Légcsavar méretei [Saját forrás]

Légcsavaragy átmérő (d) [mértékegysége: milliméter]: A légcsavar tengelyénél az átmérőre merőleges méret. Lásd: (1. ábrán).

Emelkedés (H) [mértékegysége: inch vagy milliméter]: Egy körülfordulás alatti haladást adja meg optimális esetben. Lásd: (1. ábrán).



2. ábra. Propeller profil [Saját forrás]

Légcsavar metszet sugara (r): Lapátprofil távolsága a légcsavartengelytől egy adott ponton mérve (1. ábra).

$$r : 0 \leq r \leq R; \quad (1)$$

Lapát húrhossza (c): A légsavar profil szélessége egy adott ponton mérve a sugár függvényeként. Ezt a toll több pontján mérve adják meg. Lásd: (1. ábrán).

$$c = c(r) \quad (2)$$

Lapát húrhossz arányszáma ($\hat{c}$): Propeller profilban ezt az arányszámot használjuk a lapát húrhosszána megadására.

$$\hat{c} = \frac{c}{R} \quad (3)$$

Lapátmetszet beállítási szöge (β): Értéke a légsavar hossza mentén változik. Lásd az (1. ábrán).

$$\beta = \beta(r) \quad (4)$$

Dimenziótlan sugár ($\hat{v}$) A légsavarprofil megadásakor ezzel határozzuk meg a profilban vizsgált húrhosszak távolságát a tengelytől.

$$\hat{v} = \frac{v}{R} \quad (5)$$

Percenkénti fordulatszám (RPM) [mértékegysége: $1/min$]: A tengelyen mérhető szám, mely az egy perc alatt mért fordulatok számát adja meg. Ezt álló helyzetből fordulatszám-mérővel tudjuk mérni.

Másodpercenkénti fordulatszám (n) [mértékegysége: $1/sec$]:

$$n = \frac{RPM}{60} \quad (6)$$

Légsavarkúp átmérője (D_k) [mértékegysége: *milliméter*]: Légsavarkúp használatakor ez eltakarja a légsavar középső részét. Használata nélkül a légsavaragy átmérőjének $1,5 * d$ -ét adunk meg.

Szögsebesség (Ω) [mértékegysége: $1/s$]:

$$\Omega = 2 * \pi * n \quad (7)$$

Lapátok száma (B) [mértékegysége: *darab*]: A tollak számát adja meg, amelyek a légsavar tengelyén alálhatóak. Többnyire 2 vagy 3 tollút használunk.

Haladás (h): Egy tengely körüli fordulás alatt megtett utat adja meg. Lásd: (2. ábrán.)

$$h = \frac{v * 60}{n} \quad (8)$$

Erőhaladási fok (J): Segítségével kiszámolható az egyes sebességekhez tartozó propeller hatásfoka.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (9)$$

Profil: Igen fontos geometriai jellemzője a légsavarnak. Befolyásolja az optimális fordulatszámot. *APC* propellereknél megadják a maximális fordulatszámot is [3]. Akár sajátot is tervezhetünk melyben segítségünkre lehet a *JavaFoil* alkalmazás [16].

Vonóerő (T) [mértékegysége: *Newton*]: Egy megadott sebességnél létrejött vonóerőt értjük. A 0 sebességhez tartozó vonóerőt álló helyzetben asztalon tudjuk mérni.

Teljesítmény (P) [mértékegysége: *Watt*]: Két fajta teljesítményt számolunk:
 (P_l): a légsavar által leadott teljesítmény
 (P_m): a légsavar által leadott teljesítmény hatásfokával leosztott érték, mellyel a veszteséget tudjuk kiszámolni.

Hatásfok (η): A légsavar által leadott teljesítmény és a forgáshoz szükséges teljesítmény hányadosa, mely a hatásfokot adja meg.

$$\eta = \frac{T * v}{P} \quad (10)$$

3. A propeller tervezése

A propeller tervezése előtt fontos átgondolni a vele szemben támasztott követelményeinket. A legfontosabb a jó stabilitás. A teljesítmény legyen összhangban a drón motorjaival, az akkumulátorral és a drón tömegével. Számomra ez jelenti az optimális propellert. Ha van már egy drónunk és számítások nélkül szeretnénk javítani az egyes tulajdonságain, akkor a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- A vonóerő addig növelhető, amíg a légsavar elfér a váz mellett.
- Sebesség növeléséhez érdemes választani több tollú légsavart, mert ezzel jelentősen növelhető a drón teljesítménye.
- Jobb hatásfok eléréshez kisebb fordulatszámú, nagyobb átmérőjű és nagyobb emelkedésű légsavar szükséges. Ekkor a repülési idő is növekszik, mert az akkumulátort kíméli.

3.1. Optimális propeller kiszámítása

Először is szükségünk van a drónunk tömegére és néhány komponensének ismeretére:

- Drón tömege: Meghatározza azt a teljesítményt, melyet a propellernek le kell adnia a biztonságos repülés érdekében.
- ESC (Electronic Speed Control): A szükséges áramot biztosítja a motor részére. Alacsony akufeszültségnél képes a motor teljesítményét visszavenni a fedélzeti áramellátás biztosítására. Programozással beállítható, hogy a drón mennyire agresszíven viselkedjen az adott irányításra. Ezt általában érdemes megvásárolni a motorokkal együtt, hogy szinkronban legyenek, ami nagy hatással van a drón stabilizálására.
- Motor: Szükségünk van a teljesítményére és a maximális fordulatszámára. Az utóbiből meghatározzuk a motor optimális fordulatszámát.

3.2. Tömeg meghatározása

Mintaként az egyetemen tervezett drón komponenseit használtam fel. Ezen alkatrészek tömegét foglaltam össze a 1. táblázatban.

darab	Alaktrész név	súly <i>g</i>
1db	Drón váza (becsült érték).	200
1db	11.1V 3S lithium battery	184
4db	SunnySky A2216 KV1250 Brushless Motor	256
4db	5pcs Props 228x119mm 9x4.7 EP9047 AD	40
1db	ARX-ULT10 Ultrahangos távolságérzékelő	30
1db	MMA7341LC 3-Axis Accelerometer	0,35
1db	L3GD20	0,70
1db	Multi Micro Hornet	2,50
1db	moongel	13,5
1db	raspberry pi2 model B	60
1db	USB 2.0-UART TTL 3.3V/5V S.k. CP2102	0 ²
4db	HOBBYWING sky walker(Skywalker-40A)	140
1db	NAZE32 Rev6 10DOF flight controller	23

1. táblázat. A drón becsült tömege: 890g [Saját forrás]

Tehát a végeredmény az 1. táblázat szerint 890g. Ebből meghatározható az egy propellerre jutó súly. A mi esetünkbe quadcoptert építünk (olyan drón aminek 4 rotorja van). Így rotorként 222,5g-ot kapunk; ekkora tömeget kell megmozgatnia a propellereünknek.

² Ezzel tudjuk az alaplapt összekötni a számítógéppel. Nem kerül beépítésre.

3.3. Motor

Számításunkhoz szükség van a motor legfontosabb paraméterére a maximális fordulatszámra. Ezt az adatot a gyártók megadják. A 2. táblázatban tüntettem fel a többi motor adataival összehasonlítva.

Motor	Kv rpm	Max rpm	Id. rpm
SunnySky A2216			
KV1250 Brushless Motor	1250	13500	3375
2882/14 Brushless			
Outrunner 1450kv	1450	16095	4024
Turnigy 2204-14T			
(19g) Outrunner	1450	16095	4024
Turnigy 1811 Brushless			
1 Indoor Motor 1500kv	1500	16650	4163
Turnigy 2730			
Brushless Motor 1500kv	1500	16650	4163
HobbyKing Donkey ST2004			
-1550kv Brushless Motor	1550	17205	4301
AP19 Brushless Motor	1580	17538	4385
C2024 Brushless Motor			
Outrunner 1600kv (17g)	1600	17760	4440

2. táblázat. A motorok teljesítmény adatait [14]

A választásunk a *SunnySky* termékére esett, amelynek ideális *RPM*-je 3375. Ehhez az értékhez fogjuk kiválasztani azokat a propellereket, amelyek ideális *RPM*-je legjobban megközelíti ezt a számot. Így tudjuk meghatározni a drónunk rendszeréhez legjobban illeszkedő légsavart.

3.4. Propeller kiválasztása

Ehhez szükségünk van a propellerek ideális *RPM*-jének kiszámítására (11. képlet). Összehasonlításként két fajta geometriájú propellert mutatok be, melyek a 3. táblázatban és 4. táblázatban láthatók.

$$rpm_{ideal} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2\omega}} \left(\frac{g^{3/2}m^{3/2}}{\alpha D \sqrt{\rho}}\right)^{1/\omega} \quad (11)$$

A "slow-fly" (SF) geometriájú propellerek: Ezek a propellerek kisebb forgási sebességre vannak tervezve 3. ábra. Az *APC* által gyártott maximális fordulatszáma 65,000[3]. Leginkább a jobb hatásfok és kevésbé dinamikus viselkedés jellemző ezekre a propellerekre.

A *SunnySky* motorhoz legjobban illeszkedő a *APC SLOWLY 9X6os* propeller, mivel ideális fordulatszámuk különbsége a legkisebb ($3375-3501=126$).

Propeller	Diamater (m)	PC	PF	Ideal rpm
7x4	0,1778	0,028	3,30	6440
7x5	0,1778	0,028	3,40	6097
7x6	0,1778	0,039	3,40	5530
8x3,8	0,2032	0,045	3,40	5098
8x6	0,2032	0,087	3,40	4200
9x3,8	0,2286	0,048	3,55	4521
9x4,7	0,2286	0,146	3,00	4114
9x6	0,2286	0,119	3,55	3501
9x7,5	0,2286	0,204	3,40	3157
10x3,8	0,2540	0,136	3,40	3449
10x4,7	0,2540	0,187	3,30	3251
10x7	0,2540	0,337	3,30	2720
11x3,8	0,2794	0,183	3,40	3073
11x4,7	0,2794	0,283	3,30	2786
11x7	0,2794	0,398	3,40	2445
12x3,8	0,3048	0,230	3,60	2645
12x6	0,3048	0,629	3,03	2130

3. táblázat. SLOWFLY (*SF*) Series propellerek teljesítmény adatai [14]



3. ábra. APC SLOWFLY (*SF*) 9X6 prop [9]

A propeller átmérőjénél fontos még figyelembe venni, hogy legyen elegendő hely a propeller forgásához, a tollak semmiképpen ne ütközzenek a drón vázához.

A Electric (*E*) geometriájú propellerek :

Sokkal dinamikusabb propellerek, mint az előbbiek, de kevésbé takarékosak. Gyorsabban tudunk velük repülni, de az akkumulátorunk is gyorsabban merül, mint a *SLOWFLY* (*SF*) Series propellerek esetében, tehát kisebb lesz a maximális repülési időnk. Ezeknek a sebességét az APC már *145,000/prop diameter (inches)*-ben határozta meg [3].

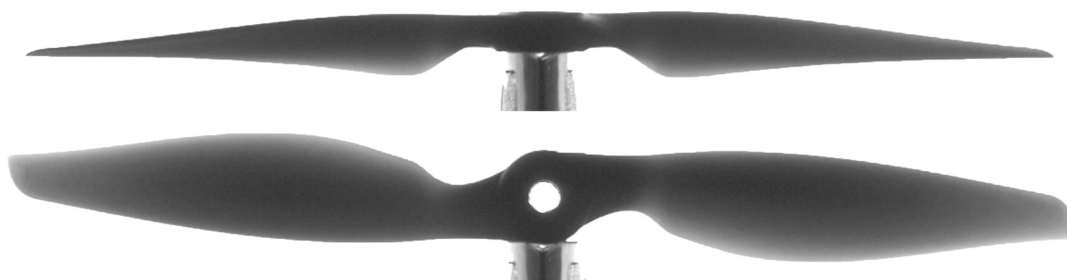
Ideális *RPM*-jét az 11. képlet felhasználásával az alábbi 4. táblázat tartalmazza.

Propeller	Diamater (<i>m</i>)	PC	PF	Ideal rpm
6x4	0,1524	0,015	3,2	8705
7x5	0,1778	0,042	3,2	6013
8x4	0,2032	0,060	3,2	5159
8x6	0,2032	0,106	3,2	4319
8x8	0,2032	0,148	3,2	3891
9x4,5	0,2286	0,090	3,2	4381
9x6	0,2286	0,129	3,2	3915
9x7,5	0,2286	0,352	2,9	3189
9x9	0,2286	0,448	2,9	2935
10x5	0,2540	0,144	3,2	3660
10x7	0,2540	0,223	3,2	3193
10X10	0,2540	0,680	2,9	2451
11x5,5	0,2794	0,222	3,2	3103
11x7	0,2794	0,301	3,2	2822
11x8	0,2794	0,357	3,2	2675
11x8,5	0,2794	0,383	3,2	2617
11x10	0,2794	0,589	3,2	2288

4. táblázat. Electric (*E*) Series propellerek teljesítmény adatai [9]

A *SunnySky* motorhoz legjobban illeszkedő *APC ELECTRIC 9X75os*. Mivel idális fordulatszámuk különbsége a legkisebb. ($3375 - 3189 = 186$).

Szemléltetésként a 4. ábrát illesztettem be az *APC ELECTRIC* propellerek közül, melyet összevetve az *APC SLOWFLY*-al jól látszanak a geometriai különbségek.



4. ábra. *APC Electric (E) 9X6* prop [9]

4. Propellerek Gyártása

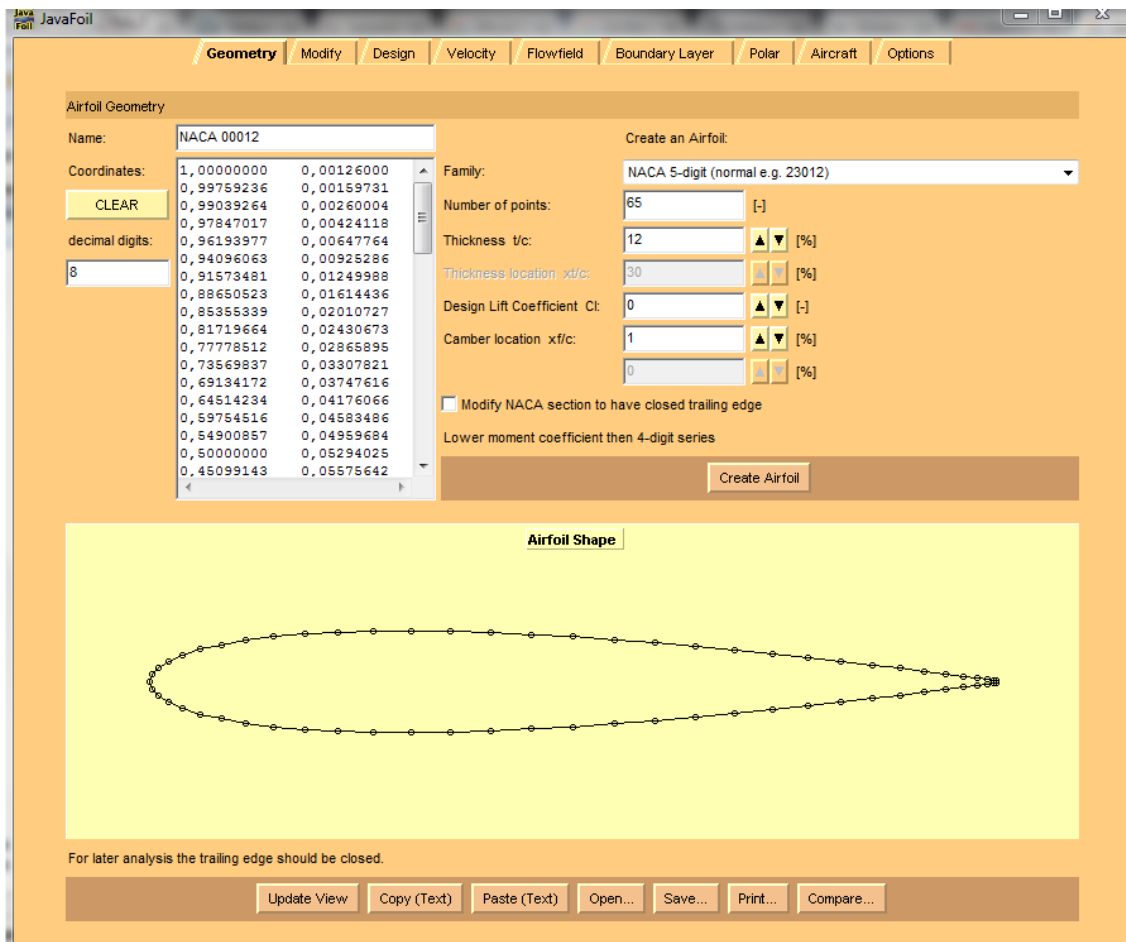
Eddig csak megközelíteni tudtuk az általunk kiválasztott motorhoz szükséges légcsavart, mely a legjobban illeszkedik a rendszerünkhöz. Most ezt meg is tervezhetjük a *JavaFoil* (5. ábra) és *JavaProp* (6. ábra) programmal. Az így kapott modellt betöltjük már az *FreeCAD* vagy más *CAD*-es programokba, majd *.stl* fájként menthetjük. Ezt követően

az egyetem 3D nyomató vezérlőprogramjába töltve *3Dstuffmaker Easy Print* segítségével nyomtatjuk.

4.1. Propeller tervezése

A *JavaFoil* program, propeller profil tervezéséhez lett kifejlesztve. Megtalálhatóak benne a repülőgépeknél használt főbb propeller profilok. Több fajta analízist és áramlási vizsgálatot végezhetünk vele.

Az 5. ábrán egy *NACA* geometriájú légcsavar profil látható.



5. ábra. JavaFoil [Saját forrás]

Melynél a propeller következő tulajdonságait adtam meg:

- lapát húr hossz arányszámát és a dimenziótlan sugarát, mely a (5 ábrában) szereplő táblázatában látható
- a profil rajz pontjainak számát.
- a profil vastagságát

4.2. *JavaProp*

Ezzel az eszközzel egyszerűen lehet tervezni és elemezni a légsavarokat. A következő néhány paramétert kell hozzá megadni:

- Propeller neve
- Lapátok száma
- Másdpercenkénti fordulatszám
- Propeller átmérő
- Légsavarkúp átmérője
- Motor teljesítménye

A program tartalmaz beépített légsavar profilokat is, de saját szerkesztésű profilokat is letölthetünk [17].

A programmal még analíziseket és szélcsatorna tesztek is végezhetünk. Továbbá együtt használható *MATLAB*, *GNU OCTAVE*, *MATHEMATICA* és *MAPLE* programokkal.

A kész modellt lementhetjük saját formátumába vagy *CAD* formátumba is, ezt láthatjuk a 6 ábrán. Tovább itt tudjuk betölteni a JavaFoil által tervezett légsavart. A fenti táblázatban a légsavar geometriai adatai szerepelnek. Az alatta lévő képen ennek a rajza, amelyenél a légsavar aggyal való csatlakozása látható.

4.3. *FreeCAD*

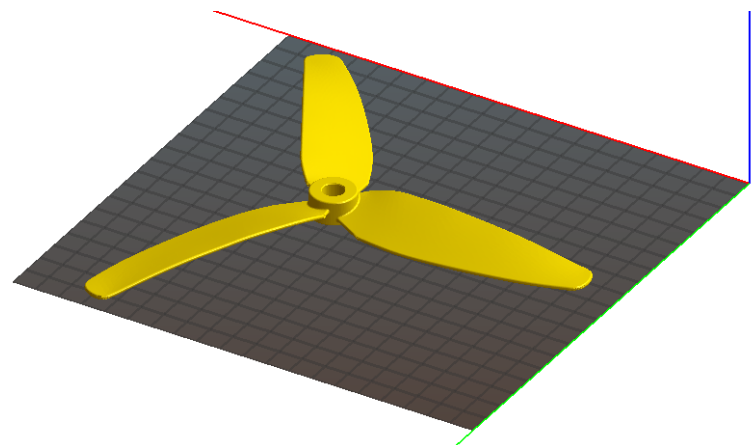
A *JavaProp* által generált *.iges* fájlt megnyithatjuk. Az alábbi ábrán (7.ábra) látható egy saját fejlesztésű légsavar profilja, melyet a *JavaProp* alkalmazással készítettem.

A *CAD* programban, még hozzá kell szerkeszteni a légsavaragyat és az eredményt lementeni *.stl* fájlba, így az általunk kiválasztott 3D nyomtatóval nyomathatóvá válik.

4.4. *Slic3r*

A kész *.stl* fájlból *Slic3r* programmal tudunk a nyomtató sepcifikus *gcode*-ját generálni[19]. Itt tudjuk beállítani:

- nyomtatófej sebességét nyomtatáskor
- nyomtatófej sebessége üresjáratkor
- nyomtatófej átmérőjét
- nyomtatási hőmérsékletet
- nyomtatandó tárgy kitöltésének típusát
- nyomtatandó tárgyhoz az alátámasztást



8. ábra. 5030-as 3 tollú propeller [Saját forrás]

A *gcode* tartalmazza a nyomtatás során bejárt nyomtatófej teljes útvonalát és a hozzájuk rendelt beállításokat. A 8. ábrán látható a nyomtatás előtti propeller képe, ezen keresztül teszteltem a 3D nyomtatás lehetőségeit légszár gyártásban.

Az általam 3D-ben nyomtatott propeller ABS műanyagból készült, mely a tesztek során megbízhatóan működött. Az általa elért maximális nyomaték 203gramm volt.

A következő táblázatban szerepelnek a 3D nyomtatók által felhasznált alapanyagok összehasonlítása:

	HT-PLA	PLA	ABS
Szakítószilárdság (MPa)	66	50	38
Hajlítószilárdság (MPa)	126	83	65
Hőállóság ($^{\circ}C$)	100	55	79

5. táblázat. 3D nyomtató alapanyagok [13]

Jól látható az (5. táblázatban), ha a *High Temperature PLA* (magyarul: magas hőállóságú és szilárdságú *PLA*, későbbiekben *HT-PLA*) műanyagot választunk és hőkezeliük, akkor a polimer szerkezete kristályrácsba szerveződik. Ennek hatására magasabb szilárdságot és hőállóságot kapunk. Így ha nem elegendő a *ABS* műanyag szilárdsága, akkor *HD-PLA* polimerből nyomtatva és hőkezelve a propeller szakítószilárdság és hajlítószilárdsága közel kétszeresére növelhető [13].

Továbbá, figyelni kell a nyomtatásra a vírusok miatt. Ezek módosítani tudják az *.stl* fájlokat, hogy üregeket tesznek bele a nyomtatandó propellerbe. Ezért a használat során szétesik és komolyabb károkat okozhat a drónnak[22].

5. Tesztkörnyezet felépítése

Mivel az egyetem nem rendelkezik szélcsatornával, így külön a propellerek tesztelésére nem volt lehetőségem. Csak a légszár, motor és motorvezérlő együttes teljesítményét

tudtam mérni. Kutatásom során egy olyan propellert szerettem volna fejleszteni, amellyel a tesztelt motor legjobb teljesítményt tudja leadni vagy együttes működésük energiahatékonyság szempontjából a legjobb.

A szakirodalom mélyebb tanulmányozása után arra a következtetésre jutottam, hogy a pontosabb mérésekhez egy saját mérőállomás építése szükséges, amely alkalmas egyedi propeller kifejlesztésére. Az általam kifejlesztett és a piacon kapható mérőállomások tulajdonságait a (6. táblázatban) láthatjuk:

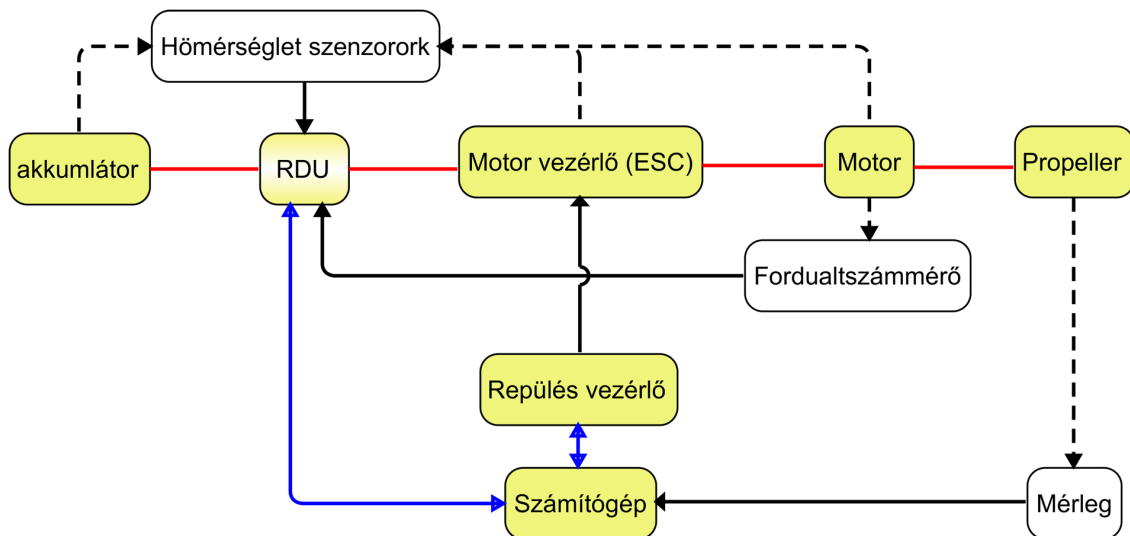
	Turnigy Thrust Stand and Power Analyser v2	RCbenchmark -1520	Saját fejlesztésű mérőállomás
számítógépes kommunikáció	-	USB	USB
nyomaték mérési tartomány (<i>gramm</i>)	0-5000g	0-5000g	0-6000g
nyomaték mérési egység (<i>gramm</i>)	1g	1g	0,1g
nyomaték mérési pontosság (<i>gramm</i>)	10g	10g	3g
feszültség tartomány (V)	0-60V	0-35V	0-70V
feszültség pontosság (V)	nincs adat	0,07V	0,001V
áramerősség tartomány (A)	nincs adat	0-40A	0-300A
áramerősség pontosság (A)	nincs adat	0,4A	0,04A
fordulatszám mérés (<i>RPM</i>)	-	0-192kRPM	0-65kRPM
fordulatszám mérés pontosság (<i>RPM</i>)	-	nincs adat	17RPM

6. táblázat. Mérőállomások összehasonlítása [18][23]

A saját mérőállomás építésekor a következő elvárásaim voltak:

- tudjon kommunikálni a számítógéppel
- moduláris szerkezetű legyen (a könnyű karbantartás és könnyebb további fejlesztések érdekében)
- mérje gramm pontossággal a légszárny nyomatékát

A mérőállomás működését az 9. ábrán láthatjuk:



9. ábra. Mérőkörnyezet blokkdiagramja [saját forrás]

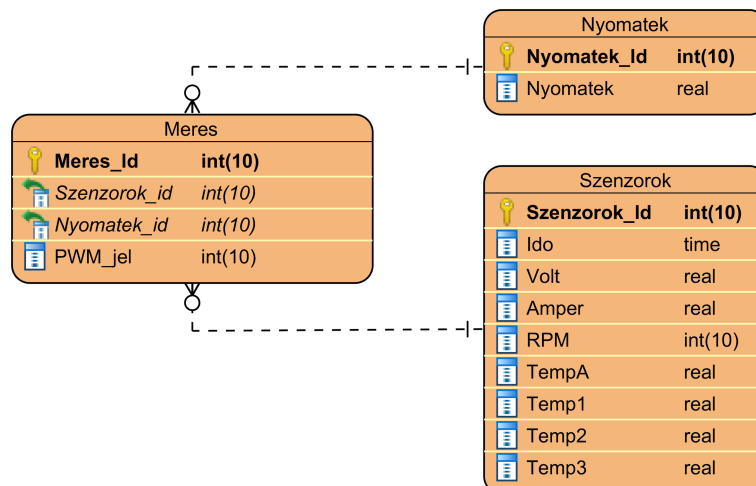
Fehér téglalapokkal jelöltem a szenzorokat és sárgával a méréshez felhasznált komponenseket. Mivel a *RDU* rendelkezik belső memóriával a mért adatok tárolásához és szenzorokat is tartalmaz, ezért sárga-fehér téglalappal ábrázoltam. A nyilak jelentése a következő:

- fekete szaggatott nyíl jelenti a mérést
- fekete nyíl mutatja az egy oldalú kommunikációt
- kék nyíl mutatja a kétoldalú kommunikációt
- piros vonallal jelöltem az áram ellátást

A következő részben részletesen ismertetem a mérőkörnyezet komponenseinek és szenzorainak tulajdonságait.

5.1. Szenzorok

Az adatok fogadására két programot használtam. A *Hyperion Emeter II Suite* program segítségével kommunikáltam az *RDU*-val. Ezen keresztül kaptam meg a feszültség, áramerősség, fordulatszám és hőmérséklet szenzorok adatait [7]. Az így kapott eredményeket lementettem és betöltöttem a saját programomba, ahol a nyomás érzékelőtől kapott adatokkal kiegészítettem és adatbázisba mentettem (10 ábra).



10. ábra. Mérés adatbázis tábla [Saját forrás]

A szenzorok által mért adatokat három táblázatba mentettem le. A mérés táblában tároltam a motorvezérlőnek küldött *PWM* jelet. Ehhez a táblához csatlakoztattam a nyomatek és szenzorok tábláit. A mérés táblában a nyomatek adatok szerepelnek, míg a szenzorok táblában az *RDU*-tól kapott érzékelők értékei. A különböző kommunikációs sebesség (mérleg: *9600bit/s*, *RDU*: *115200bit/s*), valamint eltérő programok által vezéreltek (mérleg: saját fejlesztésű program, *RDU*: *Hyperion Emeter v2*), ezért a kapott adatokat különböző táblázatokban tároltam.

5.1.1. Remote Data Unit (RDU)

Azért választottam ezt:

- mert széles mérési tartománnyal rendelkezik(7. táblázat)
- kielégítő mérési pontossággal mér (7. táblázat)
- jó mintavételezési sebesség (A méréseknél a maximális mintavételezési sebességet, vagyis másodpercenkénti 8-at használtam³)[7]
- *USB* proton keresztül csatlakoztatható a számítógéphez ,így valós idejű tesztekre alkalmas
- csatlakozik hozzá a fordulatszám mérő szenzor
- csatlakozik hozzá a hőmérséklet szenzor
- egységes felületen kezelhettem az általa mért és hozzá csatlakoztatott szenzorok adatait

A működése 9. ábrán látható.

³ Az RDU belső memóriája 5000mérést tud tárolni így drónra szerelve repülés közbeni adatgyűjtésre is lehetőség van. A mintavételezési gyakoriságát be lehet állítani akár 8másodpercenkénti mérésre is, így több mint 11órán keresztül lehet monitorozni az adott rendszert [7].

Az RDU specifikációja:

Maximális bemeneti feszültség	70V
Maximális rövid idejű (5 másodperc) áramerősség	300A
Maximális rövid idejű (30 másodperc) áramerősség	150A
Belső ellenállás	0,0002Ω
Belső felbontás V	0,001V
Belső felbontás A	0,04A
Analog<>Digitális átalakítás	16bit

7. táblázat. RDU specifikációja [7]

Ezekből kiderült: feszültség (0-70V) és áramerősség (0-300A) szempontjából széles tartománnyal rendelkezik, mely tartományok bőven elegendőek voltak a mérések elvégzéséhez. A méréseket 12-12.61V és 0-13A terheléssel végeztem. Kis belső ellenállással rendelkezik (0,0002Ohm), így az áramkörre eső ellenállás elhanyagolható a mérések pontosságára nézve. A mérési felbontása 1mV és 40mA, ezért maximálisan 40mW-os mérési hiba számítható (a mért teljesítmények 0-154W között mozogtak).

Az RDU-nak további előnye, rendelkezik belső memóriával, ezért számítógép kapcsolat nélkül is képes az adatokat mérni. Így a későbbiekben méréseket tudok végezni a drón repülése közben is.

5.1.2. Fordulatszámérő szenzor

A fordulatszámérő szenzort a motor és az Electronic Speed Control (továbbiakban ESC, magyarul elektronikus sebesség szabályozó) közé csatlakoztattam. Ezzel mérni tudtam az ESC által vezérelt fordulatszámot. Azért fontos a fordulatszámérő szenzor, mert segítségével meghatározom a propeller tesztelésénél az egyes fordulatszámonkénti felépő nyomatékot. A mért adatokat az RDU-nak küldte el (9. ábra). Specifikációja a 8. táblázatban látható:

Fordulatszámérő szenzor, maximális olvasható fordulatszám	65,000RPM
Fordulatszámérő szenzor felbontás	17rpm (14mag. motor)

8. táblázat. Fordulatszámérő szenzor specifikációja [7]

A 65000RPM azt jelenti, hogy egy perc alatt 65000 fordulatot tud érzékelni a fordulatszámérő szenzor. A tesztjeim során mérhető elméleti maximális fordulatszám az 289800 fordulat/perc, így a mérési tartománya a mérés szempontjából elegendő. A 17rpm-es fordulatszám pontosság elfogadható, mert a motor fordulatszáma 3000RPM-289800RPM között mozgott, így ez 0,5%-os pontosságnak felel meg.

5.1.3. Hőmérséklet szenzorok

A hőmérséklet szenzorokat az akkumulátorra, motorra és az *ESC*-re helyeztem. Így időben megelőzhettem a tesztelés leállításával a túlzott felmelegedését és az eszközök túlmelegedéséből adódó károsodását. Leírása Ezt a 9. táblázatban található: A hőmérséklet szenzor

Hőmérséklet szenzor felbontás	0,1C°
Hőmérséklet szenzor pontossága	1%

9. táblázat. Hőmérséklet szenzor felbontás [7]

pontossága 0,1C°, melynél számomra elegendő volt az 1C°-os pontosság. A tesztet 20C°fokos teremben végeztem.

5.1.4. Mérleg

Ezzel mértem a propeller által generált nyomatékot. A mérleg kiválasztásánál három fontos szempontom volt:

- gramm pontosságú mérés
- számítógéphez való csatlakoztathatóság
- minimum 2kg-os mérési tartomány

Az általam kiválasztott mérleg *RS232* soros porttal rendelkezett, melyet egy *USB* adapterrel csatlakoztattam a számítógéphez. Az adatok fogadásához saját programot fejlesztettem aminek segítségével, a 10. ábrán látható adatbázis táblában tároltam az adatait. A mérleg specifikációja 10. táblázatban található:

Mérési pontossága	0,1 gramm
Mérési tartománya	0 – 6000 gramm
Számítógépes kommunikáció	<i>RS232</i> soros port

10. táblázat. Mérleg specifikációja [1]

Ahogy a 10. táblázatban jól látható a *gramm* pontosság eléréséhez a *milligramm* pontosságú mérleg megfelelő. A 0-6000 grammig tartó mérési tartomány bőven elegendő volt a méréséhez, mert 0-390 grammig mértem. Soros porton csatlakoztattam a számítógéphez és a saját fejlesztésű programmal dolgoztam fel a mérlegtől kapott adatokat.

5.2. Komponensek

A "Komponensek" bemutatását az energiaellátásban szereplőkkel kezdem, melyet (9. ábrán) piros vonallal kötöttem össze. Ezeknek közös jellemzője a működési feszültség, melyet S számmal határoznak meg, az S számokhoz kapcsolódó feszültség adatokat a (11. táblázatban) ismertetem.

3,7 volt	1 cella x 3,7 volt ($1S$)
7,4 volt	2 cella x 3,7 volt ($2S$)
11,1 volt	3 cella x 3,7 volt ($3S$)
14,8 volt	4 cella x 3,7 volt ($4S$)
18,5 volt	5 cella x 3,7 volt ($5S$)
22,2 volt	6 cella x 3,7 volt ($6S$)
29,6 volt	8 cella x 3,7 volt ($8S$)
37,0 volt	10 cella x 3,7 volt ($10S$)
44,4 volt	12 cella x 3,7 volt ($12S$)

11. táblázat. *LiPo* akkumulátorok cellafeszültség adatai [15]

Az akkumulátorra nézve az S szám adja meg, hogy hány cellából áll, valamint az *ESC*-nél és a motornál a működési feszültség tartománytát határozza meg: (Pl.: $2S$ - $3S$ jelentése: $7,4 - 12,6V$ között működik)⁴. A használt "komponensek" közé tartozik még az állvány és a repülés vezérlő. Az állvány a mérlegre rögzíti a motort, míg a repülési vezérlő a számítógép és motor vezérlő között helyezkedik el.

5.2.1. Akkumulátor

Drónoknál *LiPo* akkkumulátorokat használunk (12. táblázat), mert jelenleg ezen akkkumulátoroknak a legjobb a súly-kapacitás eloszlásuk [15]. Továbbá tesztelés szempontjából fontos:

- S szám, mely a tesztelési környezet feszültségtartományát határozza meg,
- kapacitása mellyel a tárolt energia maximális értéke olvasható
- minimum 2kg-os mérési tartomány C szám, amiből a merítési gyorsasága, más szóval terhelhetősége van megadva.

A (12. táblázatban) láthatjuk az akkumulátorok fejlődését és a különböző típusúak megjelenési időpontját. Jól látható, a *LiPo* akkumulátorok előnyei, amelyek a legrövidebb idő alatt tudják leadni a teljesítményüket. A drónok működéséhez szükséges energiát, csak ezek a típusok képesek biztosítani.

C szám: Az állandó kisütő áramot adja meg, mellyel az akkumulátor hosszú ideig terhelhető. Akkumulátorunk gyári adata $20C$ melyet összeszorozva a feltüntetett minimális kapacitással, megkapjuk azt a feszültséget, mellyel az akkumulátorunkat folyamatosan

⁴ Az első számnál az akkumulátor minimális töltöttségi szintje szerepel, mely feszültségen még nem károsodik, míg második a maximális töltést jelenti, ez cellánként $4,2V$ -ot jelent [15].

	NiCd	NiMh	Li-Ion	LiFe	LiPo
Energia sűrűség (Wh/kg)	80	120	160	105	130
Max teljesítménytényező (Wh/kg)	1600	1800	320	3150	5850
Maximális élettartam	1000	300	500	2000	300
Önkisülés havonta	<20%	<30%	<10%	<10%	<10%
Terhelehtőség	20C	15C	2C	30C	45C
Cella feszültség (V)	1,25	1,15	4,6	3,3	3,7
Forgalomba hozatal éve	1950	1990	1991	2008	1999

12. táblázat. Elterjedt akkumulátor típusok [12]

terhelhetjük. Ez a mi esetünkbe $C\ 20 * 1500mA = 30A$ lett.

Ha a gyártó két számot ad meg (Pl.: $20C - 30C$), a második szám a rövid idejű terhelhetőséget jelenti, általában $10 - 15sec$. Ezzel a csúcs terhelést adják meg, amellyel még nem károsodik az akkumulátor. A mi példánkkal számolva ez: $30 * 1500mA = 45A$.

Minimális kapacitás: Az akkumulátorban tárolható minimális elektromos áram mennyiségére utal. Az egysége a milliamperóra, rövidítése: mAh. A teszteknel 1500mAh akkumulátort használtam. Ez a kapacitás bőven elegendő volt a tesztelés időtartalmára, mivel a tesztek nem tartottak 1-2percnél tovább. Ha a C-számot elosztjuk 60-nal, akkor megkapjuk a legrövidebb kisütési időt, mely meghatározza a drónunk minimális repülési idejét.: $60/20C = 3perc$

Cellaszám: Ez azt jelenti, hogy hány cellából épül fel az akkumulátorunk, melyet az S szám ad meg. A *LiPo* akkumulátorok cellánkénti maximális feszültsége $4,2V$. Így a mi akkumulátorunk $11,1V$ -on üzemel. A *LiPo* akkumulátorok nagyon kockázatos $3,5$ volt alá meríteni károsodás nélkül. Túltöltésnél vagy merítésnél az akkumulátor felpúposodik és veszít a tárolható kapacitásából. [15]

Akumulátor súlya: Ezt *gramm*-ban adják meg, a mi esetünkben $141g$.

Balancer csatlakozó: Ezen keresztül töltjük az akkumulátorokat. Minden egyes cellának van külön kivezetése a töltő csatlakozásához. Erre azért van szükség, mert merítéskor a cellák nem egyenletesen sülnék ki. A balancer csatlakozón keresztül így mindegyiket külön, megfelelő mértékben tudjuk töltetni. Csatlakozó típusa: JST-XH

Kisütő csatlakozó: Ezen merítjük az akkumulátort. Az *XT60*-as csatlakozót használok, melynek névleges maximális áramerőssége 60 Amper lehet. Mivel a teszteknel maximális terhelés nem haladja meg a $30A$, így teljesítménye bőven elegendő lesz. Ebből a csatlakozó típusból kapható *XT30* (*maximisterhelse* : $30A$), *XT60*($60A$), *XT90*($90A$).

5.2.2. Motor

A mérés során használt motor egy Eachine BG1806 2300KV Brushless Motor 2-3S. A legfontosabb motor paramétereket az alábbiakban ismertetem:

Motor	
 Motor_Id	integer(10)
 Neve	varchar(255)
 Kv	integer(10)
 Min_S	integer(10)
 Max_S	integer(10)

11. ábra. Adatbázis: Motor tábla [Saját forrás]

S szám: A működési tartományát írja le, lásd (11.táblázat).

KV és maximális RPM: A voltonkénti maximális fordulatszámot jelenti, vagyis egy volt hatására hányat fordulhat a motor percenként.

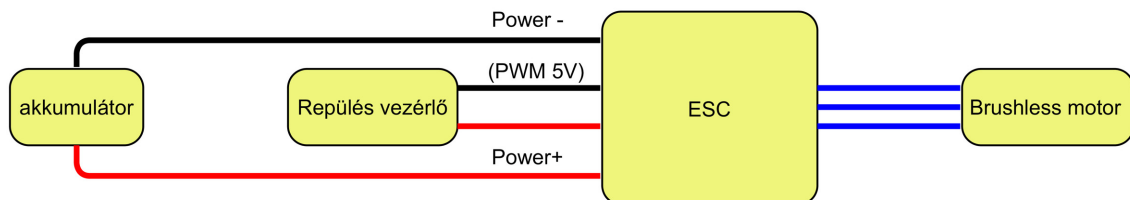
A 2300KV motornál ezt összeszorozzuk a működési feszültséggel, akkor az üresjárat maximális fordulatszámot Pl.: $2300 * 11,1 = 25530$ -at jelent.

Brushless Motor: Ez a kefe nélküli motort jelenti, melyek nagyobb nyomatékkal rendelkeznek a kefes társaikhoz képest. A modellezésben szinte csak ezeket a fajtákat találjuk, mert sokkal megbízhatóbbak és strapabíróbbak is a kefével rendelkező társaiknál.

Súly: Ezt gramm-ban adják meg. Az érték azért különösen fontos a drónok szempontjából, mert ahány légsavart használunk, annyi motorra van szükségünk és a drón tömegének egyik meghatározó részét a motorok súlya teszik ki.

5.2.3. Electronic Speed Control (ESC):

Feladata a repülésvezérlőtől kapott PWM-jel(Pulse Width Modulation, jelentése impulzusszélességmoduláció) átalakítása a motor fordulatszámára. A PWM-nek minél magasabb a kitöltési tényezője, annál magasabb fordulatszámot jelent a motornak. A (12. ábrán) látható a működése.



12. ábra. Az ESC bekötése [saját forrás]

A teszteléskor a *EMAX Nano Series Mini 12A ESC*-ét használtam. Melynek adatait az adatbázisban az 13. ábra szerint tároltam. Két fontos paraméterét emelem ki:

ESC	
 ESC_Id	integer(10)
 Neve	varchar(255)
 Amper	integer(10)
 Min_S	integer(10)
 Max_S	integer(10)

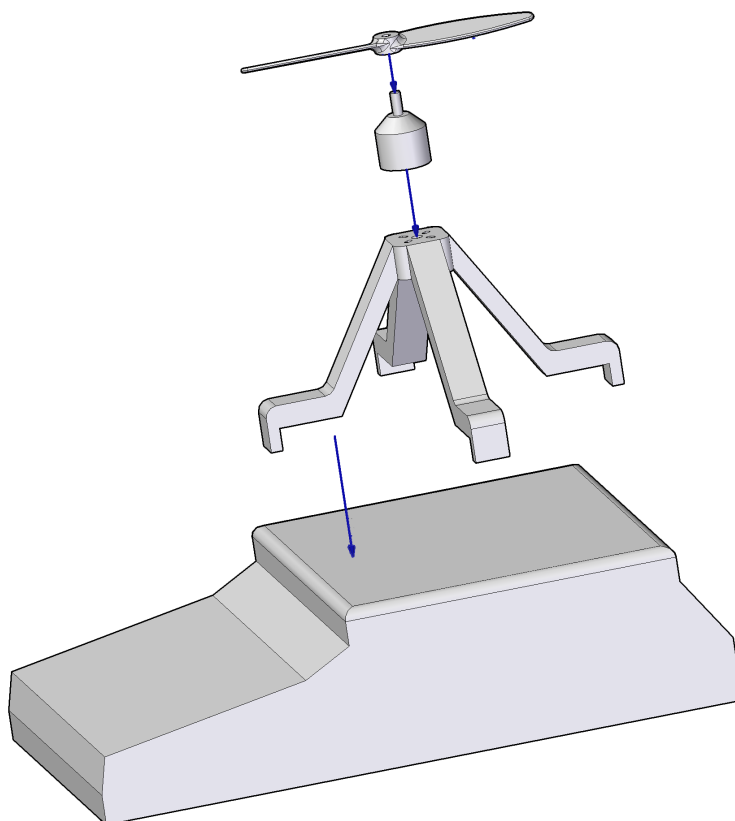
13. ábra. Adatbázis: ESC tábla [Saját forrás]

Maximális terelhetőség: Amperben adják meg, esetünkbe ez 12A. Nagyon fontos, hogy ne méretezzük alul, mert abban az esetben leég túlterhelés hatására, ezért a motor által felvehető maximális áramerősségnél nagyobbat válasszunk. Az általam használt modellnél megadták a rövid idejű maximális terhelhetőséget is, ez 15 Amper 10 másodpercig[6].

Firmware frissítés: Az ESC-ek egy részén a Firmware felülírható. Ennek a segítségével jobban szinkronizálható a motorral. Egy hagyományos ESC-ben a frissítési frekvencia 50Hz, melyet firmware frissítéssel akár 400Hz-re is lehet emelni.

5.2.4. Állvány

A pontos mérésekhez szükség volt egy saját tervezésű állványra, melyre a motort fel lehet fogatni és stabilan áll a mérlegen. Ennek a terve a 14. ábrán látható.



14. ábra. Mérőkörnyezet felpítése [saját forrás]

A CAD program által generált *.stl* fájlt később be kell tölteni egy gcode generáló programba, mivel közvetlenül az *stl* fájlt megnyitása nem működött. Erre a megoldás a *Slic3r 1.27v* program[19].

Nyomatás során számos hibába ütköztünk. Ezek közül nagyon fontos, hogy a 3D nyomtató kuplungja kilazulhat, a fűtésre is oda kell figyelni, valamint nyomtatás közben nem szabad csatlakoztatni olyan eszközt mely virtuális *COM*-ot hoz létre. Az én estemben ez kikapcsolta a nyomtatás közben a nyomtatófej melegítését, így a nyomtatás megszakadt.

5.2.5. Naze32 repülés vezérlő

A motor vezérlőkhöz csatlakozó komponens, amely létrehozza a motorvezérlők irányításához szükséges *PWM* jelet. Drón repülése közben a távirányító jele és drón szenzorainak jelének fúziójából határozza meg a motorok fordulatszámát. Tartalmaz továbbá egy *micro USB* portot melyen keresztül csatlakoztatni lehet a számítógéphez. Számítógépen a *CleanFlight 1.2.4v* programot használtam, mely kompatibilis a legtöbb repülés vezérlővel[4]. A feladatai a következők:

- rajta keresztül frissíthető a repülésvezérlő szoftvere
- a távirányító jele tesztelhető és beállítható a repülésvezérlőben
- motorok működése tesztelhető
- szenzorok működése kalibrálható

A motorok működésének paneljét használtam a tesztek során a motorvezérlő irányításához.

6. Tesztkörnyezet programozása

Azon programok összessége melyeket a propeller teszteléséhez használok fel. A tesztkörnyezet működtetéséhez a következő programokat használtam fel:

- *Hyperion Emeter v2*, szenzorok adatainak mentése
- *Cleanflight v1.2.5*, a repülésvezérlő irányítása
- *KeyPresser*, az irányítás időzítése
- saját fejlesztésű program a mérleg vezérléséhez, kapott adatok kiszámításához és azok adatbázisban történő tárolása.

6.1. Tesztelés folyamata

A vezérléshez a PWM szignált beállítását használtam. Értéke *1000-2000* közötti értéket vehet fel. A tesztelések előtt megvizsgáltam a motor minimális és maximális *PWM* szignálját:

- *1124* volt a legkisebb érték mikor a propeller forogni kezdett
- *1820*as értéknél magasabb számon már a propeller fordulatszáma nem változott, ezt az értéket választottam a propeller maximális

nyomatéknak vizsgálatához. Tesztelésnél a propellereket 4tartományban vizsgáltam.:

- *25grammos* nyomatéknál,
- *50grammos* nyomatéknál,
- *100grammos* nyomatéknál,
- maximális nyomatéknál.

Melyeket a következő *PWM* jel beállításával mértem ?? táblázat:

propellere típusa	0gramm	25gramm	50gramm	100gramm	maximális nyomaték
2t 3030 dys	1140	1314	1587	-	1820
2t 4045 dal	1140	1290	1465	-	1820
2t 5030 gemfan	1140	1227	1307	1492	1820
3t 3045 dal	1140	1340	1636	-	1820
3t 4045 dal	1140	1300	1475	-	1820
3t 5030 gemfan	1140	1241	1333	1556	1820
3t 5030 nyomtatott	1140	1213	1298	1463	1820
4t 5040 gemfan	1140	1208	1276	1409	1820
6t 5040 gemfan	1140	1205	1271	1393	1820

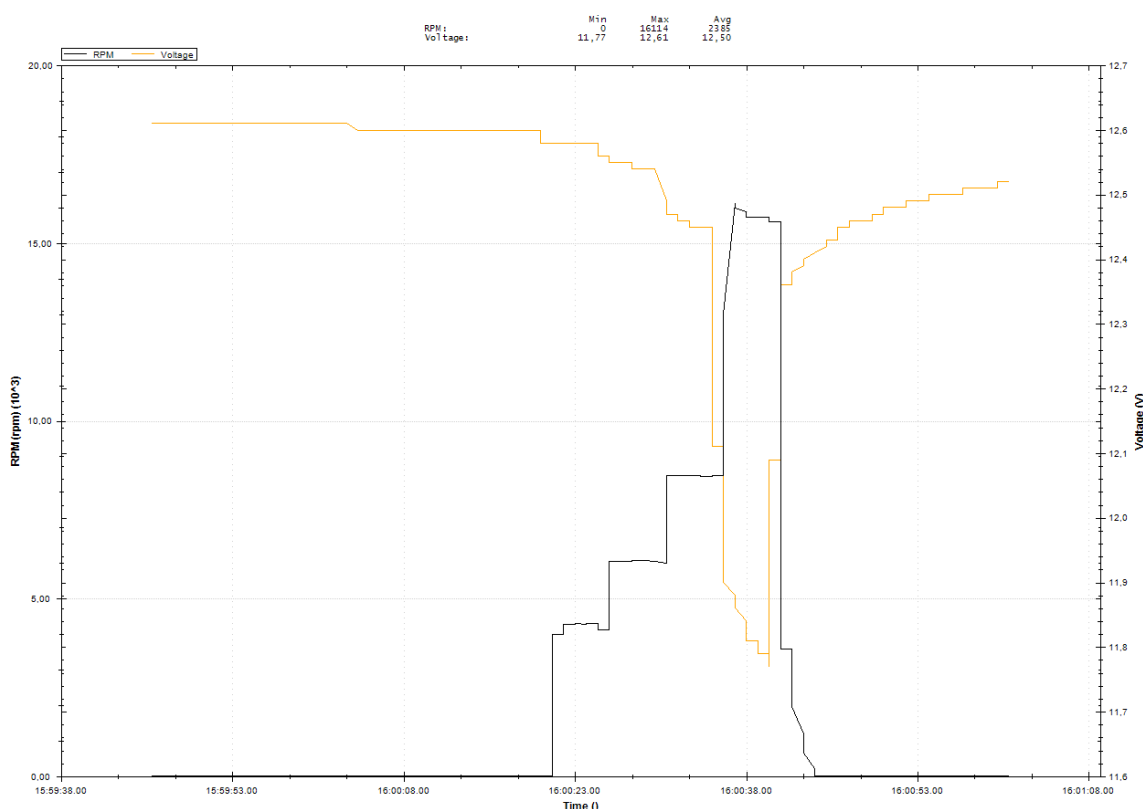
13. táblázat. PWM jel beállítások [Saját forrás]

A 13 táblázatban jól megfigyelhető a *PWM* jel meredeksége, amely összefügg a motor terhelésével. Értéke a terhelés függvényében változik, kisebb terhelésnél kisebb értéket, nagyobb terhelésnél magasabb értéket kell beállítani.

Minden tesztelést azonos feszültségen kellett kezdeni, az akkumulátor merülése miatt. Ezért a tesztelés megkezdése előtt *12,6Voltra* töltöttem fel az akkumulátort (ez a *3S-es* maximális feszültsége). A teszteléseket ugyanazzal az akkumulátorral végeztem, mert azok belső ellenállása különböző⁵.

Továbbá szükség volt a mérleg tárazására, vagyis nullára állításra minden mérés előtt a legjobb pontosság eléréséhez.

A (15. ábra) mutatja be a mérés alatti feszültség (y másodlagos tengely) és fordulatszám (y elsődleges tengely) változást az idő függvényében:



15. ábra. *6t 5040 gemfan* propeller kilencedik mérése [Saját forrás]

A (15. ábrán) látható mérést a *Hyperion Emeter v2 Suite* programmal végeztem. A (15. ábrán) jól kivehető négy lépcső, amelyek a tesztelés folyamán vizsgált tartományok voltak.

⁵ A belső ellenállás mértéke függ az akkumulátor típusától, valamint az akkumulátor öregedése folyamán ez az értéke folyamatosan növekszik.

A (16. ábra) szerint kaptam meg az adatokat a *Hyperion Emeter v2 Suite* programtól:

Volts	Amps	RPM	hh:mm:ss	TempA	Temp1	Temp2	Temp3
12,6	0,6	0	16:00:21	5,4	7,7	7,6	11,8
12,6	0,5	1971	16:00:21	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	1971	16:00:21	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	3994	16:00:21	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	3994	16:00:22	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	4251	16:00:22	5,4	7,7	7,6	11,8
12,6	0,5	4251	16:00:22	5,4	7,7	7,6	11,8
12,6	0,5	4285	16:00:22	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	4285	16:00:23	5,4	7,7	7,7	11,8
12,6	0,5	4302	16:00:23	5,4	7,7	7,6	11,7
12,6	0,5	4302	16:00:23	5,4	7,7	7,6	11,7
12,6	0,5	4285	16:00:24	5,4	7,7	7,6	11,7
12,6	0,5	4302	16:00:24	5,4	7,7	7,6	11,7
12,6	0,5	4302	16:00:24	5,4	7,7	7,6	11,7
12,6	0,5	4302	16:00:24	5,4	7,7	7,6	11,6
12,6	0,5	4302	16:00:25	5,4	7,7	7,6	11,6
12,6	0,5	4302	16:00:25	5,4	7,8	7,7	11,7
12,6	0,5	4302	16:00:25	5,4	7,8	7,7	11,7
12,6	0,9	4114	16:00:25	5,4	7,8	7,6	11,6
12,6	0,9	4114	16:00:26	5,4	7,8	7,6	11,6
12,6	1	5554	16:00:26	5,4	7,8	7,6	11,6
12,6	1	5554	16:00:26	5,4	7,8	7,6	11,6
12,6	1	6034	16:00:26	5,4	7,7	7,6	11,6
12,6	1	6034	16:00:27	5,4	7,7	7,6	11,6
12,6	1	6034	16:00:27	5,4	7,8	7,6	11,5
12,6	1	6034	16:00:27	5,4	7,8	7,6	11,5
12,6	1	6034	16:00:27	5,4	7,8	7,6	11,5
12,6	1	6034	16:00:28	5,4	7,8	7,6	11,5
12,5	1	6051	16:00:28	5,4	7,7	7,6	11,5
12,5	1	6051	16:00:28	5,4	7,7	7,6	11,5
12,5	1	6068	16:00:28	5,4	7,8	7,6	11,5
12,5	1	6068	16:00:29	5,4	7,8	7,6	11,5
12,5	1	6068	16:00:29	5,4	7,8	7,5	11,3
12,5	1	6068	16:00:29	5,4	7,8	7,5	11,3
12,5	1	6051	16:00:30	5,4	7,8	7,5	11,3

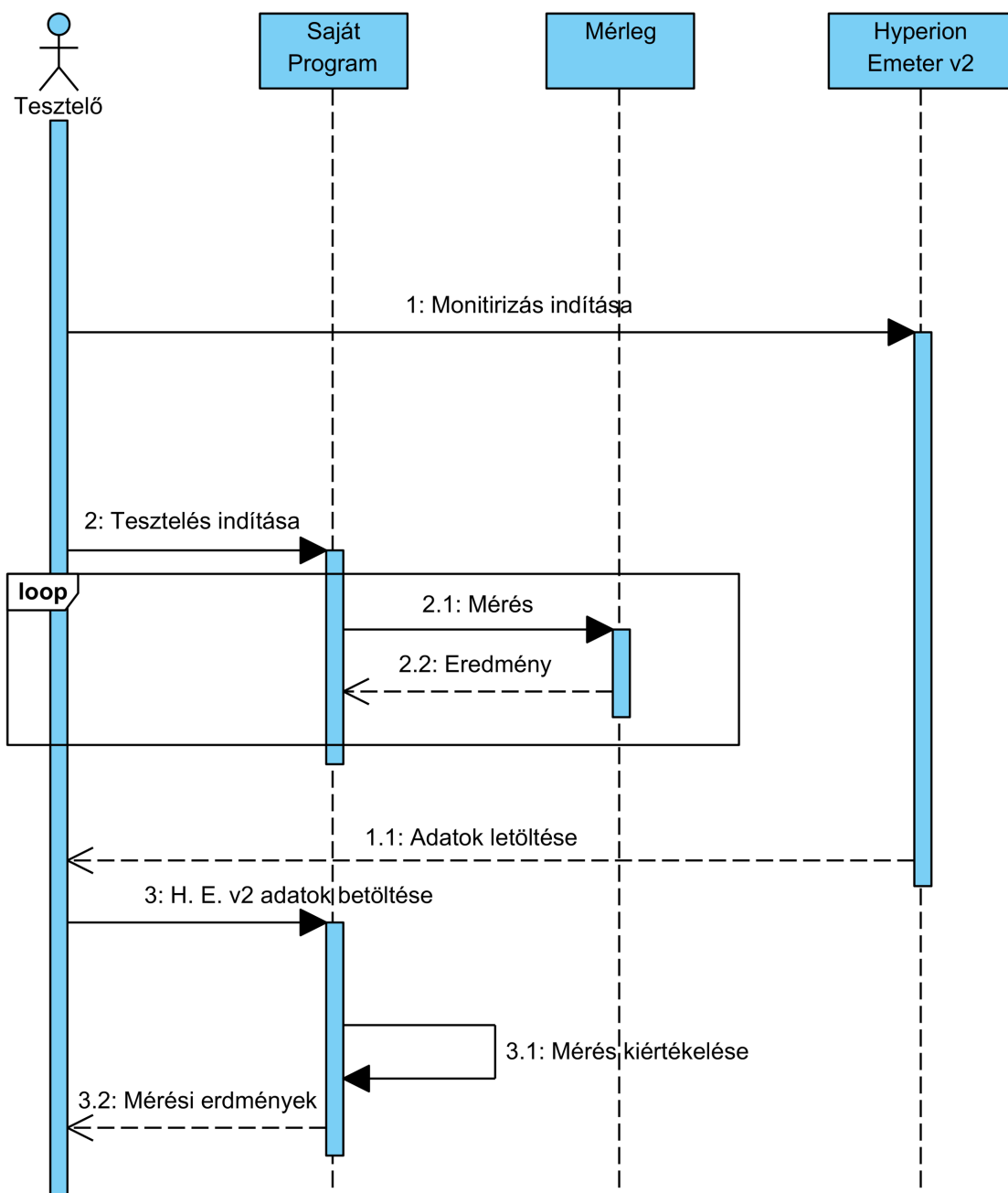
16. ábra. *Hyperion Emeter II* által gyűjtött adatok [Saját forrás]

Egy tartomány tesztelés 5másodpercig tartott. A (15. ábrán) látható a tartományok közötti átmenet is szerepet ebben az időszakban. Az átmenetek kiszűrése érdekében a tesztelt időszak 3. és 4. másodpercében kapott adatokat dolgoztam fel, melyeket sárga színnel jelöltem az (16. ábrán).

Egy tartomány mérése alatt kétszer mértem a nyomatékot a mérleggel és ennek az átlagát vette. Az így kapott adatokat tároltam és ezek alapján készítettem el a mérések értékelését. A tesztelés folyamata a 17. ábrán megtekinthető. A következő sorrend szerint végeztem a méréseket.:

- először a *Hyperion Emeter v2* programot indítottam el. Ez azért volt fontos, mert ez folyamatosan menti a tesztelés alatt a szenzorok által érzékelt adatokat.
- ezt követte a saját program indítása, mely a mérlegtől kapott adatokat tárolta.

- A propeller tesztelése alatt folyamatosan mértem a propeller által generált teljesítményt milligrammnyi pontossággal a mérleggel.
- A tesztelés leállítása után a *Hyperion Emeter v2* program által rögzített adatokat betöltöttem a saját programba.
- végezetül a tárolt adatokat adatbázisba mentettem el és grafikonon kiértékeltem. Az eredményeket a 20. és 21. ábra foglalja magában.

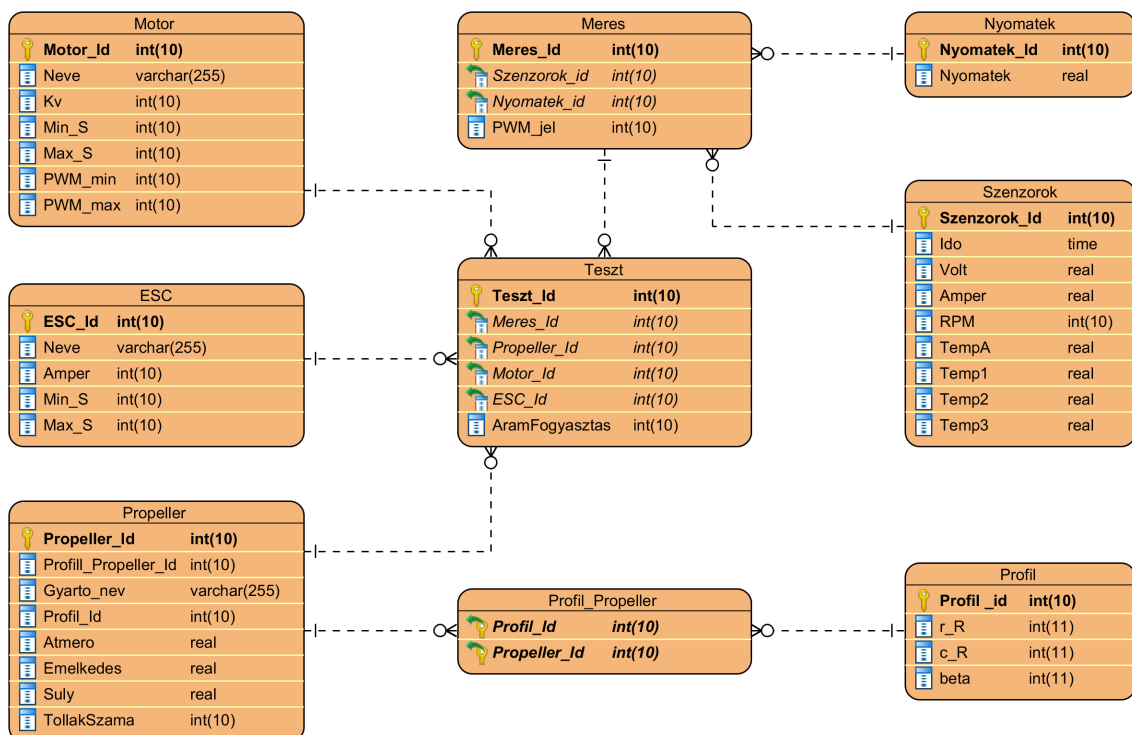


17. ábra. Mérési folyamatábra [Saját forrás]

6.2. Adatok tárolása

A tesztelés folyamán mért adatokat a 18.ábra szerint tároltam. Ezen ábrán áttekinthető a tárolt adatok szerkezete:

- a tesztelésnél felhasznált komponenseket, mint *monot*, *ESC* és *Propeller* külön táblázatban tároltam, melyek $1:N$ kapcsolatban vannak a *Teszt* táblával.
- a propeller adatai a *Propeller*, *ProfilPropeller* és *Profil* táblázatok rögzítik. Így tudom tárolni a saját fejlesztésű propellerek adatait is az adatbázisban.
- teszt során kapott dataokat a *Mérés*, *Nyomatek* és *Szenzorok* táblában tároltam. A *Szenzorok* tábla tartalmazza a *RDU* által kapott adatokat. A mérleg által küldött adatokat a *Nyomatek* táblában tároltam és a mérés során alkalmazott *PWM* jelet a *Mérés* táblázatban mentettem el.
- a *Teszt* tábla kapcsolaj össze a mért adatokat és a mérés során felhasznált komponenseket, valamint tárolja a mérés során felhasznált áram mennyiségét.



18. ábra. Mérőkönyvet Adatbázis diagram [Saját forrás]

7. Propeller Teszt

Mielőtt a mért adatokat feldolgozzuk, fontos, hogy megértsük azok összefüggését. A 19. ábra ezeket az összefüggéseket ábrázolja:

- Elektromos teljesítmény. Ez a rendszerbe bemenő teljesítmény melyet a következő képlettel számítunk ki:

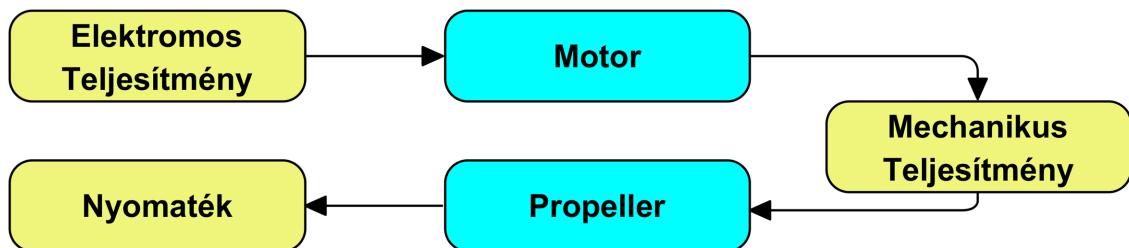
$$P = U * I \quad (12)$$

- Mechanikus teljesítmény, melyet a motor lead működése közben a propellernek:

$$Mechanikusteljesitmeny = \frac{RPM}{K_v} * I \quad (13)$$

Az U a mért feszültség *Voltban*, az I , a mért áramerősség *Amperben*.

- végül a nyomaték megmutatja a rendszerünk teljesítményét, melyet a mérlegről olvashatunk le.



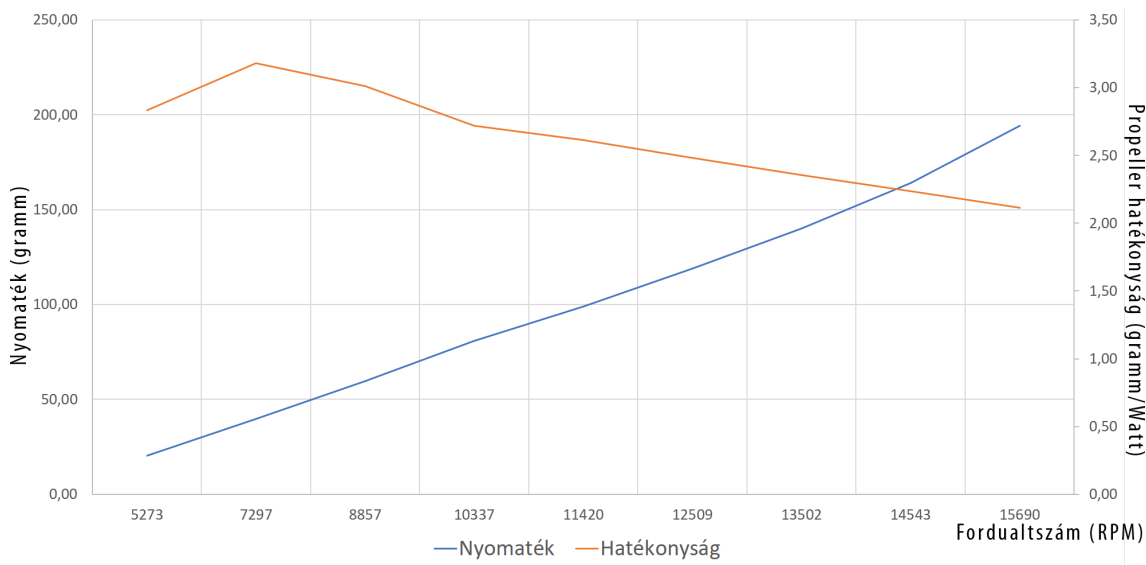
19. ábra. Mért adatok összefüggése [Saját forrás]

7.1. Propeller hatékonysága

Ezt az értéket a mechanikus teljesítményből kapjuk

$$Propellerhatekonysga = \frac{nyomatek}{mechanikushatekonysag} \quad (14)$$

A 20. ábrán feltüntetett grafikonon jól látható és megfigyelhető a fordulátváltozás, a nyomaték és a propeller hatásfokának változása.



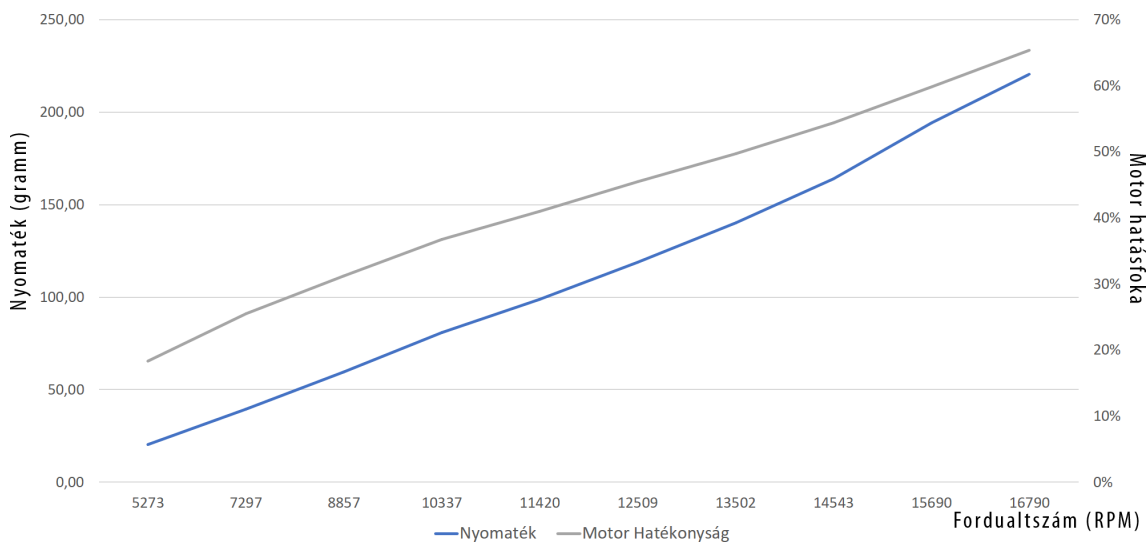
20. ábra. Dal 3t:5x45 propeller hatékonysága [Saját forrás]

7.2. Motor és Teljes hatékonyság

A Teljes hatékonyságot a következő képlettel kapjuk meg:

$$Teljeshatekonysag = \frac{nyomatek}{P} \quad (15)$$

Ez megmutatta, hogy egy watt felhasználásával hány gramm sújt állíthatunk elő.



21. ábra. Dal 3t:5x45 motor hatékonysága [Saját forrás]

A másodlagos tengelyen látható a motor hatásfokának változása. Minél jobban megközelíti a propeller fordulatszám a motor maximális fordulatszámát, annál magasabb hatásfokot érhetünk el. Levonva a következtetést arra az eredményre jutunk, hogy először kiválasztjuk a megfelelő teljesítményű propellert, majd azok között a motor hatásfoka dönti el, melyik típussal tudunk a legtöbbet repülni.

8. Eredmények

A teszteléshez a következő propellereket használtam:

Tollak száma	átmérő	emelkedés	súly	gyártó
2t	30	30	1,6	dys
2t	40	45	1,9	dal
2t	50	30	1,7	gemfan
3t	30	45	3,2	dal
3t	40	45	2,9	dal
3t	50	30	2,3	gemfan
3t	50	30	2,5	3D nyomtatóval nyomtatott
4t	50	40	4,2	gemfan
6t	50	40	6,7	gemfan

14. táblázat. Tesztelt propellerek [5] [10]

A (14. táblázatban) szereplő propellereket saját fejlesztésű tesztkörnyezetben teszteltem. Mindegyik propeller tesztelését tízszer ismételt meg, az eredmények hitelessége érdekében. A kapott adatokat a *Repeater Measures of Anova* variancia analízisnek vettem alá. Amely analízisekhez a Statistica szoftver v8. verzióját használtam[20]. Vizsgáltam, hogy ezen eredmények szignifikánsan különböznek-e egymástól. Tovább bontottam a kapott eredményeinket post-hoc statisztikai módszerrel *Tukey-HSD* teszt alkalmazásával. Ennek segítségével megtudtam állapítani pontosan, a propellerek milyen mértékben változtatták meg az egyes kondíciókat egymáshoz képest.

Az 14. táblázatban lévő propellereket a következő szignifikánsan különböző kondíciókban vizsgáltam:

- Teljes rendszer teljesítménye
- Motor hatásfoka
- Teljes rendszer hatásfoka

Melyekben megvizsgáltam, hogy az propellerek cseréje hogyan módosítja a különböző kondíciókat. A vizsgálatokat három nyomatéktartományban teszteltem:

- 25 gramm
- 50 gramm
- 100gramm

8.1. Motor hatásfoka

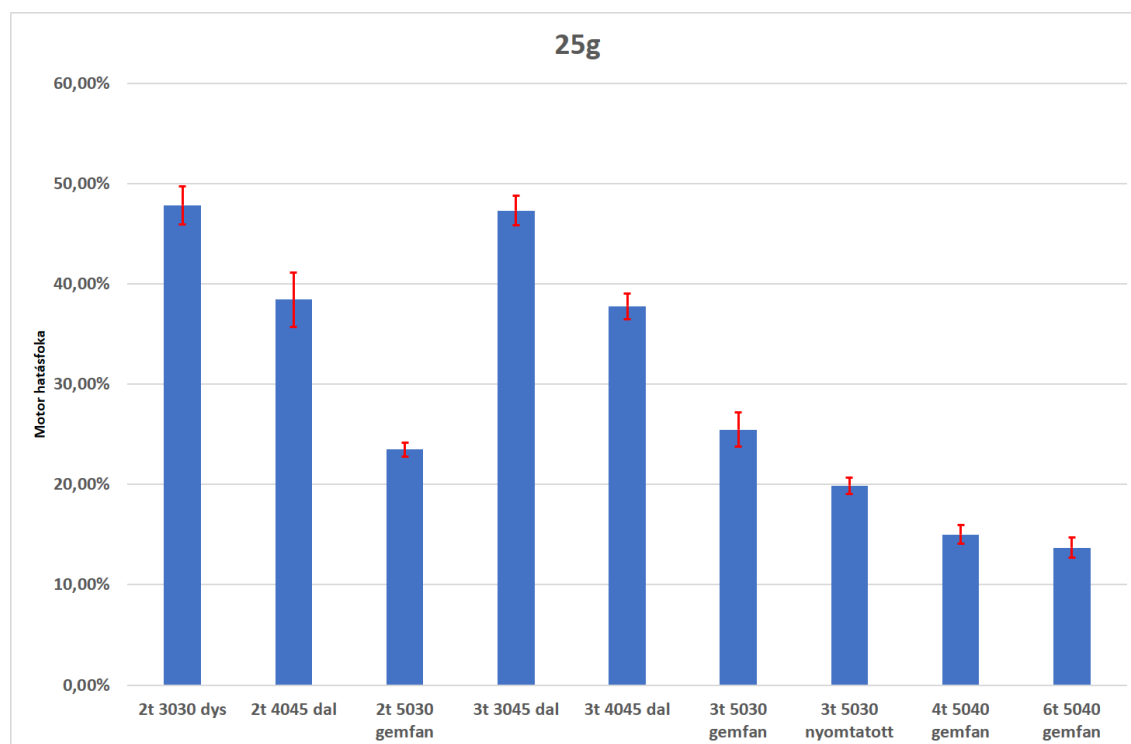
Azt vizsgáltam, hogy *25gramm* nyomaték előállítására a rendszer hány *Watt*-ot fogyaszt. A motor hatásfoka összefügg a motor fordulatszámaival. A 15. táblázatban látható a propellerek maximális fordulatszámon mért hatásfoka:

propeller	motor hatásfoka	maximális fordulatszám
2t 3030 dys	81,10%	23169,4643
3t 3045 dal	62,71%	17646,0237
2t 4045 dal	62,68%	17709,1643
3t 4045 dal	71,66%	20220,2771
2t 5030 gemfan	69,02%	19252,4871
3t 5030 gemfan	68,83%	19217,5813
3t 5030 nyomtatott	67,78%	18826,1902
4t 5040 gemfan	57,72%	15810,0916
6t 5040 gemfan	57,19%	15576,3318

15. táblázat. Motorok fordulatszám-hatásfok összefüggése [Saját forrás]

Tehát, ha meghatározzuk a szükséges teljesítményt, akkor azok a propellerek lesznek a leghatékonyabbak, amelyek a meghatározott teljesítményt tudják leadni magasabb fordulatszámon. A grafikonok y tengelyén a motor hatásfoka látható százalékban megadva. A minél nagyobb százalék jelenti a jobb értéket.

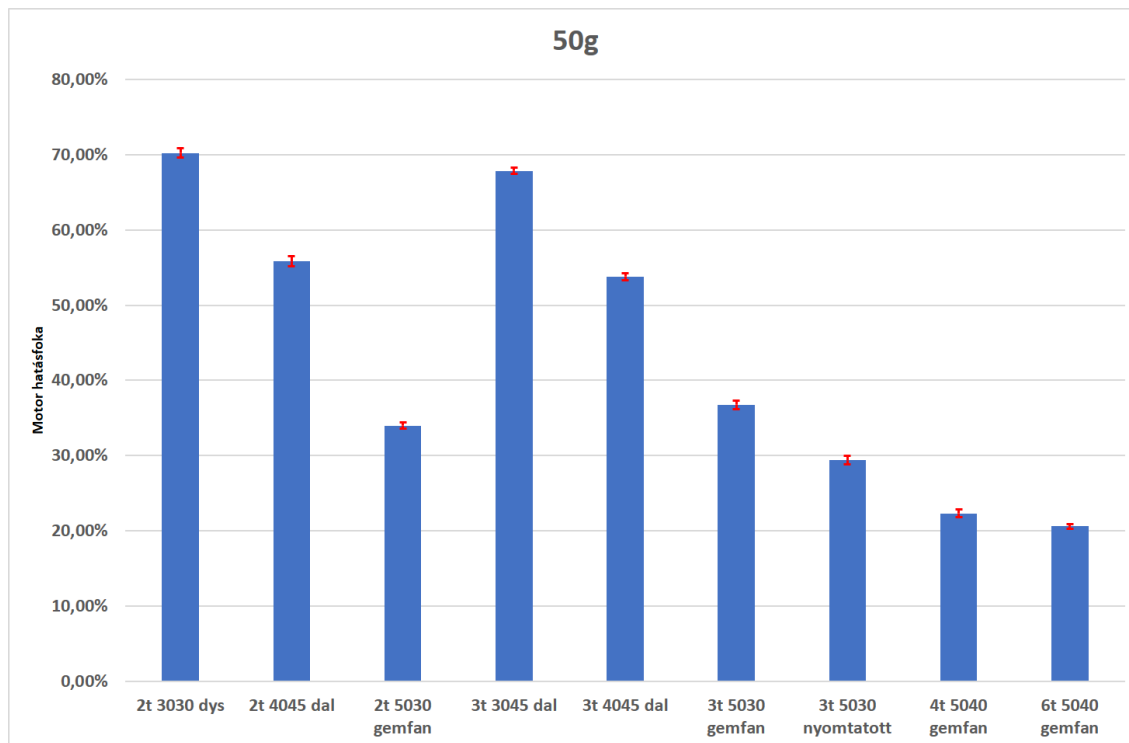
Motor hatékonyság vizsgálata *25gramm* 22. ábra:



22. ábra. Motor hatásfoka *25gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

Az 22. ábrán jól kivehető, a kisebb átmérőjű légcsavarok a motor hatásfokából nézve *3coll* és *4coll*, hatékonyabbak voltak a nagyobb átmérőknél, mert magasabb fordulatszámon tudták leadni a *25gramm*-os teljesítményt.

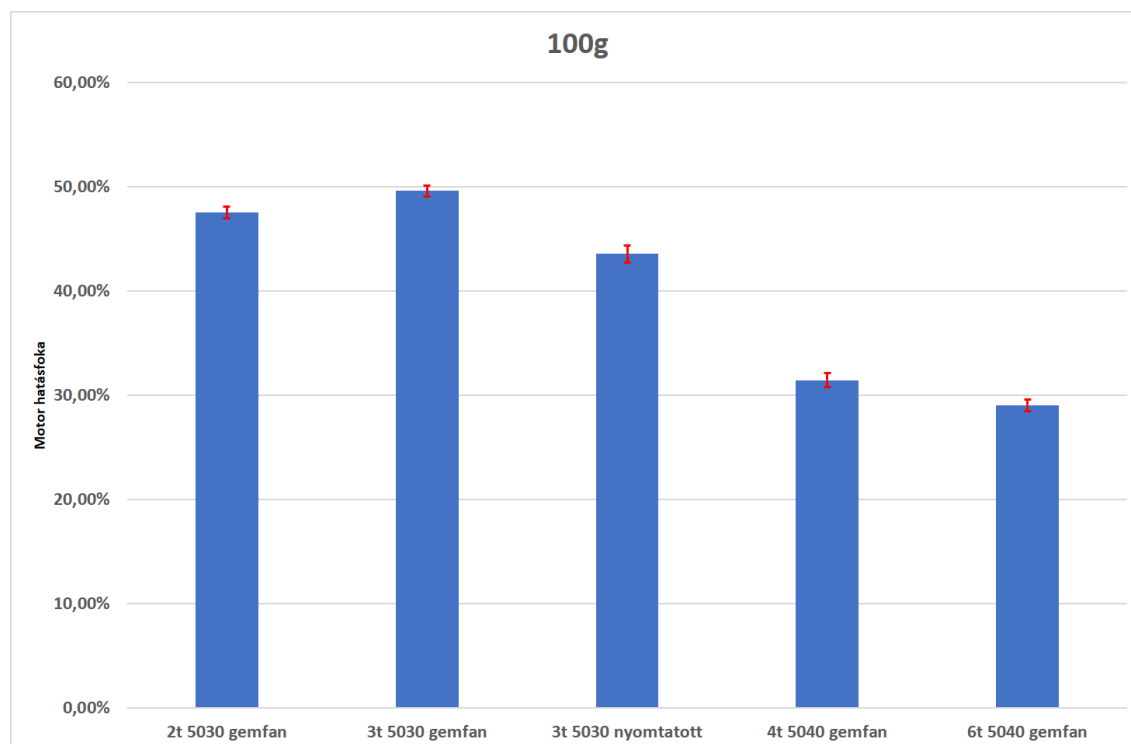
A 23. ábrán a *50grammos* nyomatéknál vizsgáltam a motor hatásfokát.



23. ábra. Motor hatásfoka *50gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

Jól látható a (23. ábrán), a *25grammon* mért nyomatékokkal összehasonlítva a motrok hatásfoka javul, ahogy növekszik a leadott nyomaték. A leghatékonyabb propeller a motor hatásfokából nézve, a *2t 3030 dys*-os, mert ez érte el a legmagasabb fordulatszámot.

A *100grammos* nyomatékon végzett tesztek 24. ábrán látható:



24. ábra. Motor hatásfoka *100gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

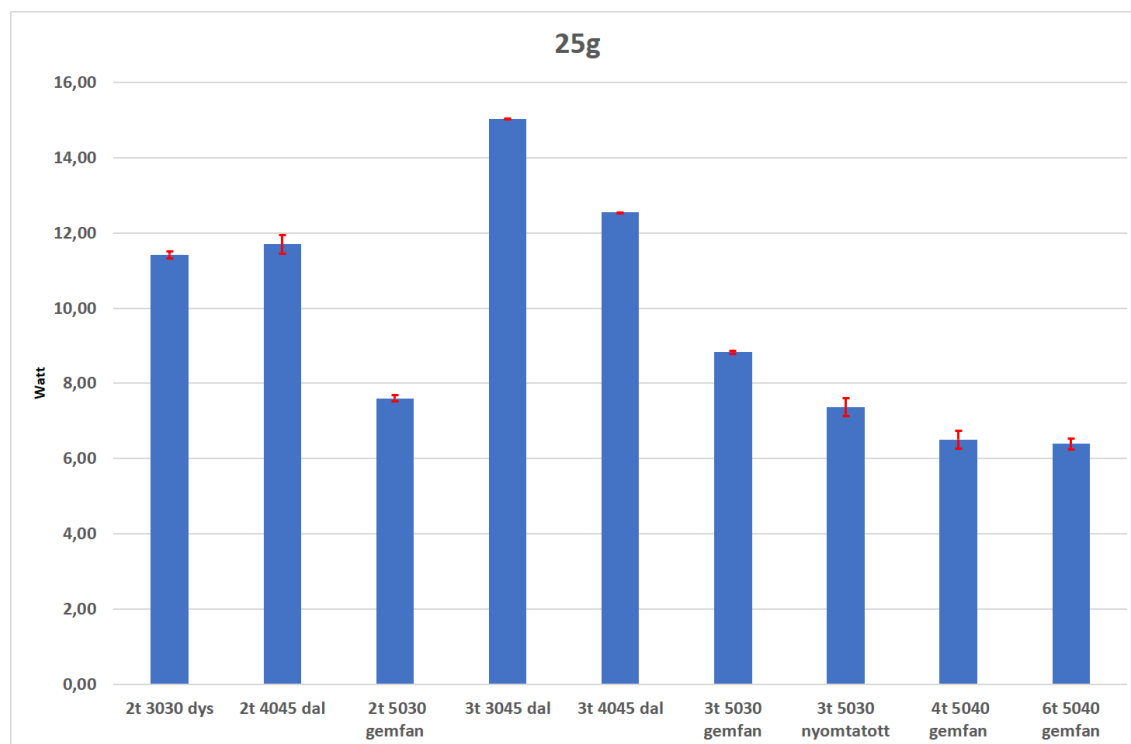
Azokat a propellereket találjuk a 24. ábrán, amelyek elérték a *100grammos* nyomatókat. Ezek közül a leghatékonyabb a *3t5030 gemfan* propeller volt.

A tesztekéből kitűnik, hogy a hatékony propeller választásához szükségünk van a drón súlyára, mert csak így tudjuk kiválasztani a megfelelő propellert mely hatékonyan tud együtt működni a motorral.

A megfelelő propeller kiválasztásához szükségünk van a drón súlyára és arra, hogy pluszban még mennyi teljesítményre van szükség. pl.: mennyire legyen a széllel szemben ellenálló. Ha a plusz teljesítményt csökkentjük, pl.: belső repüléshez, akkor elég a kisebb propeller, ami kevésbé terheli meg a motort és így több repülési időt kapunk. A kinti biztonságos repüléshez meg azt a teljesítményű propellert keressünk mely a drón tömegének 2x-eresét elbírja. Pl.: Ha drónunk *300grammos* akkor benti repüléshez a *3t4045* dal propellert ajánlom. A kinti repüléshez meg a *3t5030*-ast (quadrocopter, vagyis 4propelleres rendszer esetében). Így mind a 2fajta felhasználási környezethez kiválasztottam az optimális propellert, valamint a benti használatnál még javítottam a rendszer hatásfokán közel 2,83%-ot a propeller cserével, a jobb motor hatásfokot elérve.

8.2. Teljes rendszer teljesítménye

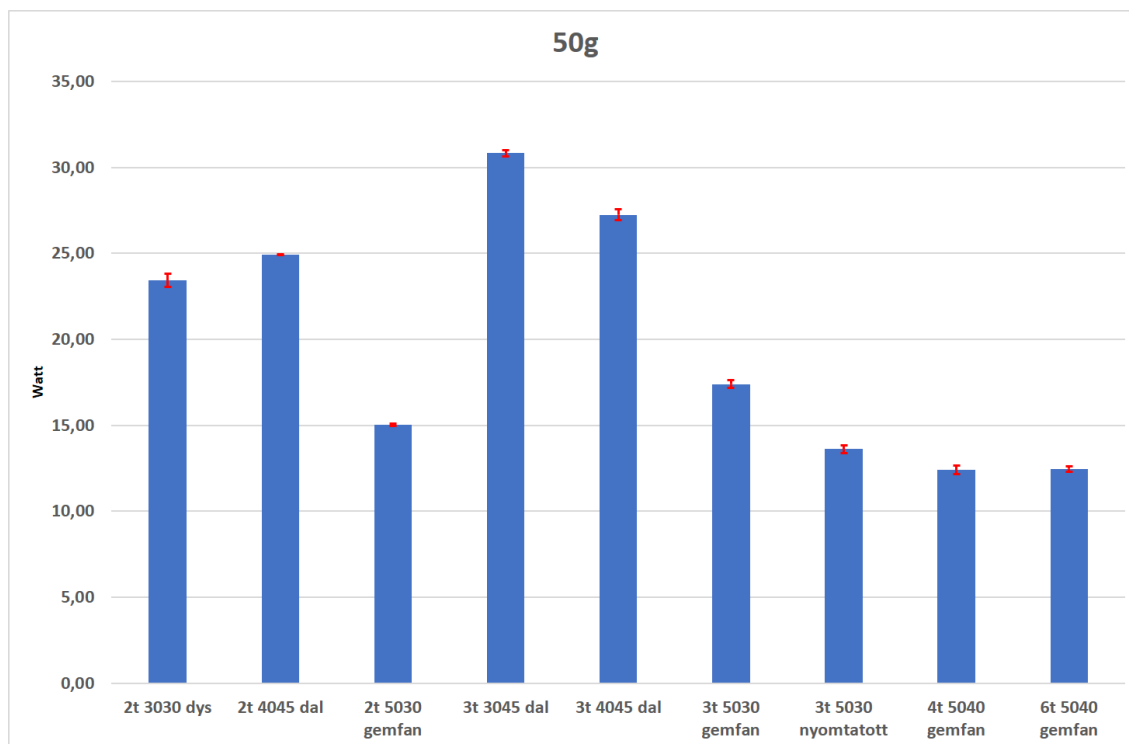
A teljes rendszer teljesítménye megmutatja, hogy egy gramm nyomaték előállításához mennyi energia került felhasználásra. Itt fontos szerepe van a propeller súlyának és merevségének. Minél nagyobb a propeller tömege, annál nehezebben tudja azt a motor hajtani. Több energiát használ fel, így a propellernél nagyobb érték olvasható le az y-on tengelyen, mely szám minél kisebb annál energiahatékonyabb a rendszer. A 25 ábrán láthatjuk a 25grammos nyomatékon mért energiafelhasználást:



25. ábra. Teljes rendszer fogyasztása 25gramm nyomatéknál [Saját forrás]

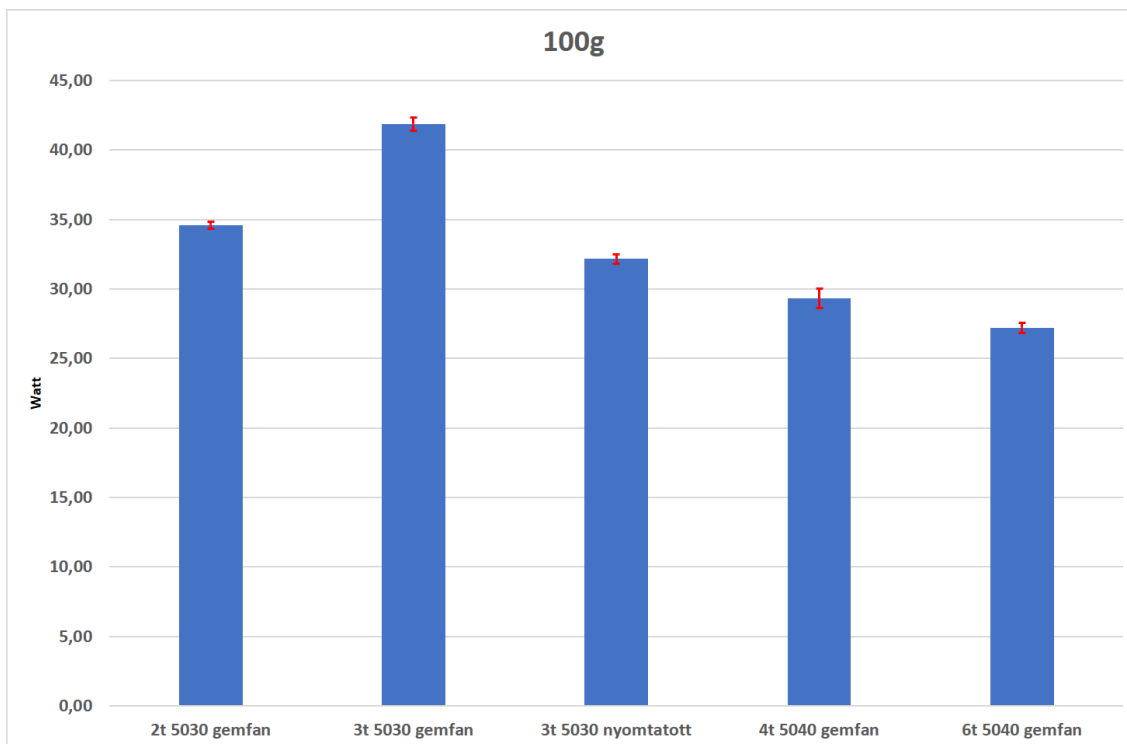
Az 25. ábrán kitűnik a 2t5030-as propeller, mely energiafelhasználás szempontjából a leghatékonyabb. Ez megfigyelhető a 14. táblázatban. Ez a propeller a második legkönnyebb tömegű propeller annak ellenére hogy az átmérője 5coll.

A 26. ábrán láthatjuk a *50grammnál* végzett teszteket és a 27. ábrán a *100grammon* végzetteket:



26. ábra. Teljes rendszer fogyasztása *50gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

A fentebb lévő ábra ábrán jól össze lehet hasonlítani a gyári *3t 5030* gemfan és a *3t 5030*-as *3D* nyomatóval készített propellert, melyek profilban, átmérőben, emelkedésben és tollak számában megegyeznek egymással. A különbség oka a *3d* nyomatáskor létrejött rétegek légellenállása. Ezen javítani lehet a propeller anyagának oldószerével. Pl.: a *ABS* műanyag oldószer az acetone. Amennyiben az így készült propellereket acetone gőzben kezeljük, azok felülete simábbá tehető, így kisebb légellenállás kapható[2].



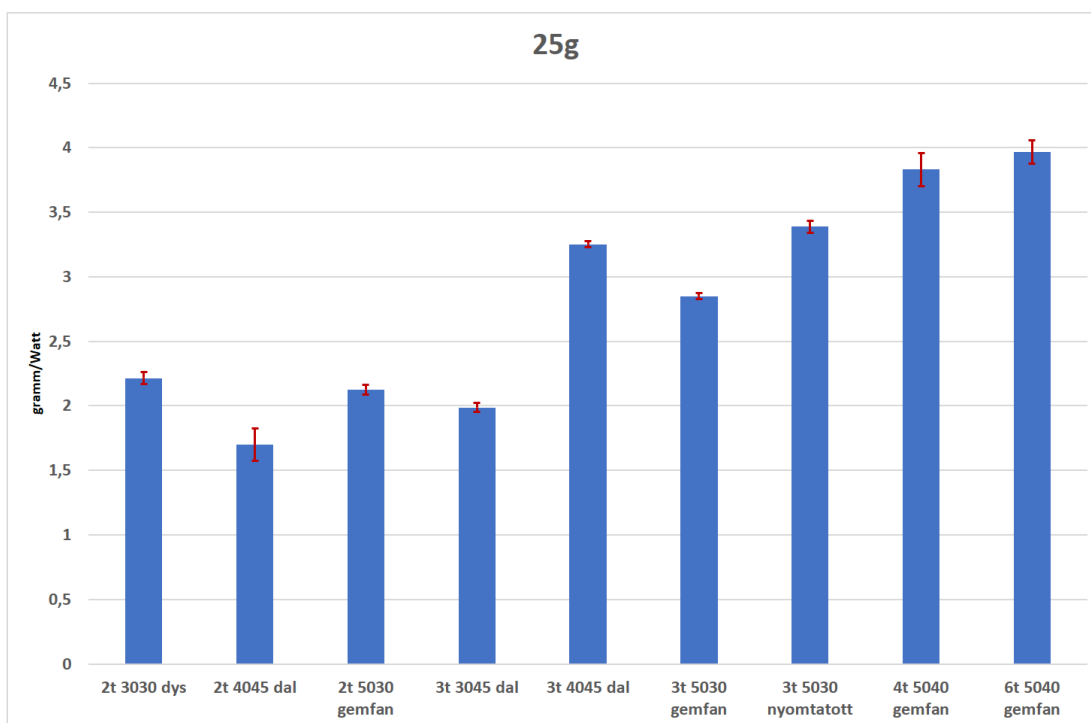
27. ábra. Teljes rendszer fogyasztása *100gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

A 27. ábrán látható, hogy a legjobb energiahatékonyságot a 4 és 5 tollú propellerek érték el. A tesztelésnél a propellerek átmérője egységesen *5coll* volt.

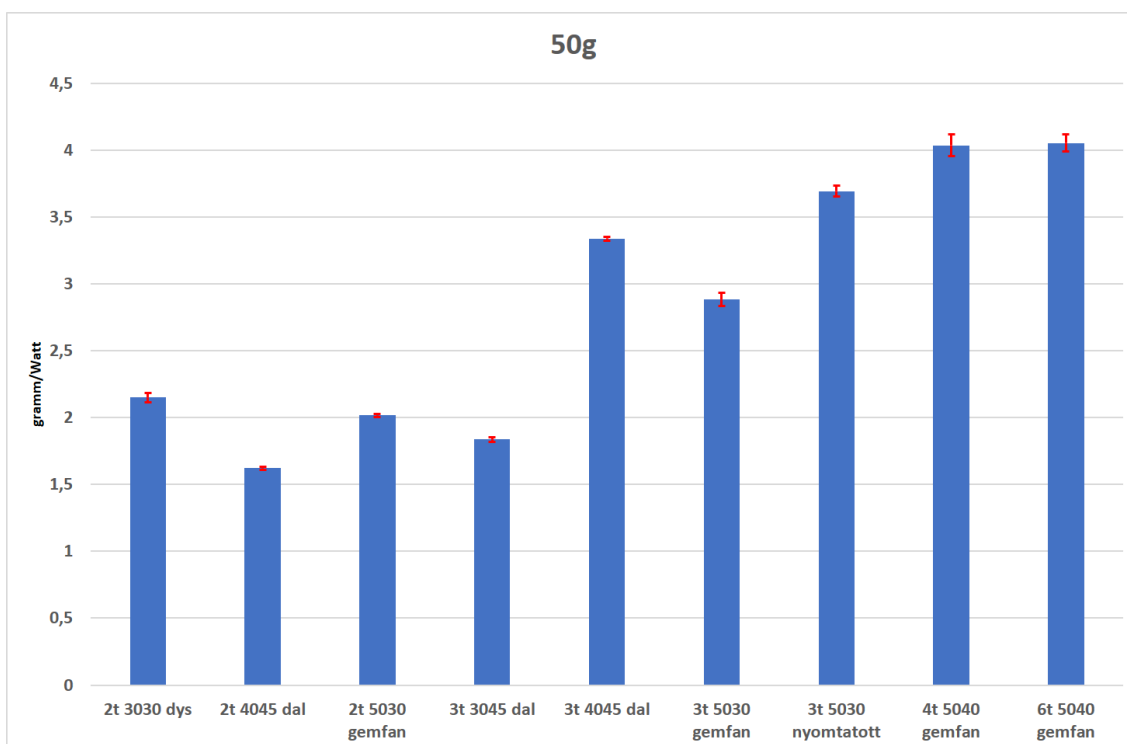
8.3. Teljes rendszer hatásfoka

A teljes rendszer hatásfoka megadja, hogy egy gramm emelő erőhöz mennyi watt energiát használunk fel. Minél nagyobb az *y* tengelyen lévő szám, annál jobb energiafelhasználású a rendszer. Az energiahatékonyság növelhető a propeller tollainak számának növelésével, vagy nagyobb propeller átmérő választásával. Ezek jól láthatók a 28-30 ábrán:

A teljes rendszer hatásfokát befolyásolja a propeller profilja, tömege és a motor hatásfoka. A tömeg fontosságát láthatjuk a 28-29. ábrán *2t3030 dys* és *3t3045* dal propellerek összehasonlításánál. Hiába tartalmaz több tollat a dal propeller de tömege duplája lásd 14 táblázat, így a hatásfoka rosszabb lett annál.



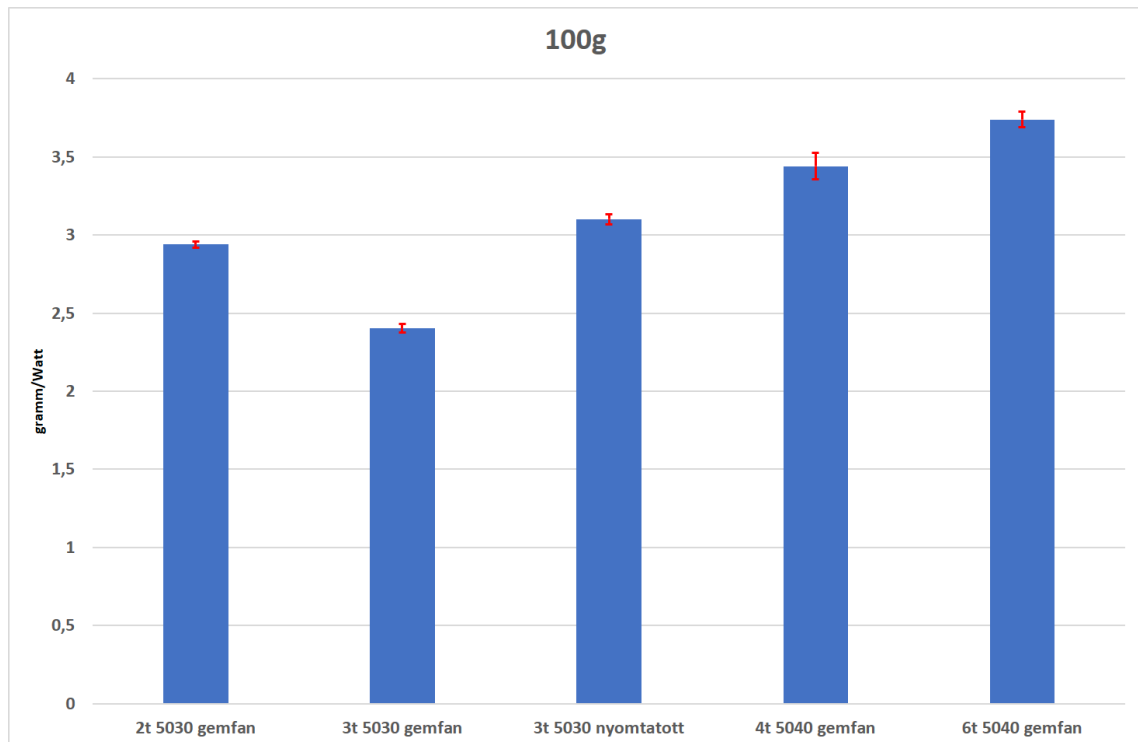
28. ábra. Teljes rendszer hatékonysága 25gramm nyomatéknál [Saját forrás]



29. ábra. Teljes rendszer hatékonysága 50gramm nyomatéknál [Saját forrás]

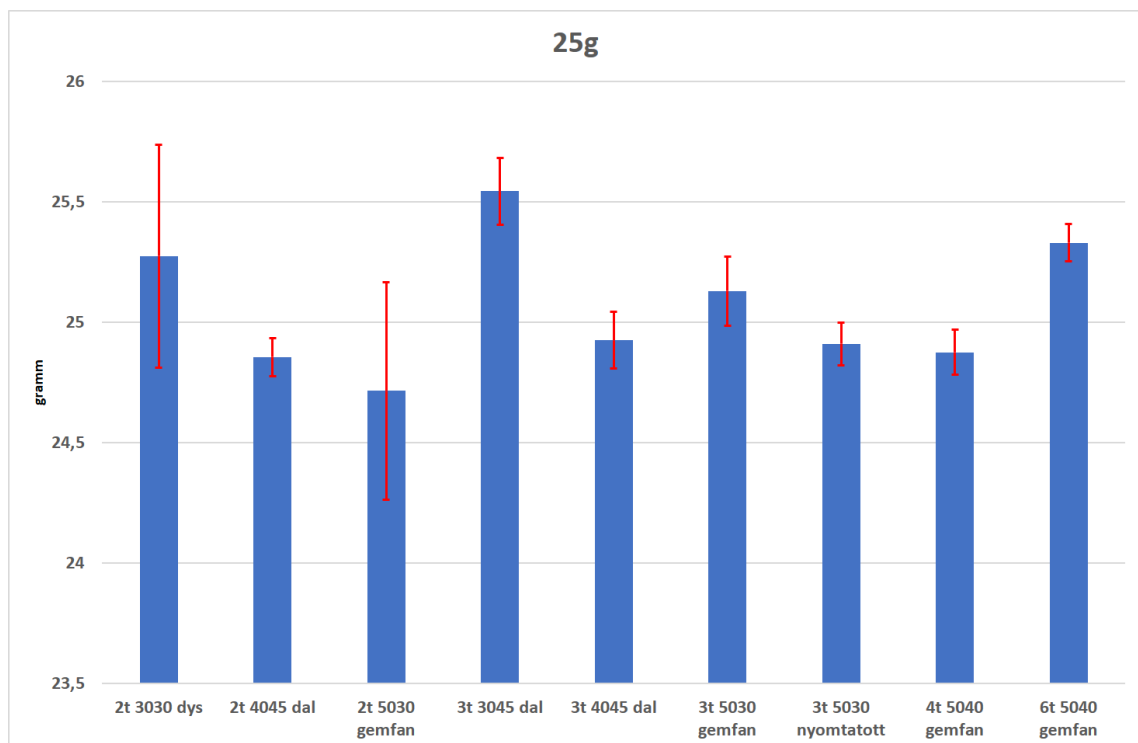
8.4. Mérőkönyezet hibabecslése

A mérőkönyezet hibabecslésénél azt vizsgáltam, hogy az egyes méréseknél milyen szórásal tudtam a nyomatékot mérni. A mérés pontosabb, ha a diagram címében található



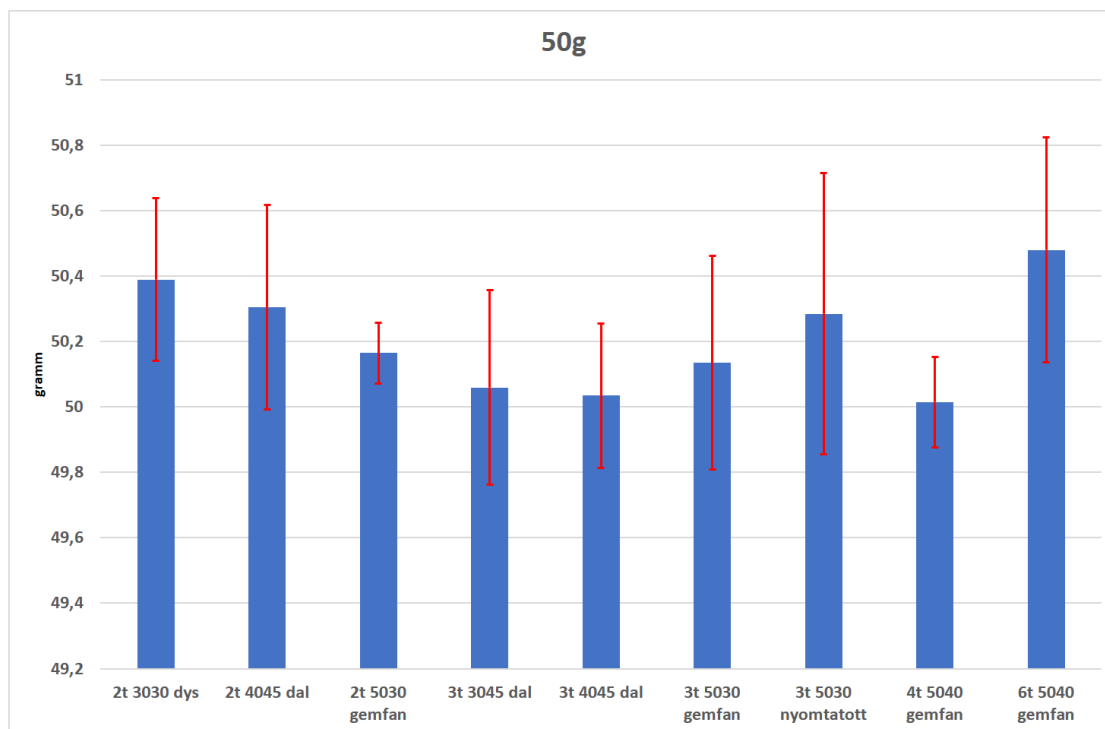
30. ábra. Teljes rendszer hatékonysága *100gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

értéket a mért értékek minél jobban megközelítik és stabilabb, ha piros vonallal mutatott értéktartomány kisebb. A *25grammos* mérés a következő 31 ábrán látható:



31. ábra. Mérőkörnyezet hibabecslése *25gramm* nyomatéknál[Saját forrás]

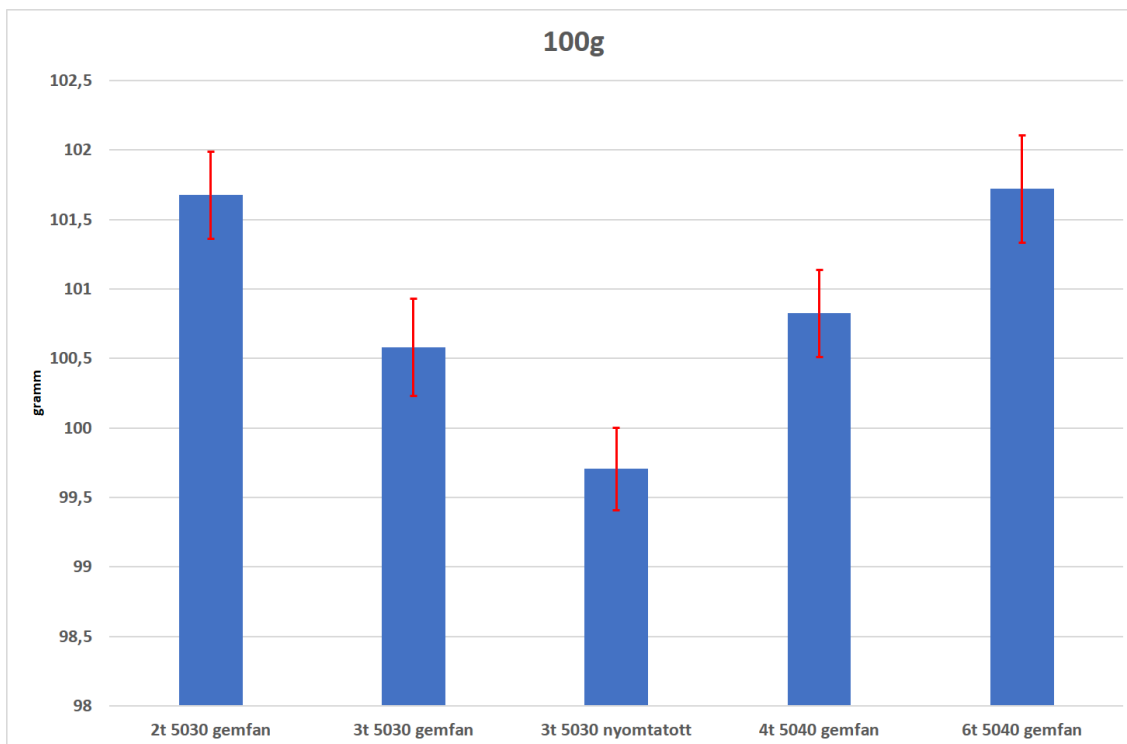
A (31. ábrán) a legnagyobb szórása a *2t 3030 dys* propellernek volt *1,5grammal*. Itt a mérések legnagyobb hibája is ehhez a propellerhez tartozik, mikor *0,8grammal* haladta meg az *25grammot*. A mérések pontossága 6%-os volt. Az *50grammos* mérések eltérése a 32. ábrán látható: A (32. ábrán) a legnagyobb szórása a *3t 5030 3d nyomtatott* pro-



32. ábra. Mérőkönyvezet hibabecslése *50gramm* nyomatéknál [Saját forrás]

pellernek volt *1,4grammal*. Itt a mérések legnagyobb hibája is ehhez a propellerhez tartozik, mikor *0,75grammal* haladta meg az *50grammot*. A mérések pontossága 2,8%-os volt. Az *100grammos* mérések eltérése a 33. ábrán látható:

A (33. ábrán) a legnagyobb szórása a *6t 5040 gemfan* propellernek volt *1,25grammal*. Itt a mérések legnagyobb hibája is ehhez a propellerhez tartozik, mikor *2,35grammal* haladta meg a *100grammot*. A mérések pontossága 1,25%-os volt.



33. ábra. Mérőkörnyezet hibabecslése 100gramm nyomatéknál [Saját forrás]

9. Kitekintés

Továbbfejlesztési lehetőségnek látom a tesztkörnyezet áram ellátásának további fejlesztését. A LiPo akkumulátoros áramellátás lecserélését tápra. Így hosszabb időtartalmú tesztek tudok elvégezni. Ennek segítségével a propeller és motor teljesítményét minden PWM értéken vizsgálom (1000-2000ig). Így megtudnám mondani a rendszer érzékenységét a drónok vezérlésre.

Hivatkozások

- [1] *AA Labor MT-STC60001* (2016. május)
<http://aalabor.hu/hu/bolt/mt-merleg-sorozat/?doc=11729>
- [2] ANDREW Sink, *Building an Acetone Vapor Bath for Smoothing 3D-Printed Parts* (2014 április 9)
<http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>
- [3] *APC Propeller RPM Limits* (2016. május)
<http://apcserve.w20.wh-2.com/v/downloads/APC%20Propeller%20RPM%20Limits.pdf>
- [4] *Cleanflight* (2016. december)
<http://cleanflight.com>
- [5] *Dalprops* (2016. december)
<http://www.dalprops.com/>
- [6] *EMAX User Instruction for NANO Series ESC* (2016. november)
<http://propeleris.lt/failai/EMX-SC-1152.pdf>
- [7] *Emeter v2 Quick Guide 2.09* (2009)
<http://www.hyperion.hk/dn/em2/Em2QuickGuidev209.pdf>
- [8] GAUSZ Tamás, *Légcsavarok* (2015)
<http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAKV4/2015-2016-I/ea/LEGCSAVAROK.pdf>
- [9] GAVIN Ananda, *UIUC Propeller Database - Volume 1 Version 3* (2015)
<http://m-selig.ae.illinois.edu/props/volume-1/propDB-volume-1.html>
- [10] *Gemfan* (2016. december)
<http://www.gemfanhobby.com/En>
- [11] GREGORY A. Williamson, *Summary of Low-Speed Airfoil Data* (2016. május)
http://m-selig.ae.illinois.edu/uiuc_lsat/Low-Speed-Airfoil-Data-V5.pdf

- [12] HÁRSFALVI Sándor, *Reüipülőmodellezés II.*
RCsolution Kft, Budapest, 2012.
- [13] *High Temperature PLA* (2016. december)
<https://3dee.hu/termek/ht-pla-001/>
- [14] JEREMIAH Dickey, *AirWolf II* (2016. május)
<https://quadcopterproject.wordpress.com/propeller-and-motor-selection/>
- [15] JOHN Salt, *Understanding RC LiPo Batteries* (2016 november)
<http://www.rchelicopterfun.com/rc-lipo-batteries.html>
- [16] MARTIN Hepperle, *JavaFoils - Users Guide*, (2015 január)
www.mh-aerotools.de/airfoils/java/JavaFoil%20Users%20Guide.pdf
- [17] MARTIN Hepperle, *JavaProp - Users Guide*, (2015 január)
www.mh-aerotools.de/airfoils/java/JavaProp%20Users%20Guide.pdf
- [18] *RCbenchmark-1520thrust stand datasheet* (2016. szeptember)
<https://d2iu8uks1rk6ao.cloudfront.net/wp-content/uploads/2016/04/RCbenchmark-1520-datasheet.pdf?x89837>
- [19] *Slic3r Manual* (2016. szeptember)
<http://manual.slic3r.org/>
- [20] *STATISTICA* (2016. december)
<http://www.statsoft.hu/index.html>
- [21] TOPOR Zoltán *Multicopterek, nulláról az UAV-kig I. - Alapok*, (2016 november)
http://www.hobbielektronika.hu/cikkek/multicopterek_nullarol_az_uav-kig_i.html?pg=2
- [22] TÓTH Tamás *Halálos jövőt ígérnek a 3D printerek*, (2016 október)
http://index.hu/tech/2016/10/26/halalos_jovot_igernek_a_3d_printerek/
- [23] *Turnigy Thrust Stand and Power Analyser v2*, (2016 szeptember)
https://hobbyking.com/en_us/turnigy-thrust-stand-and-power-analyser-v2.html