

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar



Függőleges fel- és leszállás merevszárnyú pilóta nélküli repülőgépekkel tolóerővektor-eltérítés használatával

Szerző: **Szeőcs Dávid**
Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnáziuma és Általános Iskolája

Témavezetők: **Masuk Abdullah**
Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék

Kostyák Ferenc
Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék

Tanszékvezető: **Prof. Dr. Husi Géza**
Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki és Mechatronikai Intézet,
Villamosmérnöki és Mechatronikai Tanszék

Debrecen
2024.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTŐ	4
2.1. Pilóta nélküli repülőgépek	4
2.1.1. Merevszárnyú UAV-k	5
2.1.2. Forgószárnyú UAV-k	6
2.2. Függőleges felszállásra és leszállásra képes hibrid UAV-k	8
2.2.1. Tail-sitterek	8
2.2.2. Dönthető szárnyú UAV-k	9
2.2.3. Dönthető légcsonarú UAV-k	10
3. MEGVALÓSÍTÁS	11
3.1. A repülő felépítése	13
3.2. A fel- és leszállás szimulációja	14
4. KONKLÚZIÓ	25
5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	25
6. HIVATKOZÁSOK	26

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években a dróntechnológia gyors fejlődése új lehetőségeket teremtett a különböző iparágak számára, a mezőgazdaságtól kezdve a logisztikán át egészen a katasztrófavédelemig.

A leggyakrabban használt két fő típusa a drónoknak a merevszárnyú és a forgószárnyú drónok. A merevszárnyú drónok több ideig tudnak repülni, nagyobb távolságokat tudnak megtenni, és hatékonyabbak, viszont a le- és felszállás kivitelezése nehezebb az ilyen típusú drónokkal. A forgószárnyú drónok legfontosabb tulajdonsága, hogy függőlegesen tudnak fel- és leszállni, ami lehetővé teszi a számukra, hogy korlátozott helyekről, akár akadályozott környezetben is elinduljanak. Ez a tulajdonság széles körben teszi alkalmazhatóvá az ilyen drónokat különböző környezeti feltételek mellett is.

Ez a dolgozat a függőleges fel- és leszállás megvalósításáról szól a merevszárnyú drónok esetében, amivel a két fő típus legfontosabb előnyeit ötvöztetjük egy megoldásban. Ebben a dolgozatban egy új megoldás részletei vannak leírva, majd annak a megvalósíthatóságának ellenőrzésére egy példaértékű repülőgép lesz megtervezve ezzel a megoldással, és szimulációk lesznek végrehajtva ezen a repülőgépen a MATLAB/Simulink szoftver segítségével.

2. IRODALMI ÁTTEKINTŐ

2.1. *Pilóta nélküli repülőgépek*

A pilóta nélküli repülőgépek (UAV-k), amelyeket gyakran drónokként is emlegetnek, egy új technológiát képviselnek, amely számos különböző területen és az emberi élet különféle aspektusaiban alkalmazható, széles körű szolgáltatásokat és felhasználási lehetőségeket kínálva. Az elmúlt tíz évben egyre több kutatás összpontosított az UAV-támogatási paradigma alapötletére, ami folyamatos fejlődést eredményezett a különféle földi hálózatok és a levegőben repülő UAV-k között. Ennek a paradigmának az elfogadása mostanra egyszerűbbé és egyértelműbbé vált a kommunikációs eszközökbe beépített vezeték nélküli interfészek széles körű elérhetősége miatt. Ezenfelül, mobilitásuknak és állítható repülési magasságuknak köszönhetően az UAV-k a legjobb megoldást jelentik a földi hálózatok korlátainak leküzdésére [1].

Az első kísérletek az UAV-k létrehozására olyan repülőgépek megalkotására irányultak, amelyeket légvédelmi fegyverkezelő személyzet kiképzésére lehet használni; ezeket célgépeknek nevezzük. Később, amikor bonyolultabb vezérlőrendszerek építése is lehetővé vált, a drónok népszerűvé váltak olyan katonai küldetésekből, amelyeket túl veszélyesnek ítélt meg, hogy személyzettel ellátott repülőgépekkel hajtsanak végre [2]. Ahogy ezek a drónok egyre fejlettebbé váltak, a tudósok rájöttek, hogy számos egyéb területen is felhasználhatók a katonai alkalmazásokon kívül. Az akkumulátorok és elektromos motorok fejlődése szintén hozzájárult a kisebb drónok elterjedéséhez, amelyek nem igénylik a belső égésű motorral működő rendszerek energiasűrűségét, így olcsóbbá és hozzáférhetőbbé váltak. Mivel az UAV-k nem igényelnek pilótát a repüléshez, könnyebbé és olcsóbbá is tehetők, hiszen nincs szükség pilótafülkére és olyan rendszerekre, amelyek biztosítják az emberi élet feltételeit a fedélzeten.

A modern UAV-kat egyre szélesebb körben használják különféle olyan feladatok elvégzésére, amelyeket hatékonyan lehet a levegőből megoldani, például fotózásra, megfigyelésre [3], rádióadások közvetítésére [4], légköri megfigyelésre [5], mezőgazdasági célokra [6], vagy áruszállításra [7]. Az UAV-k két fő, széles körben alkalmazott típusa a merevszárnyú és a forgószárnyú változatok [8].

2.1.1. Merevszárnyú UAV-k

A merevszárnyú drónok azok, amelyek a hagyományos repülőgépekre hasonlítanak, mivel szárnyakkal rendelkeznek. Ezek siklanak a levegőben anélkül, hogy folyamatosan energiát pazarolnának a levegőben maradásra. Automatikussá tehetők GPS-koordináták alapján történő navigálással, vagy emberi távirányítással is haladhatnak előre. Egy átlagos merevszárnyú drón két-három órán keresztül képes repülni. Mivel kevesebb energiát fogyasztanak és hosszabb repülési időt biztosítanak, a merevszárnyú drónok ideálisak hosszú távú feladatokhoz, mint például térképezéshez és megfigyeléshez. Különösen hasznosak akkor, amikor olyan légi felvételeket kell készíteni, amelyek hosszabb ideig egy adott pont felett történő lebegést igényelnek [8]. Hatékonyságuk miatt jó választásnak bizonyulnak akkor is, ha nehéz rakományt kell szállítani. Nagyon gyorsan is képesek repülni, mivel nem korlátozza őket a forgószárnyú drónok légcsavarjainak tulajdonsága, amelyek nem teszik lehetővé, hogy a hangsebességnél gyorsabban haladjanak; néhány merevszárnyú drón képes szuperszonikus sebesség elérésére is. Ugyanakkor a felszállási és leszállási eljárások sokkal nehezebben kivitelezhetők a merevszárnyú drónok esetében a forgószárnyúakhoz képest, és speciális felszerelést igényelnek, mint például egy katapult a felszálláshoz és egy ejtőernyő a leszálláshoz, vagy egy megfelelő kifutópálya. Kézzel indítható drónokat is használnak [9], de ezek méret- és súlykorlátozásokkal rendelkeznek, és még mindig szükség van egy módszerre a leszálláshoz.

A világ első pilóta nélküli légijárművei merevszárnyúak voltak, mivel a merevszárnyú repülőgépek viszonylag könnyen irányíthatók. Ez a kialakítás a mai napig népszerű maradt, különösen a nagyobb drónok esetében, ahol kifutópálya használata megéri. A legtöbb olyan UAV, amelynek fegyvereket, kamerákat, radarokat vagy más nehéz rakományt kell szállítania, és hosszú távú repülésekre van szükség, merev szárnyakkal rendelkezik. A nehéz harci merevszárnyú UAV-k felszálló súlya több tonna, és egyesek több ezer kilométert is képesek megtenni [10].



1. ábra: General Atomics MQ-9 Reaper katonai merevszárnyú UAV repülés közben [11]



2. ábra: Hordozható katonai UAV kézi indítása [12]

2.1.2. Forgószárnyú UAV-k

Az első forgószárnyú UAV az 1950-es években jelent meg, és egy kis méretű, személyzettel ellátott helikopter volt, amelyet módosítottak, és távirányítást lehetővé tevő rendszerekkel szereltek fel [13]. Azonban ennek a drónnak az irányítása összetett feladat volt, mivel fejlett rendszereket kellett rá telepíteni, ezért megbízhatatlan és költséges volt a fenntartása. Később, az elektronikai technológia fejlődésével, a forgószárnyú UAV-k népszerűsége növekedett, először néhány turbinahajtású vagy belső égésű motorral működő katonai drón esetében, majd később kisebb, elektromos meghajtású, olcsó és egyszerű drónokkal.

Az ebbe a kategóriába tartozó UAV-k a felhajtóerőt teljes egészében forgó rotorjaikkal állítják elő. A forgószárnyú UAV-k között több típus létezik, és általában a rotorjaik számuk alapján osztályozzák őket. A leggyakoribb típusok egy (helikopterek), három (trikopterek),

négy (kvadkopterek), hat (hexakopterek) vagy nyolc (oktokopterek) rotorral rendelkeznek. Azokat a típusokat, amelyek több rotorral rendelkeznek, gyakran multirotoroknak is nevezik. A helikopter típusú UAV-k pontosan úgy működnek, mint a személyzettel ellátott helikopterek. A trikopterek legalább az egyik rotorjukat képesek megdönteni, hogy ellensúlyozzák a rotorok által keltett kiegyensúlyozatlan nyomatékokat. A kvadkopterek, hexakopterek és oktokopterek ugyanannyi óramutató járásával megegyező és ellentétes irányba forgó rotorral rendelkeznek, így kiegyensúlyozzák az általuk keltett nyomatékokat. A quadkopterek a legnépszerűbb multirotor típusok egyszerű felépítésük és irányíthatóságuk miatt, és gyakran hatékonyabbnak tartják őket a több rotorral rendelkező típusoknál. Azonban olyan esetekben, amikor nagyobb megbízhatóságra van szükség, hexakoptereket és oktokoptereket alkalmaznak, mivel ezeknél a rotorok redundánsak lehetnek, míg a quadkopterek nem tudnak repülni, ha az egyik rotor meghibásodik [14].

A forgószárnyú UAV-k különböző kategóriái hasonlóak alapvető tulajdonságaikban. A forgószárnyú UAV-k kulcsfontosságú jellemzője a függőleges felszállás és leszállás, ami jelentősen megkönnyíti az üzemeltetésüket a merevszárnyú UAV-khoz képest [15]. Ezeket általában kisebb léptékű küldetések során használják, ahol a kifutópályák használata túl költséges, vagy olyan helyeken, ahol nincsenek kifutópályák. Képesek egy fix pozícióban lebegni és pontosan, lassú sebességgel mozogni, így ideálisak fényképezéshez és olyan korlátozott területeken való repüléshez, ahol akadályok találhatók. Viszonylag egyszerű felépítésük és üzemeltetésük miatt széles körben elterjedtek a csináld magad (DIY) közösségben. Ezeknek a UAV-knak azonban a legnagyobb hátránya a magas energiafogyasztásuk, ami alacsony repülési időt és hatótávolságot eredményez [16]. Általában a maximális üzemidejük nem haladja meg a 30-35 percet, és a rakomány is jelentős hatással lehet a repülési időre [17].



3. ábra: Egy DIY kvadkopter kamerával felszerelve [18]

2.2. Függőleges felszállásra és leszállásra képes hibrid UAV-k

Ezek az UAV-k merev szárnyakkal rendelkeznek, és képesek a függőleges felszállásra és leszállásra (VTOL-ra). „Hibrid” vagy „átalakítható” néven emlegetik őket, mivel két repülési módjuk van: lebegés a légcsavarok által generált vonóerő segítségével és repülés a szárnyak felhajtóerejével. Ötvözik a forgószárnyú és a merevszárnyú UAV-k előnyeit, lehetővé téve a függőleges felszállást és leszállást, miközben hatékonyan repülnek. A merevszárnyú UAV-khoz szükséges rendszerek, amelyek lehetővé teszik a lebegést és a VTOL-t, plusz súlyt adnak, de a teljesítménycsökkenés sok esetben nem éri el a kifutópálya hiányából adódó előnyöket. A hibrid UAV építésére irányuló projektek közül csak néhány fejezte be a kutatás és tesztelés első szakaszait, és még kevesebb készített teljes méretű járművet, amely készen áll a használatra. Nem sok megbízható, átalakítható repülő platform létezik, amely biztonságosan tud működni a civil infrastruktúra mellett. Egy hibrid UAV irányítására alkalmas rendszer megvalósítása meglehetősen összetett feladat, különösen a lebegési mód és a előre repülési mód közötti átmenet irányítása során [19][20].

2.2.1. Tail-sitterek

A tail-sitter egy olyan VTOL (függőleges felszállású és leszállású) repülőgép-típus, amely a farán (törzs végén) száll fel és landol. A felszállás előtt vagy a leszállás után függőlegesen áll a földön vagy egy külön erre készített platformon. A feladat végrehajtása során a tail-sitter függőlegesen száll fel, majd vízszintes helyzetbe fordul az előre repüléshez [21]. A repülési módváltáshoz vagy a rotorok vonóerejét, vagy aerodinamikai vezérlőfelületeket használnak [22]. Az előbbihez képest az utóbbi technika gyakran hatékonyabb a túrázó repülés során, mivel kevesebb légcsavart használ, de nehezebb is irányítani.

A legtöbb esetben, mivel nem igényelnek külön speciális aktuátorokat repülési módok közötti váltáshoz, a tail-sitter UAV-k általában viszonylag egyszerű és könnyű mechanikával rendelkeznek. Ezek az UAV-k azonban kevésbé agilisak és érzékenyebbek a szél zavarainak, mivel a törzs és a szárny nagy felülete ki van téve a légáramlatoknak, különösen a felszállás és a leszállás során [23]. Emellett megfelelő méretű leszálló lábakkal kell rendelkezniük ahhoz, hogy stabilan álljanak a földön, ami korlátozhatja a repülőgép konfigurációját és/vagy növelheti a repülés közben fellépő légellenállást.



4. ábra: Egy tail-sitter UAV prototípus [24]

2.2.2. Dönthető szárnyú UAV-k

Ezek az UAV-k szokatlan kialakítással rendelkeznek, amely lehetővé teszi a zökkenőmentes átmenetet a lebegő és az előre repülési módok között azáltal, hogy mind a fő szárnyat, mind a vízszintes farokszárnyat 90 fokig döntik [25]. A rotorok a fő szárnyon és a stabilizátoron helyezkednek el. A szárnyak és a vízszintes stabilizátorok változtatható szöge, valamint a több rotor lehetővé teszi a nagyfokú irányíthatóságot mindkét repülési módban. A lebegés során a szárnyak helyzete miatt érzékenyebbek a szélre [26]. A szárnyak forgatása felhasználható a repülőgép optimalizálására különböző repülési körülmények között [27], de a forgatáshoz szükséges mechanika bonyolult és nehéz lehet [19].



5. ábra: NASA GL-10 dönthető szárnyú UAV [28]

2.2.3. Dönthető légszárnyú UAV-k

Az ilyen a típusú VTOL UAV-k légszárnyai függőleges helyzetben maradnak a felszállás és leszállás során, hasonlóan a helikopterekhez, de amikor a repülőgép sebessége nő, a légszárnyak előre dőlnek, és vízszintes irányú vonóerőt generálnak [26]. Néhányuk csak két motorral rendelkezik, amelyek a szárnyak végén találhatók; ezek dőlésszöget állító mechanizmust használnak a lebegő repülés stabilizálására, és a tömegközéppontnak a létrejövő felhajtóerő hatásvonalával kell egybeesnie. Alacsony rotor- és kiegészítő kar-számuk miatt hatékonyan tudnak repülni, de a szárnyak végei megzavarhatják a rotorokból származó légáramot, csökkentve ezzel a lebegés alatti hatékonyságukat. Mások három, négy vagy több állítható dőlésszögű motorral rendelkeznek, amelyek a szárnyakról vagy a törzsre kinyúló karokon helyezkednek el [29]. Ezeket trikopterek, kvadkopterek vagy multikopterek módjára irányítják, a rotorszámuknak megfelelően. Ez jó manőverezhetőséget biztosít számukra, és a tömegközéppont elhelyezkedése nem olyan fontos, mint a kétrotoros konfigurációnál; azonban a rotorokat tartó szerkezet a repülés során plusz légellenállást okoz. Néhány dönthető rotoros UAV vezérlőrendszere képes kihasználni a dőlésszög-állító mechanizmusokat előre repülési módban, hogy javítsa a manőverezhetőséget és a repülési hatékonyságot. Összegzésképpen, az ebbe a kategóriába tartozó UAV-k kevésbé érzékenyek a szélre lebegés közben, de legtöbb esetben a dőlésszög-állító mechanizmusok holtteherként viselkednek vízszintes repülés közben, és gyakran erős szárnyakat igényelnek [19].

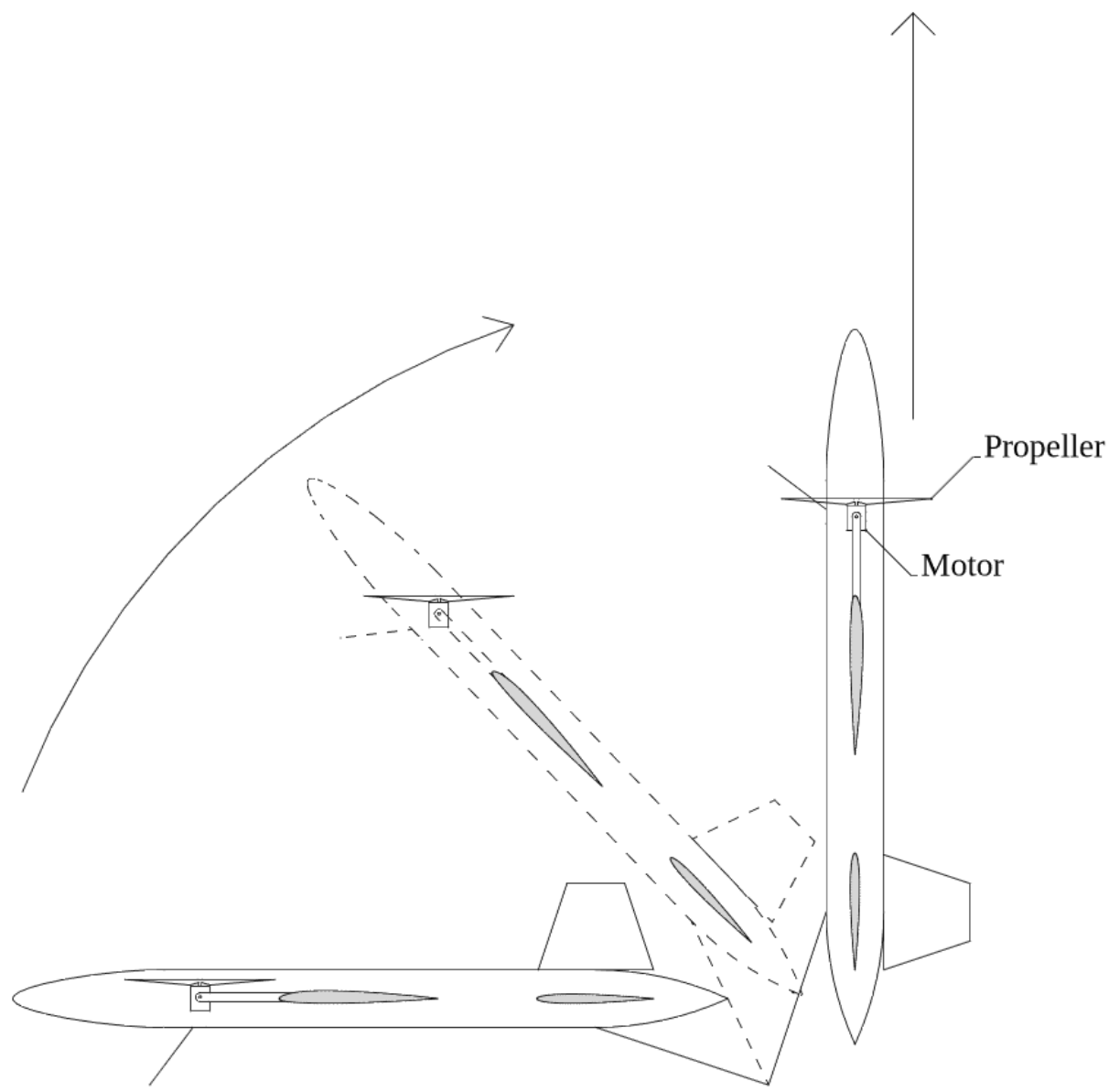


6. ábra: Wingcopter 178 dönthető légszárnyú szállító UAV repülés közben [30]

3. MEGVALÓSÍTÁS

Ebben a dolgozatban egy olyan konfigurációról lesz szó, ami a tail-sitterekhez hasonlít a leginkább. A tail-sitter drónok hátrányai, hogy a futómű, azaz a hátsó részen lévő lábak jelentős légellenállást jelenthetnek, földön lévő függőleges helyzetben erősen ki vannak téve a szél hatásainak, és az ezek kiküszöbölésére irányuló megoldások korlátozhatják a drón kialakítását.

Az ebben a dolgozatban tárgyalt megoldás az, hogy dönthető motorok lesznek jelentősen a tömegközéppont előtt elhelyezve, és a futómű a repülő hátulján túlnyúlik. A motorok száma páros, és a motorok forgási iránya páronként ellentétes, hogy a légsavak forgatása miatt ható ellentétes irányú forgatónyomatékok összege nulla legyen. Ekkor a repülő felszállás előtt a motorokkal az 7. ábrán látható módon függőleges helyzetbe áll, és utána emelkedik fel, majd átfordul vízszintes helyzetű repülésbe. A leszállás hasonlóan működhet, először a vízszintes repülésből függőlegesbe kell fordulni a repülővel, majd leereszkedni vele a földre. Ekkor a futómű és a talaj érintkezési pontja a repülőgép tömegközéppontja előtt is lehet, ekkor, hogy ne essen hátra a repülő, először kicsit előre kell dönteni a motorokat, hogy előrébb dőljön a repülő, majd vissza függőleges állásba, és lassan leengedni a repülőt vízszintes helyzetbe. Ez a megoldás kisebb futóművet igényel, és a szélre való érzékenysége a földön lévő helyzetben sokkal kisebb, mint a tail-sittereknél, ezért kevesebb megkötést jelent a repülő kialakítására, ami hatékonyabbá teheti a repülőt.



7.ábra: A felszállás menete

Ebben a dolgozatban egy ilyen konfigurációval rendelkező drón lesz megtervezve alapszinten, amivel szimulációkat lehet majd elvégezni a konfiguráció megvalósítása érdekében. A szimulációk tárgya a fel- és leszállás menete lesz, és a MATLAB/Simulink szoftver segítségével lesznek elvégezve.

3.1. A repülő felépítése

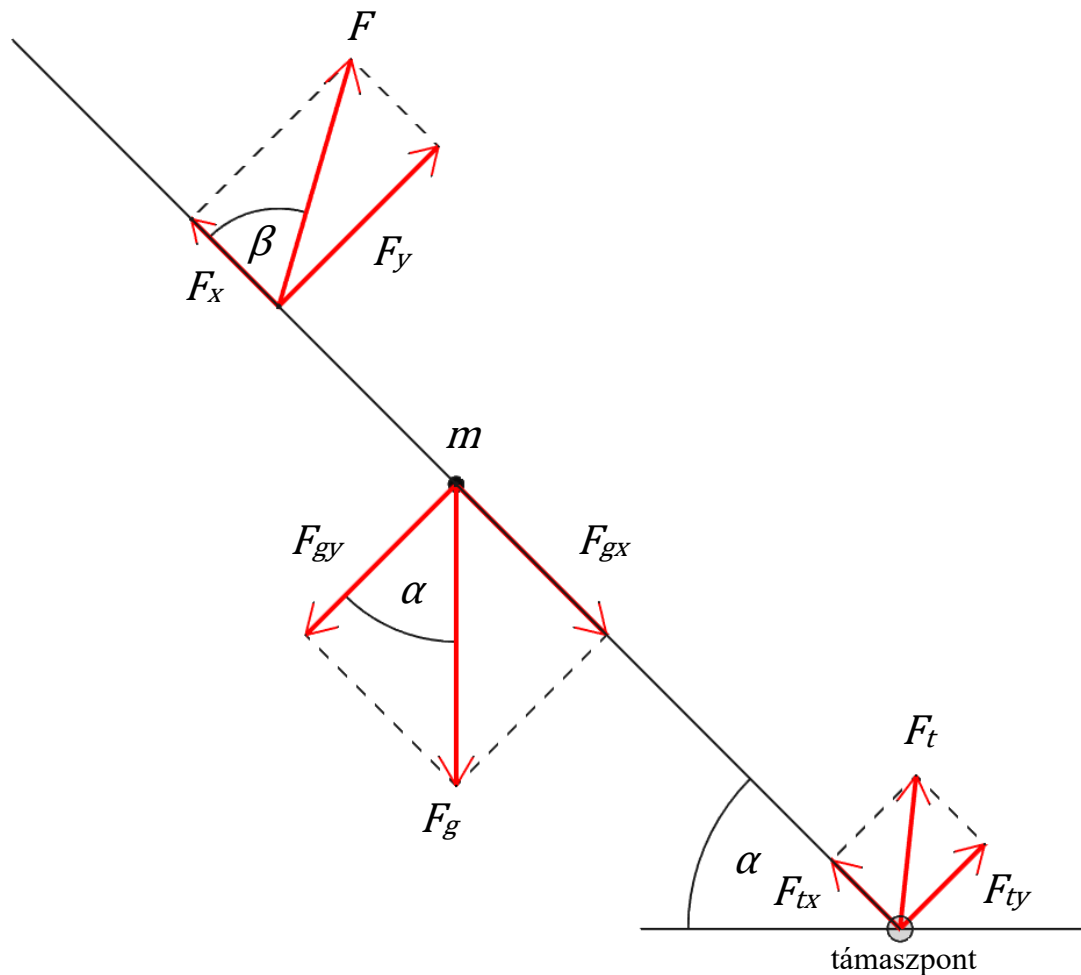
A dolgozatban csak azokról a paraméterekről lesz szó, amik a szimulációhoz való modellekhez szükségesek. Ezek a paraméterek nincsenek pontosan kiszámítva, csak példaként szolgálnak a konfiguráció leírásához és a szimulációk elvégzéséhez.

A megadott paraméterek az alábbi táblázatban láthatók. A tömegközéppont és a motorok helye a hátsó futómű végétől mért távolságukat jelenti, mert ez lesz egyenlő a gravitációs erő és a vonóerő erőkarjaival. Legyen a repülő törzse 1 m hosszú, a tömegközéppont pedig legyen a közepén, így a hátsó futómű vége és a tömegközéppont között 50 cm lesz. A szárny közvetlenül a tömegközéppont mögött lesz. A légsavarak a szárny előtt 20 cm-el lesznek elhelyezve, hogy a szárny ne akadályozza a levegő áramlását amikor a légsavár el van fordítva. Mivel a repülő összes tömege 5 kg, kb. 50 N gravitációs erő hat rá, ezért az összes vonóerő legyen 60 N, hogy a stabilizációra is maradjon erő.

Paraméter	Érték
Összes tömeg	5 kg
Összes vonóerő	60 N
Tömegközéppont helye	0,5 m
Motorok helye	0,7 m

3.2. A fel- és leszállás szimulációja

A felszállás közben a repülőre ható erőket a 8. ábra mutatja.



8.ábra: A repülőre ható erők felszállás közben

Ezen az ábrán

F a motorok vonóereje,

F_g a repülőre ható gravitációs erő,

F_t a tartóerő,

m a tömegközéppont,

α a repülő és a talaj által bezárt szög,

β a vonóerő-vektor és a repülő által bezárt szög.

Az ábrán az erők a repülővel párhuzamos és arra merőleges komponensei is láthatók.

Tegyük fel, hogy a támaszpont, azaz a futómű vége nem mozdul el a földön. Ekkor a repülőgépre ható erők egyensúlyban lesznek. A repülőre kettő forgatónyomaték hat, a gravitációs erő és a vonóerő forgatónyomatéka.

A vonóerő által kifejtett forgatónyomaték:

$$M = -M_g + M_f \quad (1)$$

ahol M_g a gravitációs erő forgatónyomatéka, M_f pedig a repülő forgásállapotának megváltoztatásához szükséges forgatónyomaték. Az M_f értékét a repülő vezérlőrendszere fogja a forgásállapottól függően vezérelni, tehát ezt tudjuk. Az erőkarok az előző fejezetben leírtak alapján:

$$K_g = 0,5 \text{ m} \quad K_m = 0,7 \text{ m} \quad (2)$$

Ezek alapján meghatározható a vonóerő merőleges komponense:

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{-M_g + M_f}{K_m} \\ F_y &= \frac{-K_g * F_{gy} + M_f}{K_m} \\ F_y &= \frac{-K_g * m * g * \cos \alpha + M_f}{K_m} \end{aligned} \quad (3)$$

ahol g negatív értékű, mivel a gravitációs erő forgatónyomatéka a vonóerő nyomatékával ellentétesen hat.

Az F_x meghatározásához megadjuk, hogy maximum hányszorosa lehet az F_{gx} értékének, mivel ha csak nulla lehetne, akkor a motort mindig 90 fokkal kellene elforgatni, viszont ha több is lehet, akkor kevesebbet kell forgatni a motort a megfelelő forgatónyomaték kifejtése érdekében. Legyen ez az arány a C_x .

$$\begin{aligned} F_x &= -F_{gx} * C_x \\ F_x &= -F_g * \sin \alpha * C_x \\ F_x &= -m * g * \sin \alpha * C_x \end{aligned} \quad (4)$$

Ezek alapján meg lehet adni a vonóerő nagyságát, és irányszögét:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{F_y}{F_x} \\ \beta &= \operatorname{tg}^{-1} \frac{F_y}{F_x} \end{aligned} \quad (6)$$

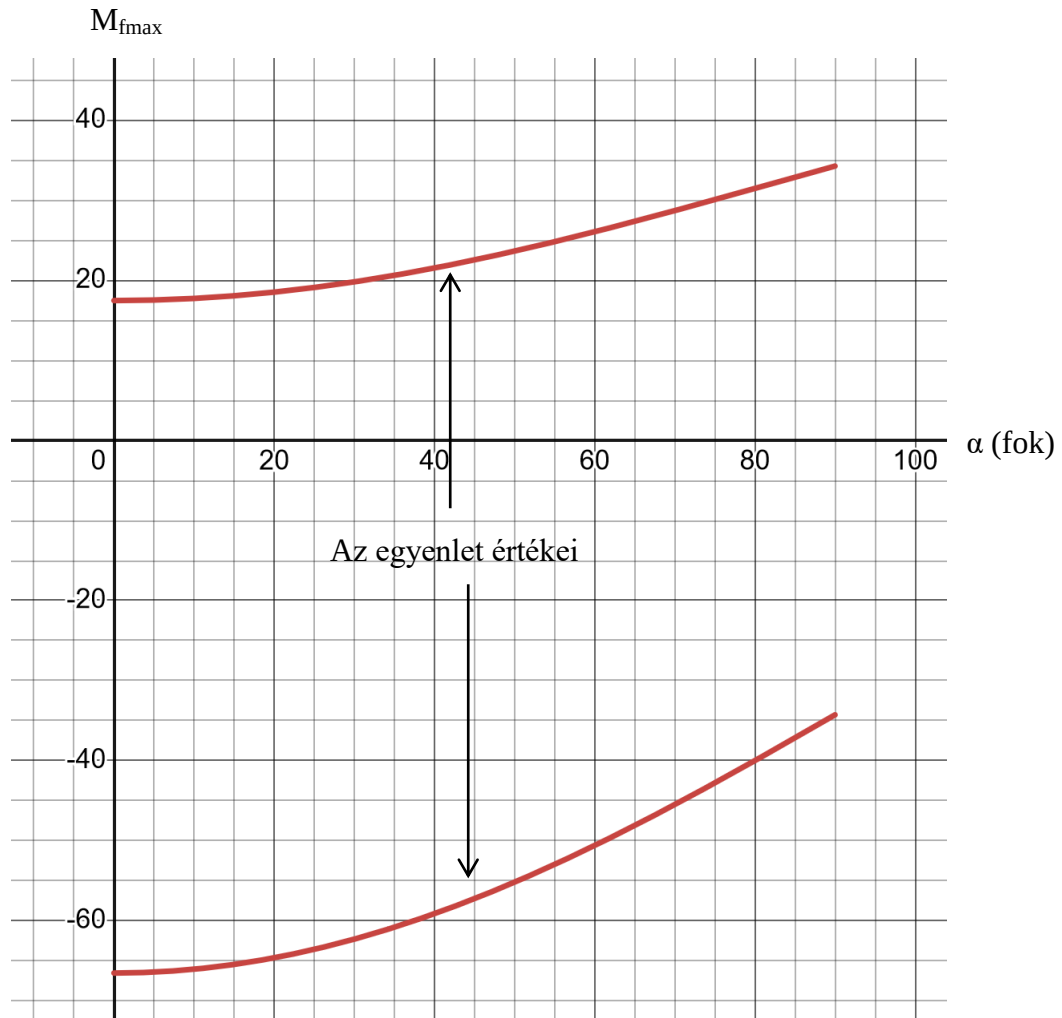
A szimulációhoz készülő modellhez most megadjuk M_f maximális értékét minden α -hoz.

$$\begin{aligned} F_{max}^2 &= F_x^2 + F_y^2 \\ F_{max}^2 &= (m * g * \sin \alpha * C_x)^2 + \left(\frac{K_g * m * g * \cos \alpha + M_{fmax}}{K_m} \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Az egyenletbe behelyettesíthető adatok a táblázatban láthatók. A C_x -et most 0,4-nek vesszük.

Paraméter	Érték
F_{max}	60 N
m	5 kg
g	-9,81 m/s ²
K_g	0,5 m
K_m	0,7 m

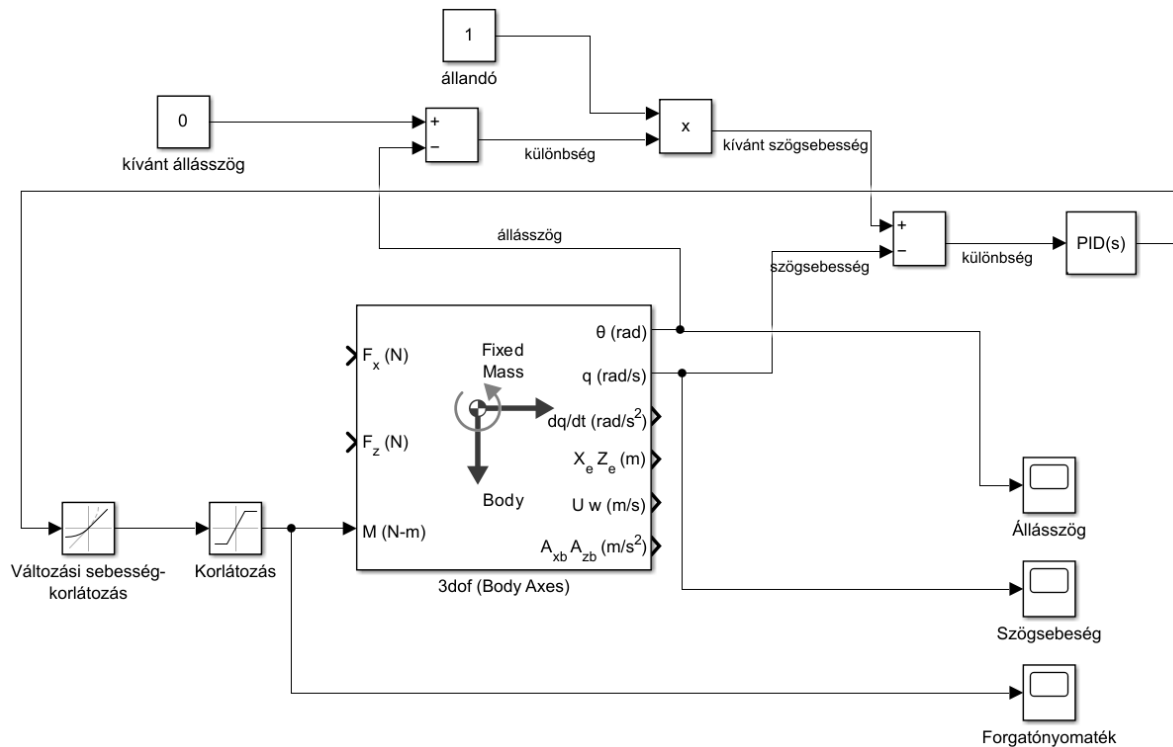
Ezen adatok alapján grafikus számológéppel vagy annak megfelelő szoftverrel megjeleníthetjük a keresett értékeket. A 9. ábrán az egyenlet ábrázolását láthatjuk. Az α szög fokban van mérve és le van szűkítve 0°-tól 90°-ig. A vízszintes tengely felel meg az α -nak, a függőleges pedig az M_{fmax} -nak.



9. ábra: Az M_{fmax} értéke α -tól függően (Készítette a szerző)

A grafikonon látható, hogy M_f értéke minden szögnél lehet 17 Nm és -30 Nm között. Nézzük meg, hogy ilyen korlátok közt hogyan lehet irányítani a repülőt. A szimuláció elvégzéséhez a MATLAB/Simulink szoftvert fogjuk használni. A modell az 10. ábrán látható. A szimuláció egy három szabadsági fokú, kétdimenziós térben mozgó test modelljét használja fel, ez látható középen. Ez a modell nem tartalmazza a gravitáció által kifejtett forgatónyomatékokot, mert azt a fent leírt egyenletek alapján egy vezérlőrendszer könnyen ellensúlyozni tudja. A forgatónyomatékokot itt egy PID szabályozó határozza meg a szögsebesség alapján. A kívánt szögsebesség egyenlő a repülőnek a függőlegessel bezárt előjeles szöge megszorozva egy állandóval, aminek az értéke a képen látható modellben 1. Így a PID szabályozó a kívánt és a mért szögsebesség különbségét fogja minimalizálni a forgatónyomaték meghatározásával.

A modellben még látható egy korlátozás a forgatónyomaték változási sebességére is, mivel a motoroknak idő szükséges az elforduláshoz és a vonóerő változtatásához.



10. ábra: A szimuláció modellje (Készítette a szerző)

Tegyük fel, hogy egy másodperc alatt képesek 90 fokot fordulni és 0 N-ról a maximális 60 N vonóerőt elérni. Ekkor a forgatónyomaték változása:

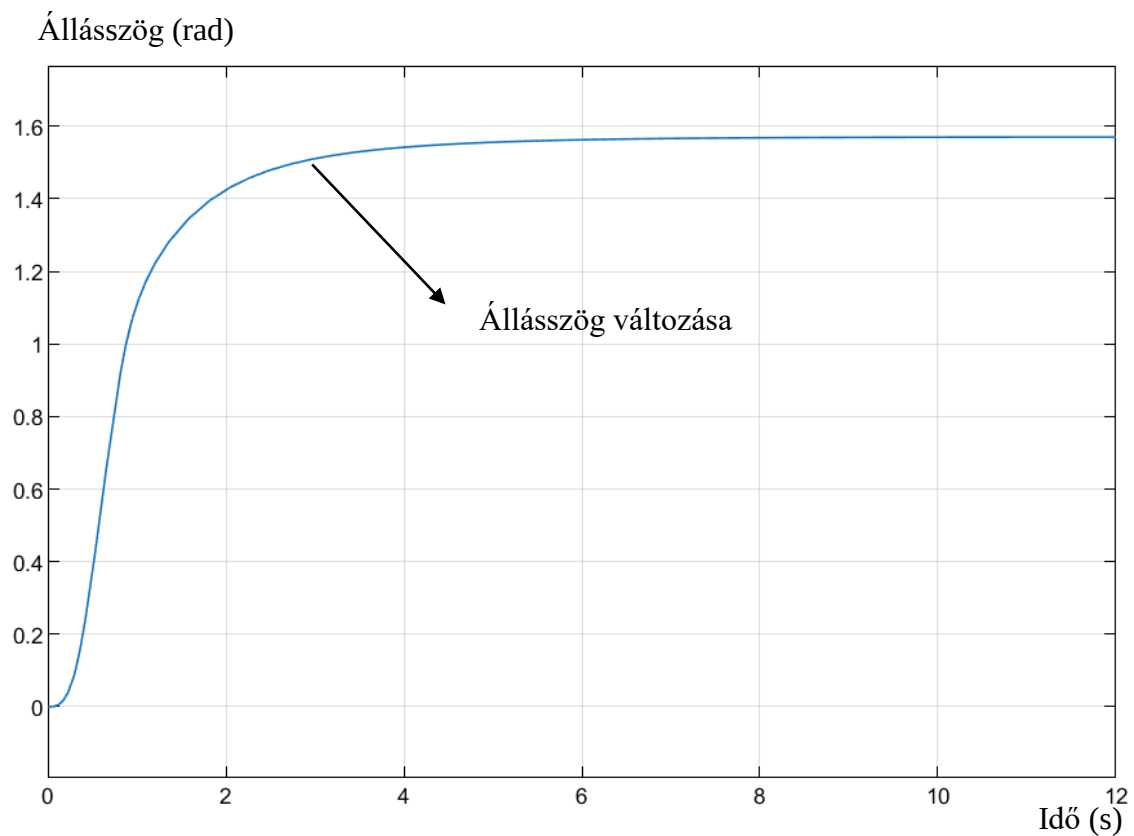
$$\Delta M = (60 - 0) * K_m = 60 * 0,7 = 42 \text{ Nm} \quad (8)$$

ezért a forgatónyomaték változása másodpercenként 42 Nm lehet a modellben.

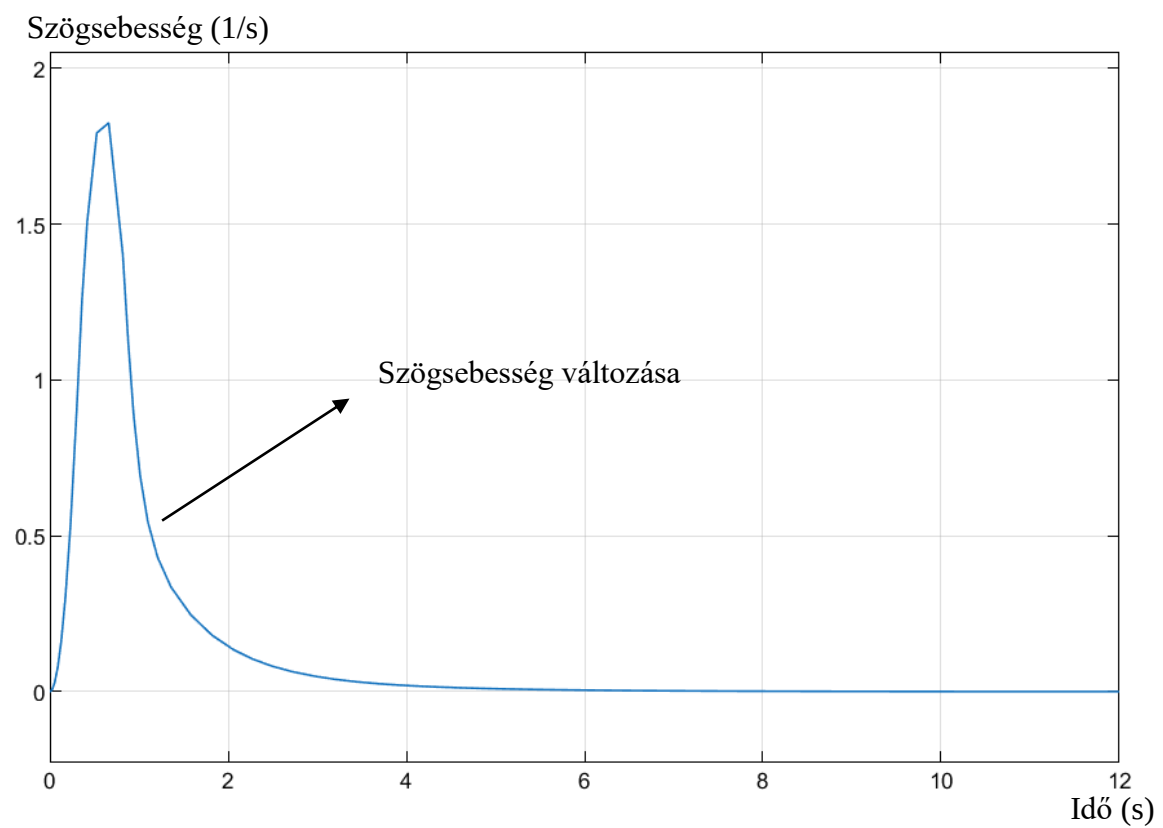
A PID vezérlő értékei a Simulink erre beépített eszközével lettek beállítva. Az értékek az alábbi táblázatban láthatók.

Paraméter	Érték
P	17.6443346614198
I	12.2465335783875
D	-0.682374467980084
N	25.8572609166478

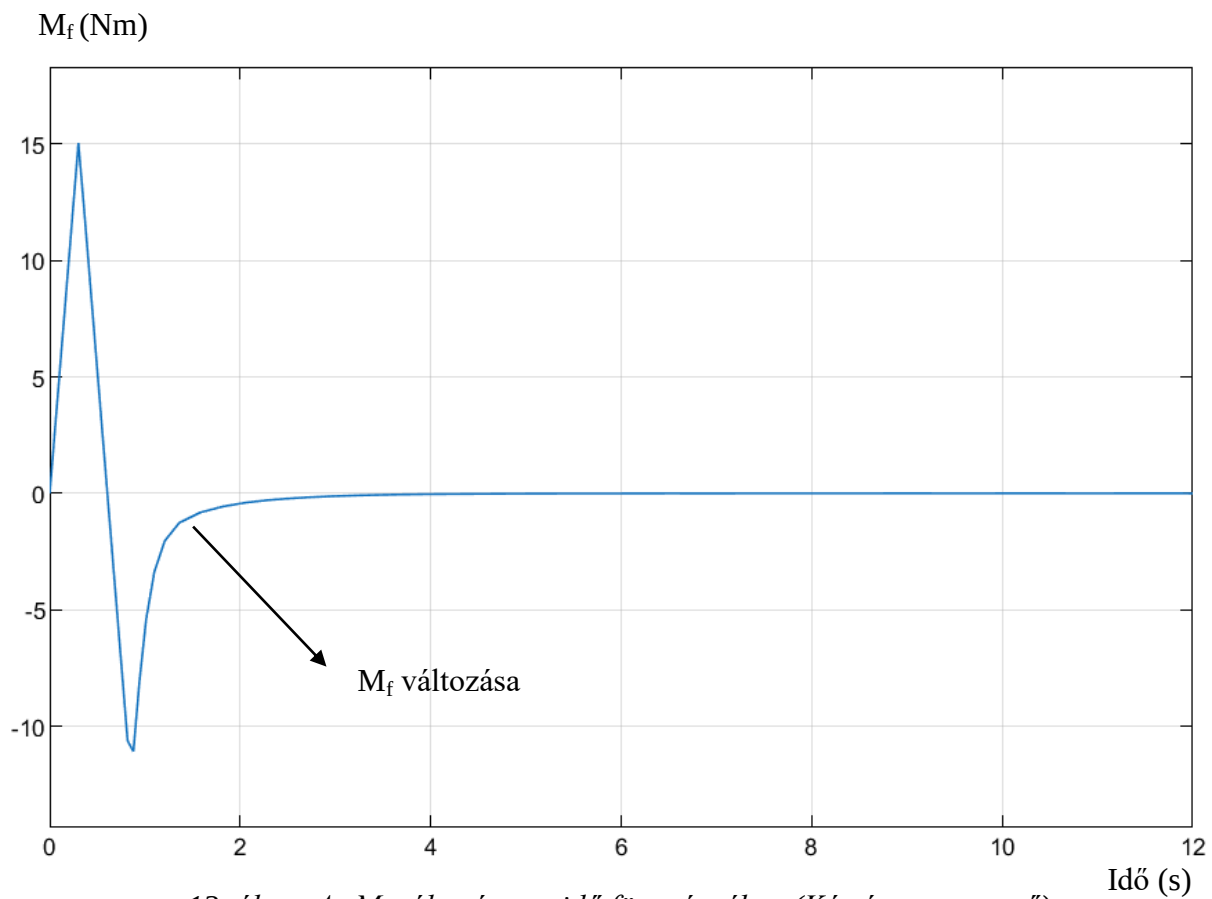
A szimuláció eredményei a 11-13. ábrákon láthatók. A vízszintes tengelyeken az eltelt idő látható másodpercben mérve.



11. ábra: Az állásszög változása az idő függvényében a szimulációban (Készítette a szerző)



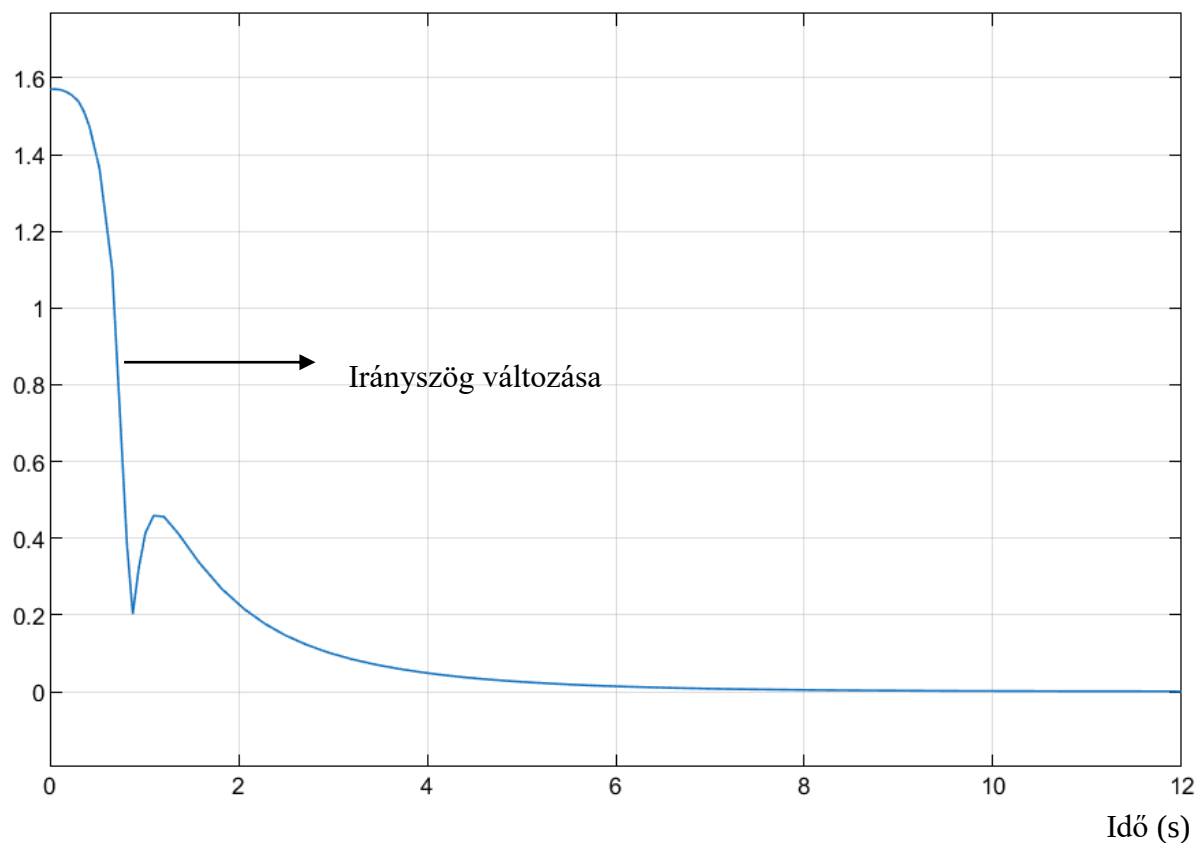
12. ábra: A szögsebesség változása az idő függvényében (Készítette a szerző)



13. ábra: Az M_f változása az idő függvényében (Készítette a szerző)

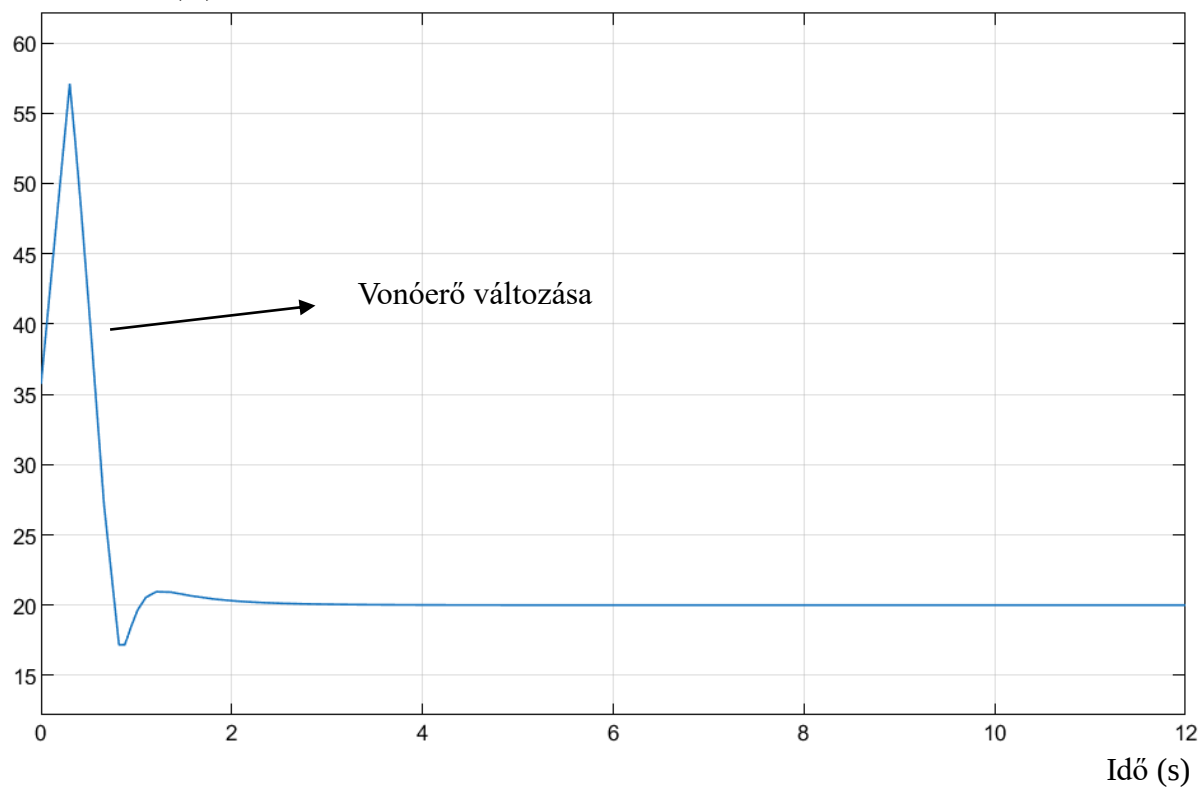
A korábban leírt egyenletek alapján a vonóerő-vektor irányszögét és a nagyságát is ki lehet számolni. Ezeknek az értéke az idő függvényében a 14. és 15. ábrán látható. A 16. ábrán látható, hogy a repülő állásszöge idővel $\pi/2$ radiánhoz közelít majd pontosan beáll arra, tehát a szabályozórendszer működik.

Írányszög (rad)



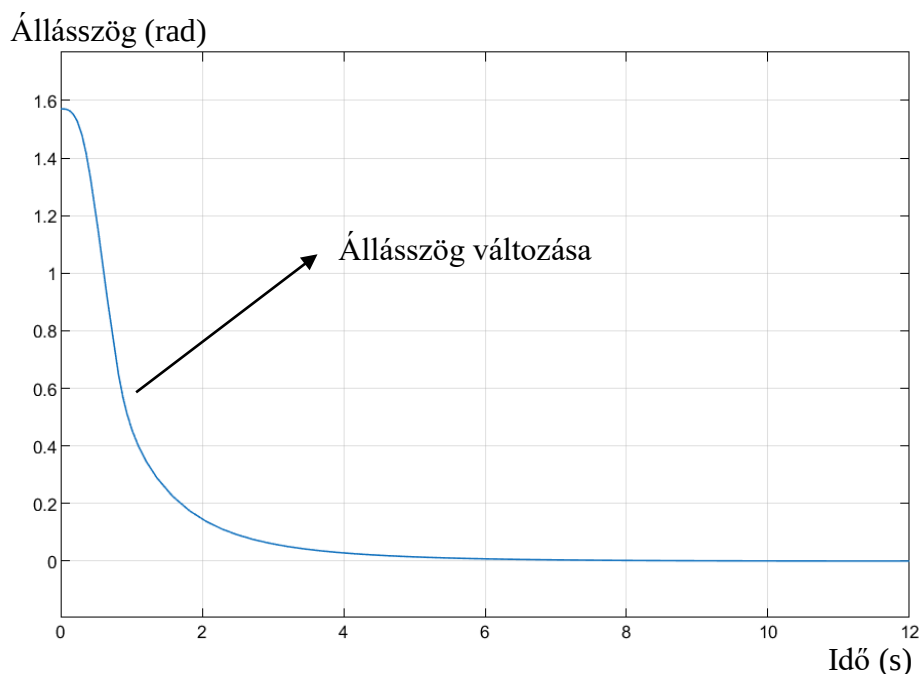
14. ábra: A vonóerő-vektor irányszöge az idő függvényében (Készítette a szerző)

Vonóerő (N)

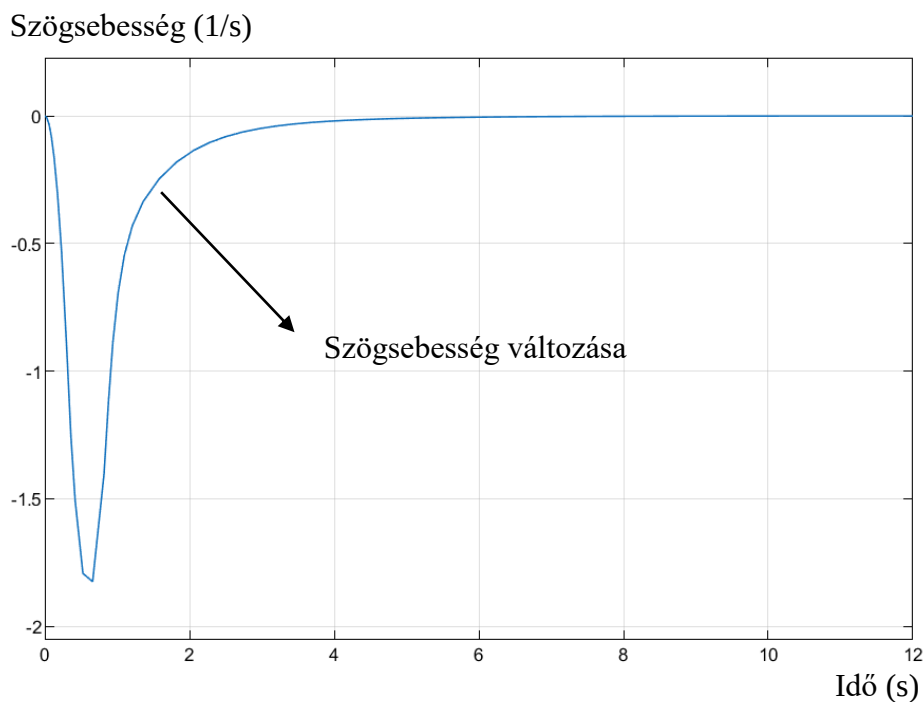


15. ábra: A vonóerő-vektor nagysága az idő függvényében (Készítette a szerző)

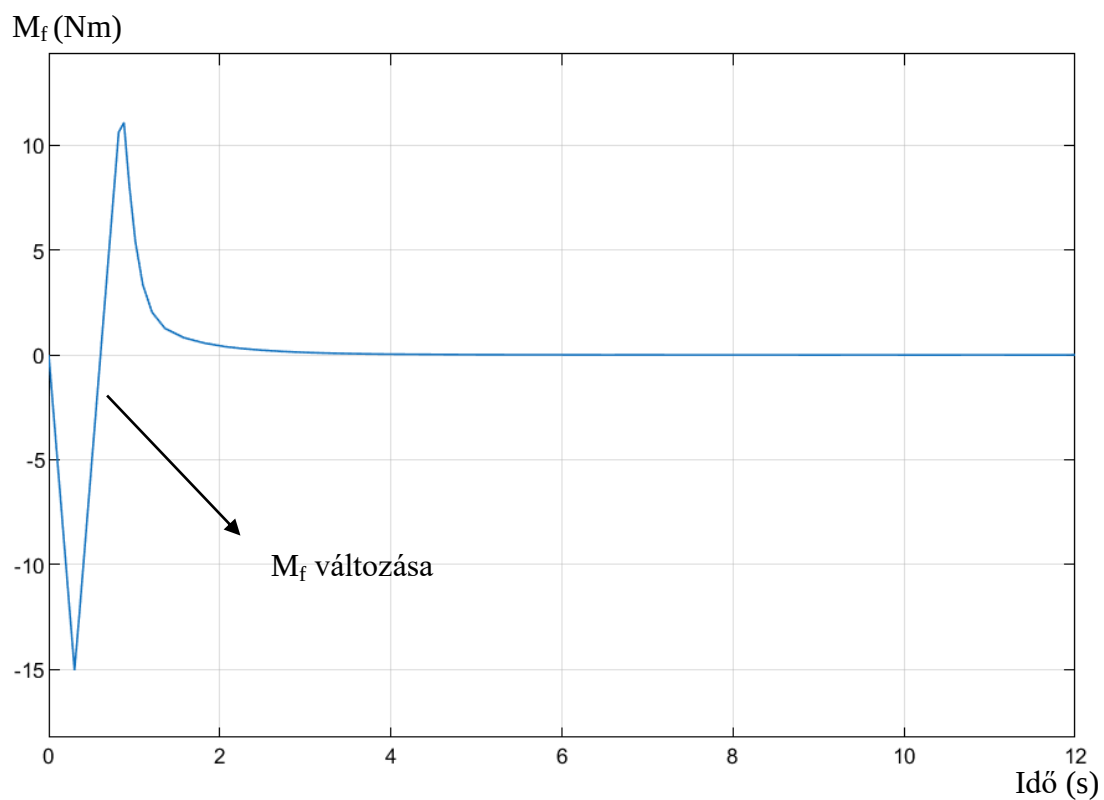
A leszállás menetének szimulációjához a modellben a kezdeti állásszöget $\pi/2$ radiánra, a kívánt állásszöget pedig 0 radiánra állítva kaphatjuk meg a megfelelő adatokat. A leszálláshoz kapcsolódó grafikonok a 16.-20. ábrákon láthatók.



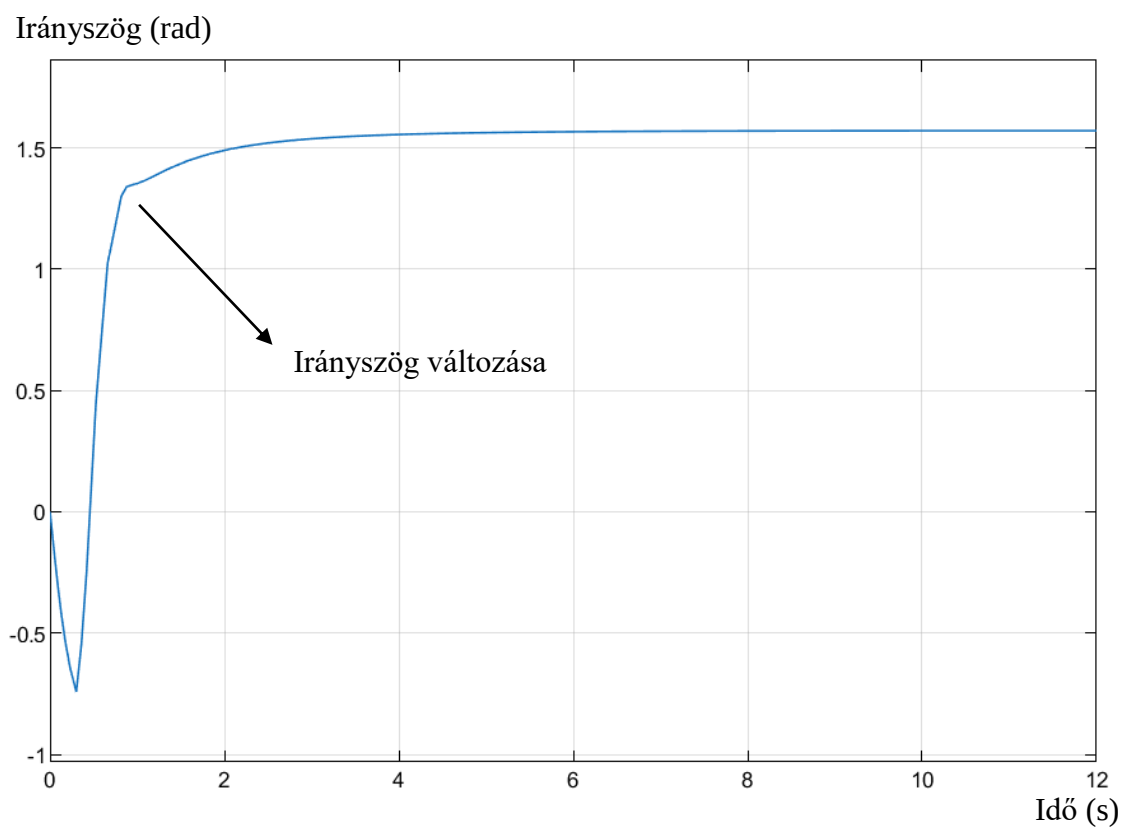
16. ábra: Az állásszög változása az idő függvényében a leszállásnál
(Készítette a szerző)



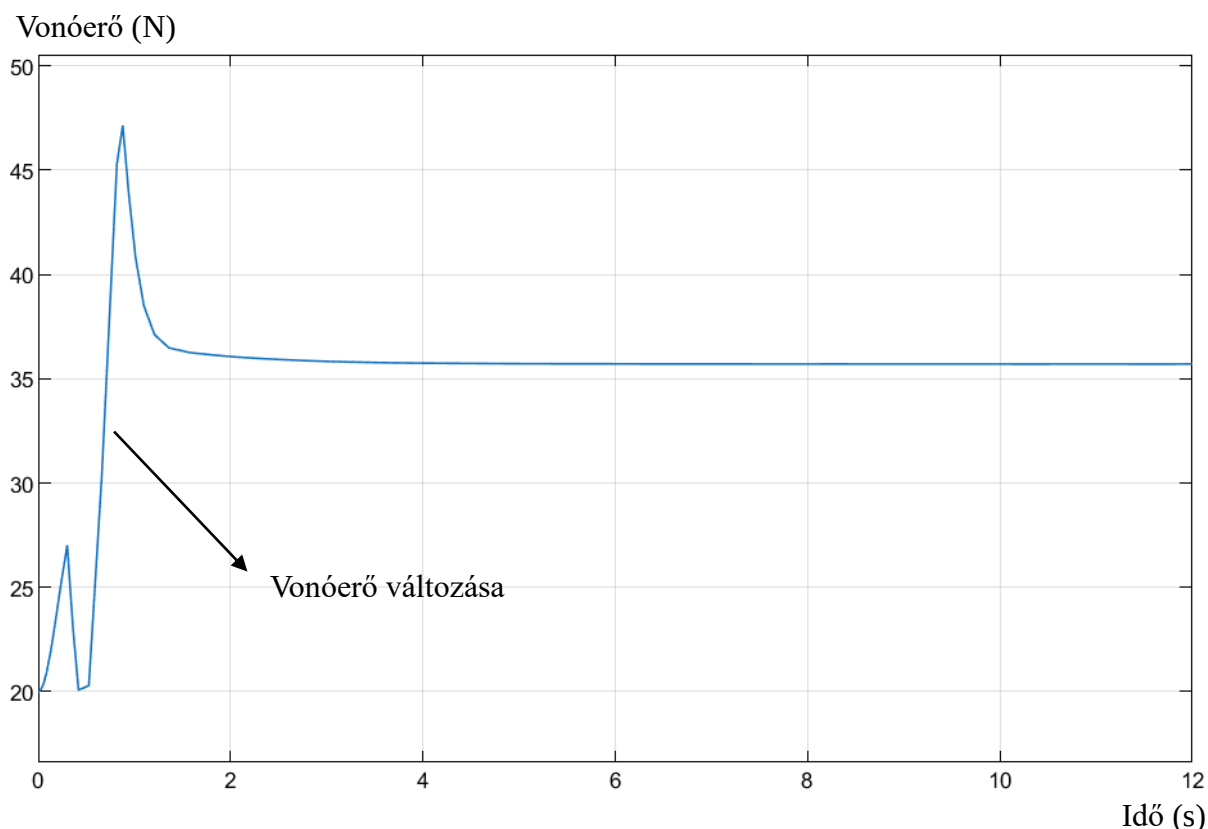
17. ábra: A szögsebesség változása az idő függvényében a leszállásnál
(Készítette a szerző)



18. ábra: Az M_f változása az idő függvényében a leszállásnál (Készítette a szerző)



19. ábra: A vonóerő-vektor irányszöge az idő függvényében a leszállásnál (Készítette a szerző)



20. ábra: A vonóerő-vektor nagysága az idő függvényében a leszállásnál
(Készítette a szerző)

A 16. ábrán látható, hogy a repülőgép fokozatosan eléri a kívánt állászsöget, azaz vízszintes helyzetbe kerül. A 16. és a 17. ábra alapján belátható, hogy ekkor a repülő szögsebessége nagyon alacsony, tehát a rendszer a zökkenőmentes leszállásra is alkalmas.

Vegyük észre, hogy a 19. ábrán látható irányszög a folyamat elején negatív értékeket vesz fel. Ilyenkor a motorokat az ellenkező irányba kell elforgatni, tehát egy ilyen konfigurációjú repülőgépet úgy kell megépíteni, hogy ez lehetséges legyen, különben a leszállási folyamatot nem lehet végrehajtani.

A leszállási folyamat után, amint a repülő első futóműve földet ér, a motorokat le lehet kapcsolni. Az elvégzett szimulációban ez nincs figyelembe véve, ezért van, hogy a 20. ábrán látható grafikon nem a nullához közelít, hanem ahhoz az értékhez, ami ahhoz kell, hogy a gravitáció ellensúlyozva legyen.

A rendszer viselkedését és a fel- és leszállás folyamatai tulajdonságainak pontos beállítását a PID vezérlő értékeinek változtatása teszi lehetővé.

4. KONKLÚZIÓ

A dolgozatban leírt, a merevszárnyú drónokkal való függőleges fel- és leszállás megvalósításáról szóló új megközelítésről egy példaként leírt repülővel készített szimulációk alapján az új módszer megvalósítható, és alkalmas lehet a jövőbeli alkalmazásra.

Ez a konfiguráció nem jelent közvetlen megkötést a szárnyak vagy a stabilizációs felületek elhelyezésére vagy méreteire, csak a motorok és a légcsavarok megfelelő mértékben való dönthetősége, illetve természetesen a tömegközéppont előtti megfelelően erős rögzítésükre van szükség. A motorok döntéséért felelős mechanika szélső állásszögeit, a dolgozatban bemutatott szimuláció alapján lehet meghatározni.

Ennek a konfigurációnak egy további előnye lehet az, hogy a futóművet kis méretűre lehet tervezni, mivel a légcsavarok a vízszintes helyzetben felfelé mutatnak. Ha a futómű kicsi, akkor aerodinamikailag kevésbé jelentős a hatása a repülésre, és nem szükséges behajthatóvá tenni, ami egyszerűbbé és könnyebbé teszi a repülőt.

Ezek mellett egy megfelelő vezérlőrendszerrel a légcsavarok forgatásának lehetőségét a repülés közben is fel lehet használni, ezzel jelentősen növelni lehet a manőverezhetőségét a repülőnek és lehetővé teheti az átesésből való visszatérést.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni Dr. Szemes Péter Tamásnak a dolgozatom megírásában nyújtott szakmai segítségét, illetve Prof. Dr. Husi Géza dékán úrnak és Farkas Oszkárnak, a DE KLGYG igazgatóhelyettesének, hogy megadták a lehetőséget, hogy a TDK-n indulhassak.

6. HIVATKOZÁSOK

- [1] B. Alzahrani, O. S. Oubbati, A. Barnawi, M. Atiquzzaman, and D. Alghazzawi, “UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 166, p. 102706, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102706>.
- [2] D. S. Vohra, P. K. Garg, and S. K. Ghosh, “Usage of Uavs/ Drones Based on Their Categorisation: A Review,” *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*, pp. 90–101, 2022, doi: <https://doi.org/10.61653/joast.v74i2.2022.27>.
- [3] Z. Fang and A. V. Savkin, “Strategies for Optimized UAV Surveillance in Various Tasks and Scenarios: A Review,” *Drones*, vol. 8, no. 5, p. 193, May 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/drones8050193>.
- [4] X. Gu and G. Zhang, “A survey on UAV-assisted wireless communications: Recent advances and future trends,” *Computer Communications*, vol. 208, pp. 44–78, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.05.013>.
- [5] M. Kezoudi *et al.*, “The Unmanned Systems Research Laboratory (USRL): A New Facility for UAV-Based Atmospheric Observations,” *Atmosphere*, vol. 12, no. 8, p. 1042, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12081042>.
- [6] D. C. Tsouros, S. Bibi, and P. G. Sarigiannidis, “A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture,” *Information*, vol. 10, no. 11, p. 349, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/info10110349>.
- [7] T. Benarbia and K. Kyamakya, “A Literature Review of Drone-Based Package Delivery Logistics Systems and Their Implementation Feasibility,” *Sustainability*, vol. 14, no. 1, p. 360, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su14010360>.
- [8] R. Chaurasia and V. Mohindru, “Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Comprehensive Survey,” *Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT)*, pp. 1–27, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119769170.ch1>.

- [9] “Raven® B Group 1 UAS | Surveillance and Reconnaissance Drone,” *AeroVironment, Inc.* <https://www.avinc.com/uas/raven>

- [10] S. Kumar, “A Brief Review on Unmanned Combat Aerial Vehicle (U.C.A.V),” *papers.ssrn.com*, May 05, 2020.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfmabstract_id=3593220

- [11] “MQ-9 UAV demonstrates enhanced automatic takeoff and landing capabilities,” *dronefromchina.com*.<http://dronefromchina.com/new/MQ-9-UAV-demonstrates-enhanced-automatic-takeoff-and-landing-capabilities.html> (accessed Jul. 16, 2024).

- [12] D. Patrascu, “U.S. Army’s Raven Hand-Launched Drone Fleet Getting Millions Worth of Upgrades,” *autoevolution*, Mar. 29, 2021. <https://www.autoevolution.com/news/us-armys-raven-hand-launched-drone-fleet-getting-millions-worth-of-upgrades-158401.html> (accessed Jul. 16, 2024).

- [13] “DASH History,” *gyrodynehelicopters.com*.
http://gyrodynehelicopters.com/dash_history.htm (accessed Jul. 30, 2024).

- [14] A. UPADHYAYA, P. . JEET, P. K. SUNDARAM, A. K. . SINGH, K. SAURABH, and M. DEO, “Efficacy of Drone Technology in Agriculture: A review,” *JOURNAL OF AGRISEARCH*, vol. 9, no. 03, pp. 189–195, Sep. 2021, doi:
<https://doi.org/10.21921/jas.v9i03.11000>.

- [15] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif, “Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review,” *Drones*, vol. 6, no. 6, p. 147, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/drones6060147>.

- [16] H. Ucgun, U. Yuzgec, and C. Bayilmis, “A review on applications of rotary-wing unmanned aerial vehicle charging stations,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 18, no. 3, p. 172988142110158, May 2021, doi:
<https://doi.org/10.1177/17298814211015863>.

- [17] F. Nex *et al.*, “UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 184, pp. 215–242, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.

- [18] *Dronetrest.com*, 2024.
<https://www.dronetrest.com/uploads/db5290/169/6641e6bc9a1675fc.jpg> (accessed Jul. 17, 2024).
- [19] G. J. J. Ducard and M. Allenspach, "Review of designs and flight control techniques of hybrid and convertible VTOL UAVs," *Aerospace Science and Technology*, vol. 118, p. 107035, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107035>.
- [20] Z. Zaludin and A. S. M. Harituddin, "Challenges and Trends of Changing from Hover to Forward Flight for a Converted Hybrid Fixed Wing VTOL UAS from Automatic Flight Control System Perspective," *2019 IEEE 9th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/icsengt.2019.8906483>.
- [21] Y. Zhou, H. Zhao, and Y. Liu, "An evaluative review of the VTOL technologies for unmanned and manned aerial vehicles," *Computer Communications*, vol. 149, pp. 356–369, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.016>.
- [22] M. Hochstenbach, C. Notteboom, B. Theys, and J. De Schutter, "Design and Control of an Unmanned Aerial Vehicle for Autonomous Parcel Delivery with Transition from Vertical Take-off to Forward Flight – VertiKUL, a Quadcopter Tailsitter," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 7, no. 4, pp. 395–405, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1260/1756-8293.7.4.395>.
- [23] A. S. Saeed, A. B. Younes, S. Islam, J. Dias, L. Seneviratne and G. Cai, "A review on the platform design, dynamic modeling and control of hybrid UAVs," *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Denver, CO, USA, 2015, pp. 806-815, doi: [10.1109/ICUAS.2015.7152365](https://doi.org/10.1109/ICUAS.2015.7152365).
- [24] "(PDF) Development of Model Predictive Controller for a Tail-Sitter VTOL UAV in Hover Flight," *ResearchGate*, doi: <https://doi.org/10.3390/s18092859>.
- [25] H. ÇAKIR and D. F. KURTULUŞ, "Design and aerodynamic analysis of a VTOL tilt-wing UAV," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 30, no. 3, pp. 767–784, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3810>.

- [26] V. Kumar, R. Sharma, S. Sharma, S. Chandel, and S. Kumar, “A Review on Design Methods of Vertical take-off and landing UAV aircraft,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1116, no. 1, p. 012142, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1116/1/012142>.

- [27] A. Misra *et al.*, “A Review on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Tilt-Rotor and Tilt Wing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs),” *Journal of engineering*, vol. 2022, pp. 1–27, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/1803638>.

- [28] *Nasa.gov*, 2015.
https://www.nasa.gov/wpcontent/uploads/2015/07/grease_lightning_5.jpg (accessed Jul. 28, 2024).

- [29] C. Lee, S. Kim, and B. Chu, “A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV,” *International journal of precision engineering and manufacturing/International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 719–743, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00489-y>.

- [30] Wingcopter.com, 2020. https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2020/07/Skyports-delivery-drone-manufactured-by-Wingcopter-in-flight-underneath-Source-Skyports_-scaled-e1594411742774.jpg (accessed Jul. 22, 2024).