

MARKOVICS ÁKOS

DIPLOMAMUNKA

FIZIKAI SZÁMÍTÁSOK ÉS BECSLÉSEK A VITORLÁZÓREPÜLÉSBEN

TÉMAVEZETŐ: DR. NÉMET BÉLA

PÉCS, 2004

BEVEZETŐ

A vitorlázórepülés mint sportág több mint százéves múltra tekint vissza. A hőskor testsúlyát-helyezéssel irányított egyszerű siklógépeitől a modern kor nagyteljesítményű vitorlázórepülőgépeinek kifejlesztéséig hosszú göröngyös út vezetett, mely rengeteg munkát és áldozatot követelt a kísérletező kedvű mérnököktől és pilótáktól. Bár a technika, az anyagtudomány nagyon sokat fejlődött ez alatt az egy évszázad alatt, a vitorlázórepüléssel foglalkozó embereket ma ugyanaz a cél vezérli mint kezdetben; a szabadon repülés vágya, a kiemelkedés a szürke, megszokott földi környezetünkből.

Én 9 éve üzemeltettem ezt a nagyszerű sportot, és ennek köszönhető érdeklődésem a repülés, és ezen belül a vitorlázórepülés fizikai háttere iránt. A diplomamunkám tárgyát képező téma szerteágazó, nagy tudásanyagot ölel fel, túlnyomórészt meglehetősen bonyolult matematikai leírásokkal tűzdelve, melyek egy fizika tanári képzés keretein túlmutatnak, ezért olyan problémák és jelenségek vizsgálatára kellett fókuszálnom, amelyek matematikai leírása nem haladja meg lehetőségeimet.

Végül úgy döntöttem, hogy olyan témára koncentrálok, melynek kidolgozásából a mindennapi életben is profitálhatók. A vitorlázó-teljesítményrepülés számításai képezik a dolgozat gerincét, hisz ezen kalkulációk a jövőbeni repüléseim során is hasznomra válhatnak. (Teljesítményrepülésen a vitorlázórepülésben a minél nagyobb távolságok, átlagsebességek, magasságok elérését értjük, melyek szoros kapcsolatban állnak abból a szempontból, hogy mindenképpen jó repülőgép-vezetést és környezetünk, eszközeink tökéletes ismeretét igénylik.) A teljesítményrepülések számításait tartalmazó fejezet előtt egy fejezet foglalkozik a vitorlázórepülés elvi lehetőségével, egy a meteorológiai háttérrel és egy másik a vitorlázórepülés aerodinamikájának alapjaival.

A dolgozatom hasznosságát javítandó egy számításokat végző számítógépes szoftvert is kifejlesztettem, mely a távrepülés előtt általában szükséges teendőket elvégzését hivatott megkönnyíteni. A programot Microsoft Visual Basic 6.0 segítségével készítettem, amely nagyon kényelmes abból a szempontból, hogy könnyen kezelhető és viszonylag kevesebb programozási nyelv-ismeretet igényel. Nem kell szakképzett programozónak lenni a használatához, és úgy hiszem egy fizika tanártól manapság elvárható a számítástechnika ilyen szintű ismerete.

A megértést könnyítendő néhány képet és grafikát is felhasználtam, melyek többsége saját készítésű, ahol nem, ott a forrást feltüntettem. Az információim forrásait, könyveket, weboldalakat ugyancsak a dolgozat végén található bibliográfiában jelöltem meg.

2.1 A vitorlázórepülés elvi lehetősége

A **vitorlázórepülés** a repülés olyan ága, mely a motoros repüléssel megegyező fizikai alapon nyugszik, azonban a repülőgépet körülvevő levegőt nem csupán közlekedésre alkalmas közegeként azonosítja, hanem annak energiáját is hasznosítani igyekszik. A motoros repülőgépek üzemanyaguk elégetésével nyert kémiai energiából táplálkoznak, a vitorlázó repülőgépek pedig motor híján kénytelenek a légkörben rejlő energiák felhasználására, amennyiben hosszabb időt kívánnak a levegőben tölteni.

Ha csupán tapasztalati oldalról vizsgáljuk a vitorlázórepülést, azt látjuk, hogy rövid ideig tartó indulási szakasz után, mely többnyire egy motoros repülőgéppel történő vontatást takar, a repülési idő tekintélyes részét a gép siklásban tölti, mely látszólag enyhén a föld felé lejtő egyszerű egyenes vonalú mozgásként azonosítható. Ha végig ez az állapot jellemezné a mozgást, a gép igen hamar földet érne. A külső szemlélő azonban azt is megfigyelheti, hogy néha a vitorlázó-repülőgép a siklást megszakítva körözni kezd és, eközben ha néha igen lassan is de magasságot nyer, spirálpályán emelkedik. A repülés ezen szakaszában a gép pilótája a légkörben helyenként megtalálható feláramlásokat igyekszik kihasználni, melyeket a szaknyelv **termiknek** nevez.

A vitorlázó-repülőgépnek vitathatatlanul szüksége van a termikekre, de ahhoz hogy pontosan megértsük miért, meg kell vizsgálnunk milyen erők hatnak rá, milyen erők hatnak általában a repülőgépekre.

2.2 A repülőgépre ható erők

ÁBRA JEREB 14.o./2.

A motoros repülőgépre és a motor nélküli vitorlázó-repülőgépre vízszintes repülésben egy kivételével ugyanazok az erők hatnak. Függőleges irányban hat rájuk a **gravitációs erő** (G), melyel egy másik erő, a szárnyakon képződő **felhajtóerő** (Y) tart egyensúlyt, valamint vízszintes irányban hat rájuk a **közegellenállási erő** (X), mely mozgásukat gátolja, fékezi. A motoros repülőgépnél a közegellenállási erővel a légcsvár által kifejtett **vonóerő** (V) tart egyensúlyt, azonban a vitorlázógép motor és légcsvár híján vízszintes repülésben folyamatosan lassul. Így első közelítésben azt mondhatjuk, hogy nyugvó levegőben a vitorlázó-repülőgép nem képes vízszintes irányú, egyenes vonalú egyenletes mozgásra.

$$Y = G$$

$$X = V$$

A megoldást az jelenti, hogy a vitorlázógép enyhén a föld felé lejtő egyenes vonalú pályán mozog. Ebben az esetben a gravitációs erő pályairányú komponense képes egyensúlyt tartani közegellenállási erővel, miközben a felhajtóerő és a közegellenállás eredője tart egyensúlyt a súlyerővel. A pálya lejtéséből adódóan a sebesség felbontható vízszintes és függőleges összetevőkre. A függőleges összetevőt **merülősebességnek** (w) nevezzük, a vízszintes összetevőt pedig az általában enyhe lejtés miatt legtöbbször azonosnak vesszük az eredeti **siklósebességgel** (v). A pálya vízszintessel bezárt szögére pedig mint **siklószög** (γ) hivatkozunk. Egyébiránt a repülőgépre ható erőkkel és ezekkel a fogalmakkal kicsit részletesebben foglalkozom később.

$$G = Y \cdot \cos \gamma$$

$$X = mg \cdot \sin \gamma$$

A fentiek alapján értelmezhető a termikék szükségessége. A vitorlázó-repülőgép állandó sebességgel repülve folyamatosan merül az őt körülvevő közegben, és csak úgy képes emelkedés-

re, ha a közegben található feláramlások sebessége meghaladja az adott sebességhez tartozó merülősebességet. Ha pusztán energetikai szempontból szemléljük a problémát, azt mondhatjuk, hogy a közegellenállás okozta energia disszipáció a légi jármű helyzeti energiájának rovására történik, és csak a légköri áramlások energiájának hasznosításával lehetséges ennek a káros hatásnak a kiküszöbölése.

2.3 A légkör energiájának hasznosítása

A levegő energiájának értelmezéséhez tisztában kell lennünk néhány alapfogalommal és törvényszerűséggel a meteorológia témaköréből is. A vitorlázórepülés számára minden jelentősebb légköri feláramlás hasznosítható, vizsgáljuk meg keletkezésük lehetséges okait.

Léteznek **termikus feláramlások**, ezek a már korábban többször említett termikek, és léteznek **orográfiai eredetű feláramlások**, mint pl. a lejtőszél és a hullám. A **termikek** a talaj felszínének eltérő felmelegedése miatt jönnek létre, míg az orográfikus feláramlások a különböző felszínformák, dombok, hegyek széláramlatokat eltérítő hatásai révén alakulnak ki. A **lejtőszél** a megfelelő pozíciójú, szélnek kitett hegyoldalokon felfelé irányuló szél, melynek függőleges komponense hasznos számunkra. Ezt a repülőgépet a hegy szél felőli oldala felett nyolcasozva vagy egyéb más pályán haladva képes kihasználni. A **hullám** a lejtőszéllel ellentétben a szél alatti oldalon, a lee oldalon alakul ki. A nagyobb hegynek nekifutó, viszonylag erősebb szél a gerinc mögött egyfajta növekvő amplitúdójú hullámmásba kezd, melynek felfele futó részei alkalmasak az emelkedésre. Noha a hullám a hegygerinctől messze, akár több tíz km-re is elnyúlhat, a gerinc közvetlen közelében a repülésre veszélyes áramlások alakulnak ki. Ezeknek a meteorológia jelenségeknek, különösen a termikeknek a magyarázatával részletesen foglalkozik a **2.5.** fejezet.

2.4 Az időjárásban rejlő lehetőségek

A kezdet kezdetén, a vitorlázórepülés hőskorában még kisebb dombokról végezték siklásukat a lelkes amatőrök, és ekkor fedezték fel a lejtőszélet, melynek segítségével viszonylag sokáig képesek voltak a levegőben maradni. Eleinte néhány perc igazi sikernek számított, de hosszú évtizedek alatt, egész pontosan 1952-re a rekord 56 órára emelkedett! Később ezt tovább fokozták és a jelenleg érvényes rekordot a magyar Vass Géza tartja 1961-es 71 órás repülésével, melyet a Hawaii szigeteken hajtott végre. Majdnem három napot töltött folyamatosan a levegőben, lejtőszélben, ami hihetetlenül nagy teljesítmény. Később a sok baleset miatt a FAI, a nemzetközi repülőszövetség az **időtartam rekordot** mint kategóriát törölte.

Mint az említett példa is mutatja, a lejtőszél nagyon stabil, ideális esetén a fennmaradás időben szinte határtalan, egyetlen hátránya, hogy térben erősen korlátozott, mivel a feláramlási zóna a lejtő közelébe koncentrálódik. Szerencsére azonban a lejtőszél gyakran hozzájárul a dombtetőről leváló termikek létrejöttéhez és így alkalomadtán a repülés termikusan folytatható.

A huszadik század elején fedezték fel a termikeket, a termikus repülésben rejlő lehetőségeket. Eleinte csak a verőfényes nyári napok kisebb termikeinek energiáját használták ki, később azonban már zivatarfelhőkbe is bemerészkedtek a bátrabbak. Az ember így elszakadhatott a lejtők világától és egyre nagyobb távokat tehetett meg. A hetvenes években már jóval 1000 km felett volt a **távrepülés rekordja** és ez manapság a kifinomultabb technikák, az időjárás biztosabb ismerete miatt csak növekszik. Egyébként a távrepülésben az igazi áttörést talán a „termiklító szemüveg” kifejlesztése jelenthetné, mellyel biztosabbá válhatna a termikek lokalizálása.

A termikus és lejtőrepülés mellett a hullámrepülés viszonylag későn, a huszadik század második felében kezdett hódítani. Mivel a hullámok igen nagy magasságra feljutnak, olykor a sztratoszférát is eléri, ezért a **magassági rekordok** szinte kizárólag így születtek az elmúlt évtizedekben. Előnye hogy megfelelő helyeken a feláramlás nagyon stabil, tágak az emelőzónák, de nagyon nehéz megtalálni a „lépcsőházat”, melyhez az út veszélyes, turbulens részeken ún. roto-

rokon keresztül vezet. Mindazonáltal nagyon népszerű módja a repülésnek, hazánkban főleg az Északi-középhegységben gyakoriak a hullámjelenségek, de megfelelő szélviszonyok mellett (túlnyomórészt ősszel és télen) a Mecsek környezetében is előfordulnak.

Látjuk mekkora lehetőségek rejlenek a vitorlázórepülésben. A sport a felvontatást leszámítva környezetbarát, hisz közvetve a Nap, a nap által keltett légmozgások energiáját használja fel, a mozgás szempontjából káros hatások ellensúlyozására.

2.5. A termikek kialakulásának folyamata

A **száraz levegő** termodinamikai tulajdonságainak vizsgálatán keresztül juthatunk el a termiképződés folyamatának megértéséhez, hisz egyes meteorológiai számításokra a termodinamika jól bevált modelljei alkalmazhatóak.

A légköri folyamatok igen gyakran adiabatikusnak vehetők, aminek oka a levegő rossz hővezető képességében keresendő. Noha a természetben az egyes légtömegek adiabatikus izolációja tökéletesen soha nem teljesül, egyes esetekben a veszteségeket elhanyagolhatjuk, különösen nagyobb térfogatok esetén, amikor pl. a keveredés csak egészen a széleken jelentős. A termikus feláramlások egyébként a légkör egészére nézve nagyon fontos szereppel bírnak, konvektív feláramlásokként a termikus energiatranszportért felelősek.

Képzeljük el egy nagyobb földterületet, mely környezetétől eltérő abszorpciós tulajdonságai miatt jobban felmelegedett a nyári erős napsütésben. A nap hosszúhullámú sugarai ilyenkor viszonylag nagyobb beesési szöggel éri a felszínt, ezért az egy négyzetméterre jutó energia ilyenkor nagyobb, mint pl. a téli időszakban. A felmelegedett terület hőmérsékleti sugárzása révén képes energiát közölni a talaj-közeli légrétegekkel. Ekkor elvileg a V térfogatú gáz állandó nyomáson tágul egy kicsit, majd mivel a tágulás miatt sűrűsége csökken, felhajtóerő kezd hatni rá és képes elszakadni a felszíntől. Innentől kezdve egy buborékká áll össze, melynek a szélein történő folyamatoktól eltekintve a gáz állapotváltozása adiabatikusnak tekinthető. Ilyen esetben a termodinamika első főtétele a következő alakban írható fel:

$$U_2 - U_1 = Q + W$$

Ahol $Q = 0$, az adiabatikus folyamatok definíciója alapján, hiszen feltételezzük, hogy nincs hőcsere. Ekkor a főtétel a következő alakot ölti, melyet egy kicsit kibonthatunk a belső energiára és a térfogati munkára ismert összefüggéseink alapján:

$$U_2 - U_1 = W$$

$$nc_v dT + p dV = 0$$

Ahol jelen esetben c_v a levegő állandó térfogaton vett moláris hőkapacitása, V_m pedig a móltérfogata. Ha az előző egyenletbe behelyettesítjük a nyomás helyére a $pV = nRT$, állapotegyenletből kifejezett nyomást, a következő kifejezést kapjuk:

$$nC_v dT + nRT \frac{dV}{V} = 0$$

Mivel a Robert-Mayer egyenlet kimondja, hogy $C_p - C_v = R$, ha ezt R helyére behelyettesítjük:

$$nC_v dT + n(C_p - C_v)T \frac{1}{V} dV = 0$$

Ekkor leoszthatunk $nC_v T$ - vel, és bevezethetjük, hogy $C_p/C_v = \kappa$ ekkor azt kapjuk, hogy:

$$\frac{1}{T} dT + (\kappa - 1) \frac{1}{V} dV = 0$$

Ezt a kifejezést integrálva, az $1/x$ alakú tagokból $\ln x$ lesz, és már nagyon közel járunk a lényeghez:

$$\ln T + (\kappa - 1) \ln V = konst.$$

Amiből következik az adiabatikus folyamatokra általánosan érvényes kifejezés, hogy:

$$\boxed{TV^{\kappa-1} = konst.} \quad (1)$$

Ha a térfogatot az állapotegyenletből kifejezzük és a V helyére behelyettesítjük, azt kapjuk, hogy:

$$T \left(nR \frac{T}{p} \right)^{\kappa-1} = konst.$$

Innen következik, hogy a következő kifejezés is konstans, aminek a reciproka is egy állandóval egyenlő:

$$T^{\kappa} \frac{1}{p^{\kappa-1}} = konst.$$

$$\boxed{\frac{p^{\kappa-1}}{T^{\kappa}} = konst.} \quad (2)$$

Ezt alakítsuk át egy kicsit úgy, hogy a T és p szorzata szerepeljen a bal oldalon és egy állandó a jobb oldalon:

$$\frac{p^{\kappa}}{T^{\kappa} p} = c$$

$$cpT^{\kappa} = p^{\kappa}$$

Ehhez κ -dik gyököt kell vonnunk és átrendeznünk, közben az állandókat új állandóban egyesíteni:

$$c_2 p^{\frac{1}{\kappa}} T = p$$

$$\boxed{p^{\frac{1}{\kappa}-1} T = konst} \quad (3)$$

Most vizsgáljuk meg egy kicsit a kitevőt, ami könnyen kedvünkre alakítható:

$$\frac{1}{\kappa} - 1 = \frac{1}{\frac{C_p}{C_v}} - 1 = \frac{C_v}{C_p} - 1 = \frac{C_v - C_p}{C_p} = -\frac{R}{C_p}$$

Ezt visszahelyettesítve megkapjuk azt az egyenletet, melyet kerestünk, az adiabaták meteorológiában használt egyenletét:

$$Tp^{\frac{R}{C_p}} = \text{áll.}$$

Nagyon gyakran C_p helyett a c_p fajhőt használják, ekkor az egyetemes gázállandó helyett az R_m fajlagos gázállandót kell a formulába behelyettesíteni, ami gyakorlatilag csak annyi módosítást jelent, hogy nem mólokra, hanem tömegegységekre vonatkoztatunk. Ekkor ez lesz a képletünk immár végleges alakja:

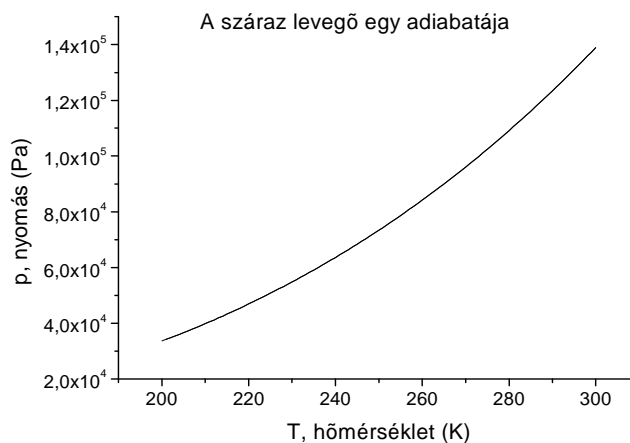
$$Tp^{\frac{R_m}{c_p}} = \text{áll.} \quad (4)$$

A következő kis táblázatban a száraz levegő használatos gázállandóit foglaltam össze

Fleagle és Businger nyomán (1963)

Gáz	R_m (J/gK)	c_p (J/gK)	c_v (J/gK)	c_p/c_v
Száraz le-	0,2870	1,005	0,718	1,402

Microcal Origin segítségével ábrázoltam a normál állapotú (10^5 Pa, 273 K) levegő adiabatáját a (4) egyenlet segítségével a konstans kiszámítva és $p(T)$ -t kifejezve:



Már ismerjük a nyomás és a hőmérséklet közötti függvénykapcsolatot, már csak a számunkra legfontosabb számítás van hátra, meg kell határozni az emelkedő levegő hőmérsékletének magasságfüggését. Ezt még közvetlenül nem tudjuk, előbb a nyomás magasságfüggését kell meghatározunk és azt az adiabaták egyenletével valahogy összekapcsolni.

A nyomás magasságtól való függését a jól ismert **barometrikus magasságformula** írja le, mely a következő egyszerű módon származtatható. Tekintsünk egy vékony gázréteget melyben felfelé haladva a nyomás infinitezimális megváltozása, ha a sűrűséget állandónak tekintjük, így írható le:

$$dp = \rho g dh$$

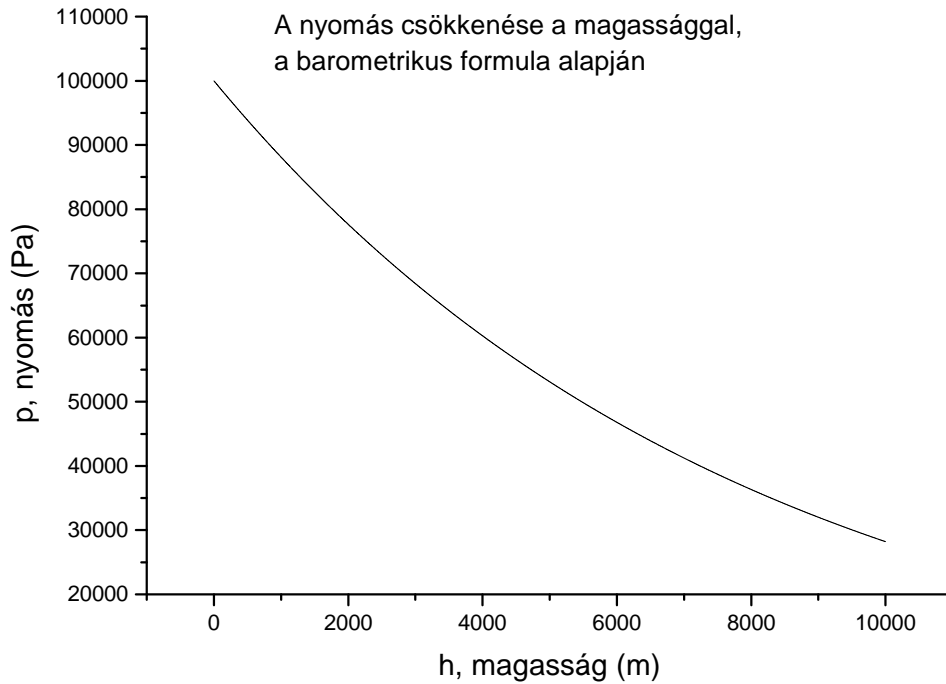
$$\frac{\rho}{p} = \text{áll.} \Rightarrow \rho = \frac{p}{p_0} \rho_0$$

Ebből a következő szeparábilis differenciálegyenlet származik:

$$dp = -\frac{p}{p_0} \rho_0 g dh$$

Ez egyszerűen integrálva megoldható és ekkor kapjuk a **barometrikus magasságformulát**:

$$p(h) = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}} \quad (5)$$



Példa: Nézzük meg, most hogy már van összefüggésünk a nyomás magasságfüggésére(5) és a nyomás és a hőmérséklet közötti kapcsolatra (2), hogy mennyit hűl az emelkedő levegő miközben a földfelszínről 1000m magasságba jut.

$$T=273K$$

$$\rho_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

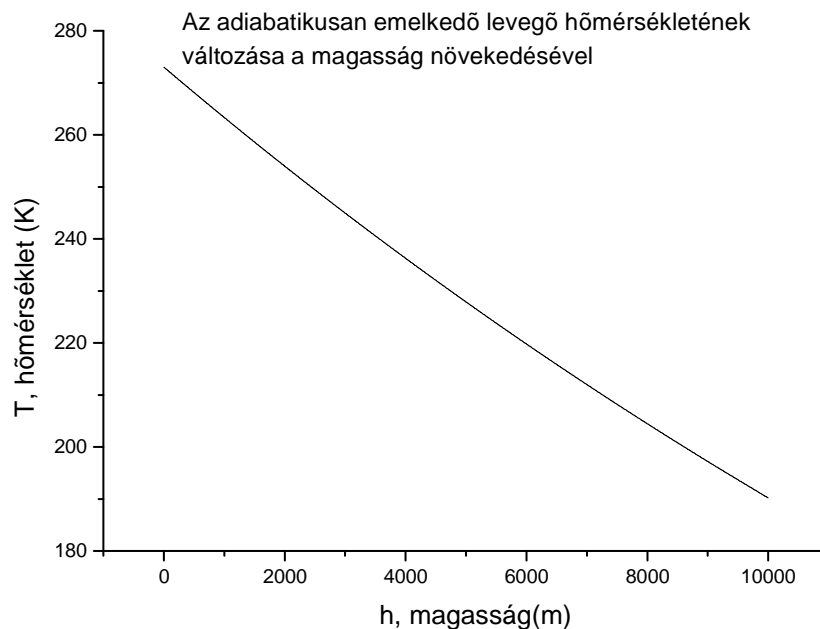
$$h = 1000 \text{ m}$$

$$p(1000) = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}} = 0,88 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\frac{p^{\kappa-1}}{T^\kappa} = \text{konst} \Rightarrow \frac{p(1000)^{\kappa-1}}{p_0^{\kappa-1}} T_0^\kappa = T(1000)^\kappa$$

$$\frac{p(1000)^{\kappa-1}}{p_0^{\kappa-1}} = (0,88)^{\kappa-1} = 0,95 \Rightarrow T(1000)^\kappa = \sqrt[\kappa]{0,95} \cdot T_0 = 263K$$

Tehát a levegő az 1000m emelkedés alatt megközelítőleg 10K-el lett hidegebb. Ebből definiálható az ún. Γ **száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens**, mely megmutatja hogy az adiabatikusan emelkedő levegő, melyben kondenzáció még nem történt adott magasságot emelkedve mennyivel hűl le. Ez általánosan száraz levegőre: 10K/1000m, pontosabban számolva 9,76K/1000m de a meteorológiában gyakran így adják meg, hogy 0,976°C/100m.



Látható, hogy a változás nem lineáris, de a vitorlázórepülésben jelentősnek számító alsó pár ezer méteres tartományban nyugodtan közelíthető egyenessel, melynek a meredeksége a gradiens. $\Gamma = 1^\circ\text{C}/100\text{m}$, megközelítőleg.

$$T' = T_0 - \Gamma \cdot \Delta h$$

$$\Gamma = \frac{dT}{dh} \approx 1^\circ\text{C}/100\text{m}$$

Mégis mi a jelentősége a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiensnek? A termikek mozgásának dinamikájára, jellegére következtethetünk belőle. Vizsgáljuk meg a levegő vertikális mozgását, határozzuk meg a gyorsulását. Ahhoz, hogy megkaphassuk a levegő függőleges gyorsulását, a nézzük meg, hogy mekkora felhajtóerő hat V térfogatú levegőre:

$$F = (\rho - \rho')Vg$$

Ahol ρ a környezet ρ' pedig a térfogatban lévő levegő sűrűsége. Ennek felhasználásával, Newton II. alapján a légtömeg vertikális gyorsulása:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{(\rho - \rho')Vg}{\rho'V} = \frac{(\rho - \rho')}{\rho'} g$$

Mivel $p = p'$, ezért a sűrűség és a nyomás között kapcsolatot teremtő összefüggés alapján a gyorsulás képlete így alakítható tovább:

$$\frac{\rho}{p} = \text{áll.} \Rightarrow a = \left(\frac{T' - T}{T} \right) g$$

Itt T' a földtől elemelkedett levegőbuborék hőmérséklete, T a környezet hőmérséklete. Ezeknek a hőmérsékletfüggés így írható le, ha bevezetjük a γ -t mint környezeti hőmérsékleti gradienst.

$$T' = T_0 - \Gamma \Delta h$$

$$T = T_0 - \gamma \Delta h$$

Ezt a két kifejezést helyettesítsük be a gyorsulásra kapott képletbe és ekkor a következő eredményre jutunk:

$$a = -\frac{g\Delta h}{T}(\Gamma - \gamma)$$

Mivel a $g\Delta h$ mennyiséget szokták geopotenciálnak is nevezni, jelölhetjük pl. Φ - vel,

$$a = -\frac{\Delta\Phi}{T}(\Gamma - \gamma)$$

Ebben a kifejezésben jelenik meg az ún. statikus stabilitás, mely az egységnyi geopotenciálra jutó gyorsulását adja meg a süllyedő levegőnek:

$$s = -\frac{1}{T}(\Gamma - \gamma)$$

Hogy ennek mi a kézzelfogható jelentése azt egy gondolat kísérlettel szemléltethetjük. Képzeljünk el egy kiterjedt légbuborékot, melyet olyan környezetben indítunk el fölfelé, ahol a környezet hőmérséklete a magassággal sokkal lassabban csökken mint a sajátja az adiabatikus tágulás révén. Igen hamar azonos hőmérsékletű lesz a buborék környezetévé és ezáltal nem lesz további sűrűségkülönbség, mely a felfelé mozgást okozta. Ez stabil légállapotot jelent, nem valószínűk a jelentősebb feláramlások, a termikek nem jutnak magasra.

Képzeljünk el a fentiek fordítottját. A buborék haladjon olyan légkörben felfelé, ahol a gradiens nagyobb mint a száraz adiabatikus gradiens. Ekkor kis emelkedés után is már nő a hőmérsékletkülönbség a buborék és környezete közt, ami a sűrűségek további távolodását, a felhajtóerő növekedését jelenti. Ez a labilis légállapot, ilyenkor erősek a termikek, gyakran egymás után dobja ki a talaj a termikbuborékokat, melyek termikkéménnyé állhatnak össze, akár zivatarok is előfordulhatnak.

Ezen a két eseten kívül természetesen létezik egy harmadik indifferens eset is, mikor a két gradiens megegyezik. Végeredményben egyszerű termodinamikai megfontolások révén megtaláltuk a termikek kialakulásában rejlő fizikát, de nem foglalkoztunk azzal, hogy mi zajlik a légkörben valamivel nagyobb magasságban.

2.6 A nedves adiabatikus folyamatok, a felhők keletkezése

Eddig csak és kizárólag száraz levegőt vizsgáltunk, és a fenti törvényszerűségek csak addig érvényesek, míg a levegőben kondenzációs folyamat nem történik. A kondenzáció azért indul meg, mert a levegő adott hőmérsékleten, csak meghatározott mennyiségű vízgőzt képes magában tartani. Ez alapján, ha a levegőben a vízgőztartalom ismert, meg tudjuk határozni azt a hőmérsékletet, ahol telítődés következik be, ahol elkezd a felesleg lecsapódni. Ezt a hőmérsékletet **harmatpontnak** nevezzük. Ha egy feláramlás során a levegő a harmatpontja alá hűl, a felesleges vízgőz kicsapódik és az égbolton egy kis felhőpamacs jelenik meg mely a folyamat intenzitásá-

tól és a légkör állapotától függően gomolyfelhővé, tornyos gomolyfelhővé vagy szélsőséges esetben akár zivatarfelhővé is alakulhat.

A felhő kialakulásának energetikája miatt, a felhőben tovább emelkedő termik már nem a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens szerint hűl tovább, hanem kicsit másképp. Érdekes megvizsgálunk ezt a folyamatot is, noha a vitorlázórepülés szempontjából kevésbé fontos. Létezik felhőrepülés, de a termikus repülések túlnyomó többsége a felhőalapig (a kondenzáció szintjéig tart).

A kondenzáció megindulása után sem történik hőcsere az emelkedő levegő és környezete közt, legalábbis feltételezéseink szerint, ezért az ilyen folyamat is adiabatikus. A különbség az ilyen nedves adiabatikus folyamatok és a száraz adiabatikus folyamatok közt, hogy figyelembe kell vennünk a kondenzáció miatti ún. **látens hő** felszabadulását. Emiatt a termodinamika első főtételét a következő alakban alkalmazhatjuk:

$$c_v dT + pdV - Ldm_s = 0$$

Ahol L az ún. látens hő, m_s a kondenzálódott víz tömege. Innen a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens a $dp = \rho g dh$ hidrosztatikai egyenletet és az állapotegyenlet differenciális alakját felhasználva most nem részletezett módon kifejezhető:

$$\Gamma_s = \frac{\Gamma}{1 + \frac{L}{c_p} \frac{dm_s}{dT}}$$

Ahol Γ a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens. Amit érdemes a nedves adiabatikus folyamatokkal kapcsolatban megjegyezni, hogy a dm_s/dT hányados emelkedő és hűlő levegőben pozitív, mivel egyre több vízgőz csapódik ki, energia felszabadulása mellett, ezért a gradiens a száraz adiabatikusnál mindig kisebb. Ez a harmatpont felett hozzájárul a feláramlási sebesség növekedéséhez, s ezzel magyarázható a zivatarfelhőkben és közelükben tapasztalható erős turbulencia is.

Mint már említettem a fejezet elején is, a termikekkel kapcsolatos számítások egy a valóság alapján megalkotott modellre vonatkoznak, mely modell feltételezi a hőcserementességet a feláramlás teljes időtartama folyamán. A valóságban a folyamatok nem pont így zajlanak, hisz elég jelentős a termikek szélén fellépő keveredés, mely során hő kerül a környezetbe. A témakörrel foglalkozó meteorológusok megállapították, hogy a tökéletesen adiabatikus állapotváltozást legjobban a zivatarfelhők belsejében található heves fel és leáramlások közelítik, a nagy sebesség miatt, mely a hőcserét akadályozza.

Érdekes abba is belegondolnunk, hogy mi történik az általunk vizsgált légcellával nagyobb magasságokban. Természetesen még labilis időjárási helyzet esetén sem folytatja útját minden határon túl, hisz ennek több akadálya is van. Egyik legfontosabb a már említett keveredés, mely mint a magára hagyott testnél a sűrűlódás, folyamatosan energiát von el a vizsgált rendszerünktől. A másik akadálya, hogy a sztratoszférában a hőmérséklet nőni kezd a magassággal és így a célánk hamar saját hőmérsékletével egyező hőmérsékletű levegőben találja magát, ami nem kedvez további emelkedésének.

Röviden áttekintettük a vitorlázórepülés alapvető folyamatainak értelmezéséhez szükséges meteorológiát. Igyekeztem a jelenségek fizikai tartalmát megragadni, a teljesség igénye nélkül. A meteorológia nagyon szerteágazó és kifinomult tudomány, rengeteg érdekességet ír le, a fizikának édestestvére, de a vitorlázórepülés szempontjából a termikek képződése és a száraz adiabatikus folyamatok a meghatározóak.

Ha arra vállalkoznék, hogy precíz matematikával leírjam a vitorlázórepüléssel kapcsolatos összes aerodinamikai jelenséget, azt hiszem túl nagy fába vágnam a fejszém. Meglehetősen bonyolult matematikai apparátusa miatt a fizikának ezen ága tényleg csak az erre specializálódott mérnökök számára igazán megközelíthető. A felhalmozódott rengeteg ismerettel a téma szakemberei már jónéhány könyvet megtöltöttek, s könyvtári kutatásaim során szembesültem azzal a ténnyel, hogy ha például csak a vitorlázó-repülőgép szárnyának csatolt rezgéseit leíró egyik formulát szeretném levezetni, mely egy szűk határterülete csupán az aerodinamikának, már az jócskán meghaladná ennek a dolgozatnak a terjedelmi kereteit. Másrészt az egyetemi tanulmányaim során, a mechanika kurzuson kívül aerodinamikai képzésben nem részesültem. Éppen ezért kicsit a tapasztalat, és a jól bevált modellek oldaláról igyekszem megközelíteni a kérdést.

3.1 A folyadékok áramlása

Elsőként az áramlásokat vizsgálva, az ideális súrlódásmentes folyadékok áramlásával kell foglalkoznunk, hisz a levegő mely a vitorlázó-repülőgép szárnyait körüláramolja, sok esetben ehhez hasonlóan viselkedik.

Az áramló folyadék által kitöltött térben egy $v = v(x, y, z, t)$ vektortér alakul ki, melyet **sebesség-térnek** nevezünk, és **áramvonalakkal** tudunk szemléltetni. Az áramvonalakhoz húzott érintő a tér minden pontján megmutatja a sebesség ottani irányát. Ez hasonlatos az erőterek erővonalakkal történő szemléltetéséhez. Az áramló folyadéknak értelmezhetjük a forgó mozgását is, melyet örvénynek hívunk. Az örvényt az örvényvektor jellemzi:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot} \vec{v}$$

Az **örvényvektor** iránya a forgástengelyt, nagysága a rotációs mozgás szögsebességét adja meg. Ezek alapján egy **örvényteret** is rendelhetünk az áramlási térhez, melyet önmagukba záródó **örvényvonalakkal** szemléltethetünk.

Az áramlások felosztása:

- **Örvényes vagy örvénymentes áramlás:** Aszerint, hogy a folyadék részecskék végeznek-e forgó mozgást vagy sem.
- **Stacionárius vagy időben változó áramlás:** Aszerint, hogy a sebesség, a nyomás és a sűrűség függenek-e expliciten az időtől.
- **Inkompresszibilis és kompresszibilis** folyadékok áramlása: Aszerint, hogy a folyadék összenyomható vagy sem.

3.2 Az áramlások mozgásegyenletei:

A súrlódásmentes áramlások mozgásegyenletei a deformálható testek egyenleteiből következnek, mégpedig oly módon hogy a feszültségi tenzor helyett a nyomást vesszük figyelembe. Általánosan az **Euler féle egyenletek** vektoralakja írja le a mozgást

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \text{ grad}) \vec{v} \right) = \vec{F} - \text{grad } p$$

amelyben a sebességek, a nyomás és sűrűség ismeretlen, bár a nyomás és sűrűség között kapcsolat található. Ezért további feltételek megfogalmazása szükséges a hidrodinamikai problémák megoldásához. Ez a **kontinuitási egyenlet**, mely matematikai formáját is és a problémát tekintve is hasonlatos az elektromosságban ismert töltésmegmaradás törvényéhez:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0$$

Az egyenlet azt fejezi ki, hogy amennyiben egy térfogatelembe beáramló és az abból kiáramló folyadék mennyisége közt nincs egyensúly, az minden bizonnyal a folyadék sűrűségének megváltozásával jár együtt. Ennek az egyenletnek egy egyszerűbb formáját kapjuk, ha összenyomhatatlan közegre alkalmazzuk. Belátható, hogy inkompresszibilis esetben, az áramerősség állandó, mivel a sűrűség nem változhat. Ez így fogalmazható meg:

$$I = Av = \text{áll.}$$

Praktikusan, ha az áramcsőbe egy szűkítőt helyezünk, akkor ott az áramlási sebességnek meg kell nőnie, hogy az áramerősség állandó maradjon. Az Euler féle egyenletek integrálása nem könnyű feladat és nem is mindig lehetséges. Speciális feltételek teljesülése mellett tudunk csak hasznos, a gyakorlatban felhasználható egyenleteket kifejezni belőle. Amennyiben örvénymentes és stacionárius az áramlásunk, a térerősség potenciállal bír és a folyadék homogén és kompresszibilis, akkor a **Bernoulli-féle egyenletet** kaphatjuk meg:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + U = \text{konst.}$$

Ha a tömegerő csak a nehézségi erő, akkor egy ilyen alakra is hozhatjuk az egyenletet:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{konst.}$$

Ez egy nagyon fontos egyenlet, mert segítségével a későbbiekben meg tudjuk indokolni a felhajtóerő keletkezését, a repülőgép szárnyának speciális kialakítását. Az egyenlet alakjában az első tag a **statikus nyomást** jelenti a második tag az ún. **torlónyomás**, míg a harmadik tag a **hidrosztatikai nyomás**. Amennyiben a földi erőterben síkban vizsgálódunk, a harmadik tag elhagyható. Az egyenlet azt fejezi ki, hogy a amennyiben az áramlás sebessége megnő, úgy a statikus nyomása a közegnek lecsökken.

A **súrlódó folyadékok** és gázok esetében az Euler féle egyenletek helyett a **Navier-Stokes** egyenleteket használjuk, melyek a hidrodinamika legáltalánosabb egyenletei. Ezeknek összefoglalt vektoralakja a következő:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \operatorname{grad}) \vec{v} = \rho \vec{F} - \operatorname{grad} p + \eta \Delta \vec{v} + (\eta + \eta') \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}$$

Ahol η az ún, dinamikai viszkozitás. Inkompresszibilis esetben $\operatorname{div} \vec{v} = 0$ miatt az utolsó tag kiesik és így kis átalakítással a súrlódó inkompresszibilis folyadékok dinamikai alapegyenlete:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \operatorname{grad}) \vec{v} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v}$$

A Navier–Stokes egyenlet, hasonlóan az Euler-féle egyenlethez, nem túl fontos számunkra gyakorlati szempontból. A bonyolult differenciálegyenletek megoldása, megfelelő matematikai apparátust igényel, de általában nagyon hasznos megoldások vezethetőek le belőlük.

A sűrűdéses áramlásokkal kapcsolatban fontos beszélni a lamináris és a turbulens áramlásokról. A **lamináris áramlások** más néven réteges áramlások, párhuzamos áramvonalrendszerrel rendelkeznek. Az áramlás és a bele helyezett test vagy az őt körülvevő cső fala közt a sebesség egy bizonyos profil mentén változik. Azt hogy a fal közvetlen közelében az áramlás sebessége mennyivel kisebb, mint az áramlás zavartalan részein, az áramló közeg viszkozitása határozza meg. Az ilyen lamináris esetben alkalmazható a Hagen – Poiseuille törvény, melynek kísérletileg meghatározott formája kicsit Ohm törvényére hasonlít, ha a következő alakban írjuk fel.

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{p_1 - p_2}{\frac{8\eta l}{r^4 \pi}}$$

A számlálóban az áramcső két vége közti nyomáskülönbség látható, mely az elektromos feszültséggel analóg, a nevezőben a csőre és a folyadékra jellemző állandók (r - a cső sugara, l - a cső hossza, η - a folyadék viszkozitása), melyek az ellenálláshoz hasonlatos egységet képeznek. Hiszen pl. az ellenállás is felírható teljesen hasonlóan $R = \rho l / A$ alakban. Persze a Hagen-Poiseuille törvény nem teljesül mindig. Érvényét veszti, amint a folyadék közepes sebessége egy kritikus értéket meghalad. Ilyenkor átalakul az áramlás képe és a sima réteges szerkezet helyett bonyolult gomolygó alakot ölt. Az ilyen áramlást **turbulens** áramlásnak nevezik. A kritikus sebesség,elynél a változás történik:

$$v = \text{Re} \frac{\eta}{\rho r} \Rightarrow \text{Re} = \frac{\rho r v}{\eta}$$

Ahol az Re az ún. Reynolds-szám, mely ha 1160 feletti értéket vesz fel, az adott áramlás turbulenssé válik.

3.3 A hidrodinamikai ellenállás és felhajtóerő

A sűrűdő közegekben a sűrűdés miatt örvények keletkeznek. Elég ha a mindennapi életben szerzett tapasztalatainkra vesszük elő, és pl. az evezőlapát mögött megjelenő örvényekre gondolunk. Az örvények keletkezése úgy magyarázható, hogy a testeket kikerülni igyekvő áramlás a testek mögött egyesülni szeretne, azonban a test felületének közvetlen közelében a sűrűdés olyan nagy, hogy felemésztí a részecskék mozgási energiájának nagy részét. Ezen a részen az áramvonalak, ahogy kerülni igyekeznek az akadályt sűrűsödnek, és a nyomás lecsökken. (Bernoulli - törvény) A részecskék a test mellett a sűrűdés miatt megállnak egy pillanatra, majd a csökkenő nyomás irányába a test felé indulnak. Ez indítja el a rotáló mozgást.

A testek mellett mindig két örvény alakul ki egyszerre, az átellenes oldalakon. A két örvény rotációja ellentétes. Az örvények sorra egymás után válnak le, felváltva az egyik és a másik oldalról és ún. örvényút alakul ki. Gondoljunk csak a zászló lobogására, mely ily módon értelmezhető. Kármán Tódor volt az aki ezeket az örvényeket mélyrehatóbban vizsgálta, és megállapította, hogy akárhogy válnak le az örvények, csak a fent leírt esetben stabil az örvénytér, vagyis ha felváltva szakadnak le a testről. (Kármán féle örvénysor)

A testek az örvények kialakulása miatt a lamináris áramlásokhoz képest sokszorosan nagyobb közegellenállással találkoznak ilyen esetekben, melynek oka, hogy az örvények kialakulása energiát emészt fel. A közegellenállási erő a gyakorlatban leginkább a következő alakban számolható:

$$X = c_x \frac{\rho}{2} v^2 A$$

ahol c_x a test alakjától függő alaki ellenállási tényező, A pedig a test áramlással szemben mutatott homloklapfelülete. Kísérletileg megállapították, hogy azonos homloklapfelület esetén, az áramlásra merőleges síklap közegellenállása a legnagyobb és a csepp alakú testeké a legkisebb. A fenti ún. négyzetes ellenállási törvény mint látni fogjuk, a vitorlázórepülés szempontjából is kiemelkedő fontosságú.

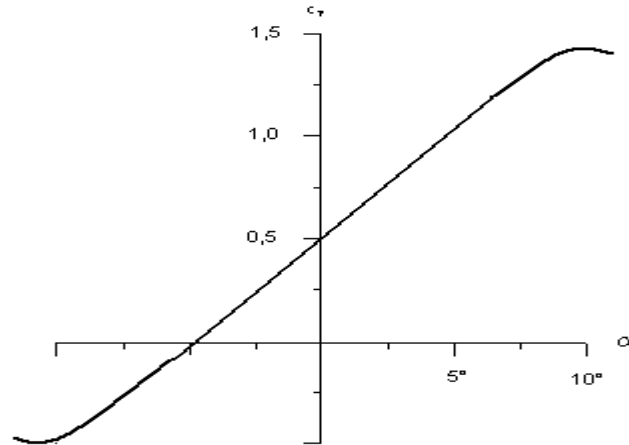
Az aerodinamikai vagy a hidrodinamikai felhajtóerő keletkezése is az örvények keletkezésével magyarázható. Tekintsünk egy végtelen terjedtségű szárnyat, mely valójában nem létezik, hisz a szárnyak fesztávolsága a legnagyobb vitorlázógépek esetében sem haladja meg a 30 métert, de elméletben az ilyen szárny körül nem keletkeznek olyan zavaró örvények, melyek a jelenség leírását zavarják. A repülőgép indulásakor a szárny körül lamináris áramlás igyekszik kialakulni, azonban a profil kialakítása miatt a szárny ún. kilépőéléhez alulról és felülről érkező részecskék sebessége között különbség van. A sebességkülönbség Bernoulli törvénye alapján nyomáskülönbséget okoz, ami az áramlás eltérülését és egy felfelé csavarodó örvényt kelt a kilépőél mögött. A cirkuláció azonban a tapasztalatok alapján megmaradó mennyiség, ezért egy másik, ellentétes forgásirányú örvénynek is kell keletkeznie, mely a profil kialakítása miatt kénytelen azt körüláramolni. Így a szárnyprofil körül egy állandó stabil örvény alakul ki, amely az áramlás sebességére szuperonálódik. Emiatt az áramlás sebessége a profil felett nagyobb lesz, mint a profil alatt. A profil felett így a statikus nyomás erősen lecsökken, a profil alatt pedig egy kicsit megnő. Az alul és felül ható nyomások a felületekre nyomóerőket fejtenek, melyek eredője lesz a tapasztalható felhajtóerő. A felhajtóerő a fent tárgyalt ellenállástörvényhez hasonló alakban írható fel:

$$Y = c_y \frac{\rho}{2} v^2 A$$

ahol c_y a profilra jellemző ún. felhajtóerő-tényező, A a szárny felülete, vagy pontosabban csak az alapterülete. A repülésben, éppen azért hogy a problémák leegyszerűsödjenek, a felhajtóerő és a közegellenállás meghatározásakor egyaránt a repülőgép szárnyfelületére vonatkoztatnak, tehát az ellenállás képletében nem a homloklapfelület szerepel.

3.4 A felhajtóerőt befolyásoló tényezők

Kísérletileg vizsgálva megállapították, hogy a felhajtóerő nagysága a szárnyfelülettől, a közeg sűrűségétől, az áramlási sebességtől és a felhajtóerő tényezőtől függ. Azonban fontos tudni, hogy a felhajtóerő tényező nem egy állandó értékű jellemzője a szárnyprofilnak, mivel ebbe belesűrítettek az áramlással kapcsolatos jónéhány olyan paramétert, melyek számolása nehézkes. Valójában a felhajtóerő-tényező a szárnyprofil áramlással bezárt szögének függvénye, melyet manapság már a megfelelő szakemberek a megfelelő módszerekkel számítani is tudnak, de régebben mérések során határozták meg. A következő ábra mutatja, hogy egy hagyományos kialakítású profilnál, mely felül íveltebb, a felhajtóerő-tényező így függ a profil áramlással bezárt ún. állásszögétől:



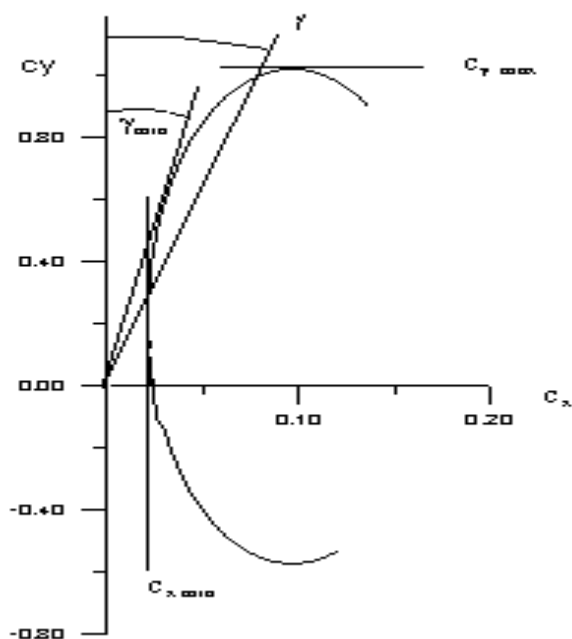
Tehát látható hogy 0° esetén is kapunk felhajtóerőt, de ahogy növeljük az állásszöget a felhajtóerő-tényező növekszik. Egy darabig a növekedés lineáris, majd elér egy maximumot és letörik. Ilyenkor a szárnyról leválik az áramlás, mögötte nagyobb örvények keletkeznek, s ez okozza a felhajtóerő drasztikus csökkenését. Amikor ez repülés közben történik, a repülőgép hirtelen relatíve sokat veszít magasságából, egy időre nehezen irányíthatóvá válik. Ezt a repülés szempontjából kellemetlen, veszélyes és épp ezért kerülendő jelenséget szaknyelven átesésnek nevezik. Az előzőekből következik az a tény, hogy létezik minden repülőgépnek egy minimális sebessége, melynél lassabban haladni nem tud. Mekkora a minimális sebesség? Ezt könnyen kiszámíthatjuk, hisz nyilvánvaló, hogy a repülőgép felhajtóereje a vízszinteshez közeli pályákon végzett egyenes vonalú mozgások során közel állandó ($Y \approx mg$). Az állandó felhajtóerőt előállítani a sebesség csökkentése mellett csak úgy lehet, ha az állásszöget megnöveljük és ezáltal a felhajtóerő-tényező értéke is nő. A minimális sebesség így a maximális felhajtóerő-tényezőhöz esik. Tehát az Y -ra kapott képletet átrendezve $Y = mg$ -t feltételezve a minimális sebesség:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2mg}{c_{y\max} \rho A}}$$

A felhajtóerő-tényező állásszögfüggését mutató ábrára visszatérve, jól láthatjuk hogy elég nagy negatív állásszögek tartományában a felhajtóerő-tényező negatív értékeket vesz fel. Vagyis az erő lefelé irányul. Ennek hasznosítása pl. műrepülés során lehetséges, így tudnak a repülőgépek háton is repülni, bár feltétlenül meg kell jegyezni, negatív állásszögeknél kisebb légerők ébrednek a szárnyon, mint ugyanakkora pozitív állásszögeknél. Azonban azt is észrevehetjük, hogy a nulla felhajtóerőt nem nulla fokos állásszögnél, hanem a negatív állásszögek tartományában kapjuk. A szimmetrikus kialakítású profilkon ezen jelenségek alól kivételt képeznek, a pozitív és a negatív állásszögek tartományában egyforma tulajdonságokat mutatnak.

Érdekes, de nem annyira meglepő dolog, hogy a profil ellenállása is változik az állásszöggel. Nyilván az állásszög növekedése kedvez az örvények növekedésének, másrészt az áramlás felé mutatott homlokfelülete is nő a szárnynak. Mivel a két tényező változás összefügg, ezért a leggyakrabban az ellenállástényező változásának a függvényében szokták ábrázolni a felhajtóerő-tényezőt. Az így készült diagramot Lilienthal-féle polárdiagramnak nevezik, és a következő ábránkon látható:

Lilienthal féle polárdiagram



Nagyon gyakran egyéb tényezőket is feltüntetnek az ilyen polárdiagramokon, de ezektől most eltekintünk, inkább vizsgáljuk meg ábránk jellegzetes pontjait. A görbe legfelső részéhez húzott vízszintes érintő a profil maximális felhajtóerő-tényezőjét adja meg, hasonlóan egy függőleges helyzetű érintővel a minimális ellenállás-tényező értékét is megkaphatjuk. Az ábrán feltüntetett szögek az ún. siklószöveget adják meg különböző esetekben, erre rövidesen visszatérek.

Az eltérő profilok eltérő polárdiagrammal rendelkeznek. A diagram alakját, a profil jóságát, befolyásolja a profil íveltségétől kezdve, annak orrgörbületi sugarán át rengeteg tényező, melyekre most nem kívánok kitérni, de a következő ábrán néhány diagramot megtekinthetünk.

A vastagabb és az íveltebb profilok általában nagyobb felhajtóerőt adnak, mint a vékony szimmetrikus profilok, a tompább orrkiképzésűek kellemeesebb átesési tulajdonságokkal bírnak a hegyesebb orrúaknál. Ezek alapján valószínűleg a tompa, vastag és ívelt profilt választanánk, azonban ennek az ellenállás-tényezője kicsit nagyobb minden tartományon, emellett egy rossz tulajdonsága, hogy nagy a nyomásközéppont-vándorlása, ami azt jelenti hogy nagyobb sebességeknél a felhajtóerő támadáspontja nagyon előre kerül, megnehezítve a gép vezetését. Látjuk, hogy a célnak megfelelő profil kiválasztása sem egyszerű feladat, hisz amit nyerünk a réven, elveszítjük a vámon. Annyit azonban leszögezhetünk, hogy a vitorlázórepülésben a cél minél nagyobb felhajtóerő előállítása, minél kisebb közegellenállás mellett. Erre a modern repülőgépeknél olyan profilokat igyekeznek alkalmazni, melyeknél az áramlás sokáig lamináris marad a szárnyfelülete mentén és csak viszonylag hátrébb vált át turbulens áramlásba. Ezek az ún. lamináris profilok teszik lehetővé a nagy teljesítmények elérését.

3.5 A véges terjedtségű szárny

Az eddig elmondottak teljes mértékben csak a végtelen terjedtségű szárnyakra érvényesek. Véges terjedtségű esetben, a szárny körül bonyolultabb térbeli áramlás alakul ki, melyet a következő ábra szemléltet.

ÁBRA

A szárny két oldala közötti nyomáskülönbség igyekszik kiegyenlítődni a szárnyvégeken, ebből kifolyólag az alsó oldalon a szárny vége felé, a felső oldalon a törzs felé tart egy kicsit az áramlás. Ez a kilépőél mögött kisebb örvényeket vált ki, a részecskék sebességvektorainak különbözősége miatt. Emlékezzünk vissza, hogy itt a felhajtóerőt létrehozó cirkuláció örvényei is jelen vannak, ezért elég bonyolult helyzet alakul ki, melyet igazán csak az old meg, hogy a szárnyvégeken jelentkező hatalmas kiegyenlítődésként okozta nagy méretű örvények ezt a szárny mögötti örvénysort egyszerűen felcsavarják. Ezeket a szárnyvégi örvényeket indukált örvényeknek nevezzük, s az indukált ellenállás társítható velük. Az indukált örvények mérete, erőteljessége a felhajtóerő nagyságától függ és így természetesen a polárgörbe alakját is befolyásolja.

Ábra

Az indukált örvények jelenléte miatt a felhajtóerő eloszlása a szárny fesztávolsága mentén nem egyenletes, hanem elliptikus. Minél karcsúbb a szárny, minél nagyobb a fesztávolsága a profil húrhosszához képest, annál nagyobb az ún. oldalviszonya. A nagy oldalviszonyú szárnyak jobban hasonlítanak a végtelen terjedtségű szárnyakra, ezért az indukált ellenállás kedvezőbben alakul körülöttük. A nagyon nagy oldalviszonyú szárnyak alkalmazása mégis azért kerülendő, mert kisebb állásszögnél esnek át, földön gurulás közben könnyebben elérhetik a földet, egyszóval vezetési szempontból kellemetlenebb tulajdonságokat mutatnak.

3.6 A teljes repülőgép polárgörbéje

Amennyiben nem végtelen terjedtségű szárnyat vizsgálunk, úgy az indukált ellenállás mellett szembesülnünk kell, a repülőgép törzsének jelenléte miatti közegellenállási többlettel is. A teljes repülőgép ellenállástényezőjét a szárny, a törzs, a vezérsíkok és egyéb tartozékok valamint az ezek egymásra hatásából keletkező interferencia ellenállás tényezőinek összegzésével kapjuk meg. Ezek a káros ellenállások az állásszögtől függetlenek, ezért ha a teljes repülőgép polárgörbéjét tekintjük, azt tapasztaljuk, hogy megegyezik a szárnyéval, csak a nagyobb ellenállások tartományába tolódott az x tengely mentén.

3.7 A vitorlázó-repülőgépek teljesítménye

Hogy valóban meg tudjuk határozni a vitorlázó-repülőgép „teljesítményét” jelző mennyiséget, egy kicsit vissza kell tekintenünk arra a fejezetre, mikor a repülőgépre ható erőket vizsgáltuk. Ekkor megállapítottuk, hogy a vitorlázó-repülőgép motor híján állandóan lejtős pályán kell hogy mozogjon, annak érdekében, hogy az erők egyensúlya fennmaradjon. A pálya vízszintessel bezárt szögét a felhajtóerő és a közegellenállási erő határozza meg, ugyanis ez a két erő tart egyensúlyt a súlyerővel, mint az az ábra is mutatja.

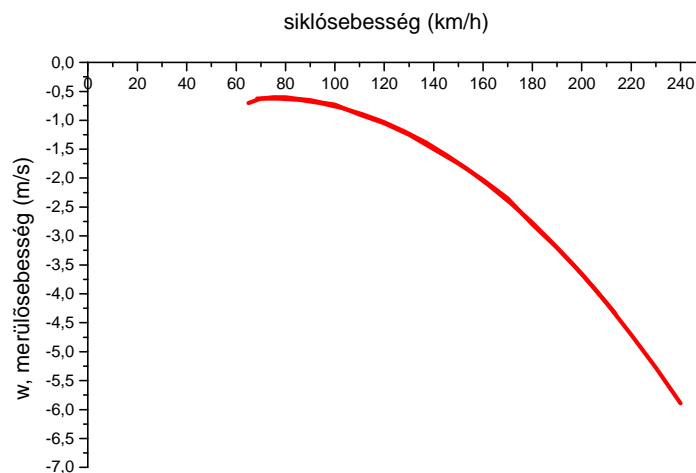
ÁBRA

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{X}{Y} = \frac{c_x \frac{\rho}{2} v^2 A}{c_y \frac{\rho}{2} v^2 A} = \frac{c_x}{c_y}$$

Itt A -val azért egyszerűsíthetünk, mert mind a két erőt a szárny alapterületére vonatkoztattuk. Jól látható, hogy a siklószöget a felhajtóerő és az ellenállás-tényező aránya szabja meg.

Képzeljük el, hogy repülőgépünk ezen a lejtős pályán, az egyensúly beállta után, egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Mi elhatározzuk, hogy gyorsítunk, amit úgy tudunk elérni, hogy a siklószöget egy kicsit meredekebbre vesszük. Ezáltal az Y és X vektorok elfordulnak, és ahhoz hogy a G -vel egyensúlyt bírjanak tartani, értékeiknek meg kell változniuk. Nagyobb sebesség esetén elég a kisebb állásszög ugyanakkora felhajtóerő előállításához, így a sebesség megváltozása az állásszög megváltozását hozza magával. Az állásszög megváltozása a c_y megváltozását okozza, amivel pedig a polárgörbén láttuk, hogy c_x változása is együtt jár. Tehát egy kis kormánymozdulat szinte minden paramétert megváltoztat. Az új paraméterekhez új egyensúlyi helyzet tartozik.

A fenti okok miatt, a vitorlázó-repülőgép különböző sebességeihez különböző siklószögek és merülősebességek tartoznak. Ha egyensúlyi helyzeteken át folyamatosan változtatjuk a sebességet és minden sebességhez tartozó merülősebesség értéket feljegyzünk, az adatokat ábrázolva a repülőgép sebességpolárisát kapjuk:



Általában a sebességet km/h-ban adják meg, a merülősebességet pedig m/s-ban, mert a repülőgépek sebességmérő műszerei és variométerei (függőleges sebességet mérő műszer) is ilyen beosztásúak. Természetesen nincs két olyan repülőgép, gyakran még az azonos típusúak között se, melyeknek a sebességpolárisai tökéletesen megegyeznének, de azért típuson belül nem szoktunk különbségeket tenni, hisz az eltérések többnyire minimálisak. A típusok között azonban lényeges különbségek vannak.

Hogy pontosan miért ilyen alakú a sebességpoláris, az légerők sebességfüggésével és ezen keresztül a c_x és c_y tényezők viszonyával van kapcsolatban. Az összefüggés v és w közt nem lineáris, ez már csak azért is lehetetlen lenne, mert akkor minden sebességhez ugyanaz a siklószög tartozna.

Ha a sebességeket azonos mértékegységben ábrázoljuk, akkor a görbe bármely pontjához az origóból húzott egyenes meredeksége megadja az adott sebességhez tartozó w/v arányt, melynek abszolútértéke a siklószög tangense. Ilyenkor általában nem szoktunk figyelembe venni a merülősebesség negatív előjelét és akkor nem kell foglalkozni az abszolút értékkel sem, ez jelen esetben csak a korrektebb fizikai megközelítés és a grafikus ábrázolás szempontjából volt szükséges. Ha a w/v hányadosnak a reciprokát vesszük, egy a vitorlázórepülésben nagyon gyakran használt viszonyszámot, az ún. **siklószámot** kapjuk, mely megadja, hogy az adott sebességgel 1 m magasságvesztéssel hány m távolságra tudunk elsiklani. A gyakorlatban érdemesebb ezt az egy km magasságból siklással megtehető km-ek számaként értelmezni. Természetesen mindez csak akkor érvényes, ha nyugvó közegben repülünk, ill. elhanyagoljuk azt a tényt, hogy a sikló-

sebesség és a vízszintes irányú sebesség egy kicsit különbözik. Ezt az elhanyagolást a kis siklószögek miatt tehetjük meg. A siklószám így:

$$\varepsilon = \frac{v}{|w|}$$

A siklószám maximális értékét ott éri el, ahol v/w értéke a legkedvezőbb, s ez a pont az origóból a görbéhez húzott érintő és a görbe metszéspontjánál található. Ebből látható, hogy minden vitorlázó-repülőgép rendelkezik egy **optimális sebességgel**, mellyel egy siklóssal a legnagyobb távolságokat tudja áthidalni. Azt is észrevehetjük, hogy a görbe legtöbb pontjához az origóból félegyenest húzva, az egyenes meghosszabítása még egy helyen metszi a görbét, valahol a nagyobb sebességek tartományában. Ebből következik hogy ugyanazt a siklószöget és siklószámot bizonyos tartományokon két különböző sebességgel is tudom produkálni. Általában amikor egy repülőgép siklószámáról beszélünk, akkor ezen automatikusan a legjobb siklószámot értjük.

A görbe másik legjellegzetesebb pontja a görbéhez húzott vízszintes érintő metszéspontja, mely megadja a legkisebb merülősebességhez tartozó sebességet, melyet **gazdaságos sebességnek** neveznek. Ez a sebesség teszi lehetővé azt, hogy egy bizonyos magasságból siklást végezve, a lehető legtovább tudjunk levegőben maradni.

Még két jellegzetes pontja van a polárisunknak, az egyik a **minimális sebesség** melynél lassabban a repülőgép nem tud repülni, a másik a **maximális sebesség**, melyet nem szabad átlépni, mert az a repülőgép szerkezetének sérülését okozhatja. Ezt gyakran v_{NE} -vel is szokták jelölni, ahol az NE index arra utal, hogy „*never exceed*”, vagyis soha ne lépd túl. Természetesen ha tovább felvettük volna a görbénket, azt láhattuk volna, hogy a görbe félkör alakban „visszakanyarodik” a w tengely felé. Vagyis minnél jobban növeljük a siklószöget, annál kisebb lesz a sebesség vízszintes komponense és annál nagyobb a függőleges. Függőleges zuhanásnál, amikor a siklószög 90° , a v vízszintes sebesség már nulla, és a w pedig elég hosszú idő után eléri maximumát. A görbének a v_{NE} utáni szakasza, illetve hosszabb zuhanórepülés tiltott tartomány, mivel a sebességgel négyzetesen nő a felhajtóerő nagysága és már kis állásszögváltozás úgy megváltoztatja c_v értékét, hogy nagyobb légerők keletkeznek, mint amit a szerkezet el tud viselni.

A repülőgépünk teljesítményét a fenti sebességek határozzák meg. Nyilván ideális lenne egy olyan repülőgép, melynek nagy a siklószáma, ezért messzire tudunk siklani vele, nagy sebességnél éri el a legjobb siklószámot, ezért hamar odaérünk ahová akarunk, kicsi a minimális merülősebessége, ezért a legkisebb termikeket is ki tudjuk körözni vele és kicsi a minimális sebessége, hogy megkönnyítse a leszállást. Ezekén felül még jó lenne nagy végsebesség, jól terhelhető szerkezettel és kellemes vezetési tulajdonságokkal. Nos ilyen vitorlázó-repülőgép egyelőre nincs. Hisz a gyakorlatban az egyik tényező javítása általában több másik tényező leromlását okozza.

Gyakran használnak **vízballasztot**, hogy egyszerre több követelménynek is megfeleljen egy vitorlázó-repülőgép. A vízballaszt a szárnyakban elhelyezett vízzel teli tartályokat jelent. A tartályokat repülés előtt feltöltik vízzel, így a repülőgép össztömege megnő. A tömeg növekedése a sebességpoláris görbéjét eltolja a nagyobb sebességek tartományába a legjobb siklószámhoz tartozó érintő mentén. Ezáltal a minimális merülés kicsit megnő, de az optimális sebesség is odébb tolódik, ami nagyobb átlagsebességek elérését teszi lehetővé. A nap vége felé, amikor gyengülnek a termikek, a pilóta egyszerűen egy csap megnyitásával megszabadul a vízballaszttól ezáltal a sebességek visszaállnak, és a minimális merülősebesség lecsökkenése révén a kisebb emeléseket is ki tudja használni.

Ábra

Napjainkban a legjobb repülőgépek siklószáma 50-60 körül jár, tehát egy 1km magasról nyugvó levegőben akár a Pécs – Szekszárd távolság is megtehető. Általában a legjobb siklószámot 100-150km/h körül érik el. Minimális sebességük 60-70km/h-ra tehető, de akár 250-300km/h-val is képesek siklani, ha szükséges.

3.8 A repülőgépek stabilitása és irányítása

A repülőgépek a földi járművektől eltérően három dimenzióban képesek változatos mozgásra, három tengely körüli rotációval oldható meg irányításuk. Ez a három tengely a hossz tengely, a kereszt tengely és a függőleges tengely.

Ábra

A három tengely körül a repülőgépeknek egy bizonyos fokú stabilitással kell rendelkezniük, különben irányításuk a pilótától túl nagy figyelmet igényel. Kivételes esetekben, pl. műrepülőgépeknél és vadászrepülőgépeknél szándékosan teszik labilissá a szerkezetet, hogy jobb manőverező-képességet biztosítsanak, de általában a stabilitásra törekednek mindhárom tengely körül.

A **kereszt tengely** körüli stabilitást a **vízszintes vezérsík** biztosítja. A repülőgép vízszintes vezérsík nélkül a hátára fordulna, mivel a legtöbb szárnyprofil rendelkezik a már korábban említett nyomásközéppont-vándorlással, ami azt jelenti, hogy kis állásszögnövekedés a felhajtóerő támadáspontjának előrecsúszását okozza, egy hátrabilentő nyomatékot keltve. A vezérsík tulajdonképpen egy kis méretű szárny, melynek a hátrabilenéskor megnövekszik az állásszöge, és ezáltal képes ellennyomatékot kifejtve stabilizálni a repülőgépet. Előrebillenéskor pont fordítva játszódik le minden, állásszöge csökken (néha erősen negatívba megy át), ami egy hátrabilentő stabilizáló nyomatékot kelt. A vízszintes vezérsíkon és a szárnyon keletkező légerők így egyensúlyban lehetnek.

A kereszt tengely körüli kormányzás a legtöbb esetben a vízszintes vezérsíkon található kormányfelületek, magassági kormánylapok segítségével történik, de egyes gépeknél az egész vezérsík billenthető. A kormányfelületek mozgatása a botkormány hossz tengely menti mozgatásával (húzás-nyomás) történik.

A stabilitás és a kormányzás kapcsolatának elemzéséhez képzeljünk el egy nyugodt levegőben sikló repülőgépet. Ha gépünk stabilitása megfelelő, akkor az általában egy konkrét sebességgel szeret siklani, mert csak egyetlen sebességnél, egyetlen állásszögnél lép fel a szárnyon és a vízszintes vezérsíkon keletkező légerők között egyensúly. Ha az említett sebességnél nagyobb sebességgel hirtelen magára hagyjuk, akkor azt tapasztaljuk, hogy orrát felszegi és lelassul. Ha kisebb sebességnél tesszük ugyanezt, akkor természetesen az ellenkezője történik, gépünk orrát leadja és gyorsulni kezd. Látható hogy a rendszer a egyensúlyi helyzet elérésére törekszik. A pilóta a kormányzás során az egyensúlyi helyzetet tudja eltolni, azáltal hogy a vezérsík profilját megváltoztatja a magassági kormánylapok mozgatásával. Ez a nyomaték-rendszer változásán keresztül fejt ki hatását, hisz ezáltal más sebességnél lesz a szárnyon és a vezérsíkon keletkező légerők nyomatékának eredője nulla. A botkormány előrenyomásával a magassági kormánylapok lefelé billennek, a vezérsíkon keletkező nyomaték a gép orrát a föld felé fordítja, és a sebesség növekszik. A botkormány húzása esetén a leírtaknak pontosan az ellenkezője történik. Láthatjuk, hogy a vitorlázó-repülőgépen motor híján, a sebesség szabályozása a magassági kormánylapokkal történik.

A **hossz tengely** körüli stabilitást a szárny V-be állításával szokták megoldani. Az enyhén V alakú szárnyon ha az megdől jobbra vagy balra olyan nyomatékok ébrednek, melyek a vízszintes állapotot visszállítanak. Ez a nyomaték azért ébred, mert lejjebb kerülő szárnyon keletkező légerőnek kicsit megnő a függőleges komponense, a feljebb kerülőnek pedig lecsökken.

A kormányzás a szárnyvégek kilépőélénél elhelyezett csűrőlapok segítségével történik. A pilóta a botkormány oldalirányú döntésével mozgatja ezeket a csűrőlapokat, melyek egymással

mindig ellentétes irányba térnek ki. Ha a pilóta balra csűr, a baloldali csűrő felfelé tér ki, az íveltséget és felhajtóerőt csökkentve, a jobb oldali pedig lefele, az íveltséget és a felhajtóerőt növelve. Ez a szárnyon keletkező összes felhajtóerő aszimmetrikus eloszlásához vezet és a repülőgép balra bedől.

A **függőleges tengely** körüli stabilitást a függőleges vezérsík teszi lehetővé. Ezen egyenes vonalú repüléskor nem keletkezik az ellenállást leszámítva légerő, de amint a gép orra pár fokkal eltér a gép sebességvektorának valódi irányától, az áramlás már szögben éri, és ez visszatérítő nyomaték kialakulásához vezet. Kicsit hasonló ez a nyílvevesszők végén elhelyezett tollak stabilizáló hatásához. A kormányzás itt az oldalkormánylap kitérítésével a többi kormányzás elvéhez hasonlóan működik, de itt a vezérlés nem kormány hanem pedálok segítségével zajlik. Amelyik oldali pedált taposunk be, arra fordul el gépünk a függőleges tengely körül. A pedálok egymással összeköttetésben állnak, tehát az egyik benyomása a másik oldali kiemelkedésével jár együtt.

A **repülőgép kormányzása** a tévhit ellenében nem egyszerű feladat. Egyszerre mind a három kormány összehangolt mozgatása szükséges egy egyszerű forduló végrehajtásához. A repülőgép nem áll kapcsolatban a talajjal, nem elegendő az oldalkormány pedál betaposása a haladási irány megváltoztatásához. Centripetális erőt kell létrehoznunk, amely elegendően nagy ahhoz, hogy a többszáz kilós vitorlázó-repülőgépet körpályára kényszerítse. Erre egyetlen módszer létezik. A szárnyat a csűrőkormánnyal bedöntjük a kívánt irányba ezáltal az Y felhajtóerőnek lesz vízszintes komponense, ami a mi centripetális erőnk lesz. A bedöntéssel azonban Y függőleges komponense erősen lecsökkent és nem tart egyensúlyt G-vel, ezért hogy az erőteljes merülést elkerüljük, húznunk is kell a botkormánnyon, a szárnynak nagyobb állásszöget adva. A húzás miatt Y függőleges komponense újra egyensúlyba kerül G-vel, és mi elkezdünk oldalra mozogni, de a gép orra ekkor még nem akar a kívánt irányba fordulni. Ezt a problémát tudjuk az oldalkormánnyal megoldani, a csúszást korrigálva a gép orrát a horizonton vezetve szépen fordulni. A három kormány harmonikus mozgatásával a repülőgép csúszás nélkül vezethető.

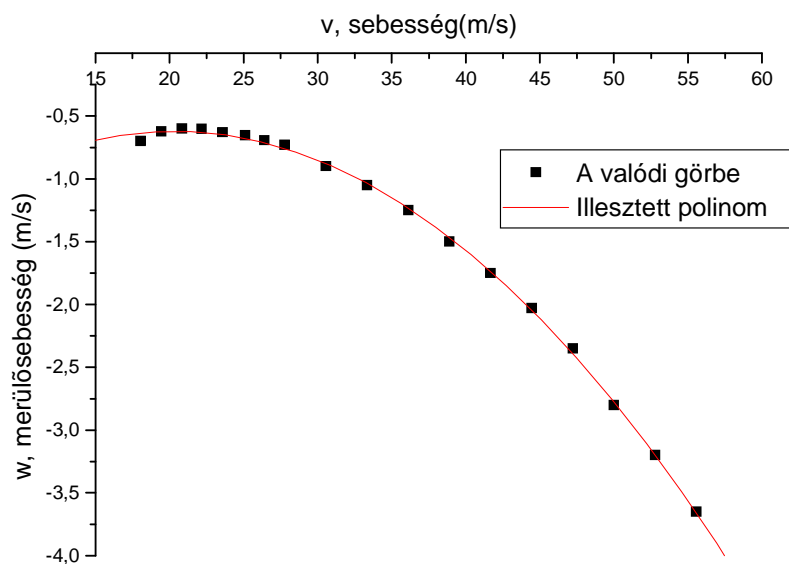
IV. A VITORLÁZÓREPÜLÉSEK SZÁMÍTÁSAI

A vitorlázórepüléssel kapcsolatos legalapvetőbb fogalmak tisztázása után elérkeztünk ahhoz a részhez, mely a dolgozat gerincét képezi és egyben címadóként is szerepel. A repüléssel kapcsolatos számítások nélkülözhetetlenek mindazok számára, akik ezzel a sportággal kapcsolatban vannak és szeretnének jól és biztonságosan repülni. A gyakorlati tapasztalat persze nagyságrendekkel fontosabb, és a lényeg empirikus úton is elsajátítható, de ha megismerkedünk elméletben a vitorlázórepülést övező fizikai jelenségekkel és számításokkal, akkor esetleg ezek tükrében meggondoltabban szervezzük és hajtjuk végre repüléseinket. A biztonságos repülésnek is feltétele a fizika törvényeinek ismerete, aki nincs tisztában gépe képességeivel, a természet alkotta szabályokkal, az bizony könnyen bajba kerülhet.

4.1 A sebességpoláris közelítése:

A repülőgépről nagyon sok a gyakorlatban használható információt árul el a sebességpolárisa, mely általában az üzemeltetési utasításban, a gép dokumentációjának részeként megtalálható és hozzáférhető a pilóták számára. Noha a sebességpoláris egy-két jellegzetességét vizsgáltuk, a görbe matematikai alakját nem adtam meg. Igyekeztem utána nézni különböző szakirodalmakban, de a fellelhető irodalmakban nem találtam még utalást se rá, így kénytelen voltam magam egy közelítő alakot találni. Sokáig keresgéltem nem kellett, hisz a görbe alakja egy lefelé fordított parabolára emlékeztet a legjobban, így egy másodfokú polinommal próbálkoztam először.

A pontokból álló görbe a gép dokumentációjában található sebességpoláris adatainak számítógépre vitelével keletkezett, a folyamatos pedig a rá illesztett másodfokú polinom.



Ez az illesztés túl sok munkánkba nem kerül, ha a már említett Microcal Origin 5.0 programot használjuk, mert a szoftver néhány gombnyomásra olyan függvényt illeszt, amelyet csak akarunk. Amint látjuk, a másodfokú közelítés nem esik messze a valóságtól, a kisebb sebességtartományon tapasztalható eltérések nem szignifikánsak, számításaink szempontjából elhanyagolhatóak

A következő eredményeket adta ki a számítógép az illesztéssel kapcsolatban:

2004.01.03 09:21

Polynomial Regression for Data1

$$Y = A \cdot X^2 + B \cdot X + C$$

Parameter	Value	Error
A	-0,00245	5,97178E-5
B	0,09945	0,00436
C	-1,63211	0,0725

R-Square(COD)	SD	N	P
0,99924	0,02894	18	<0.0001

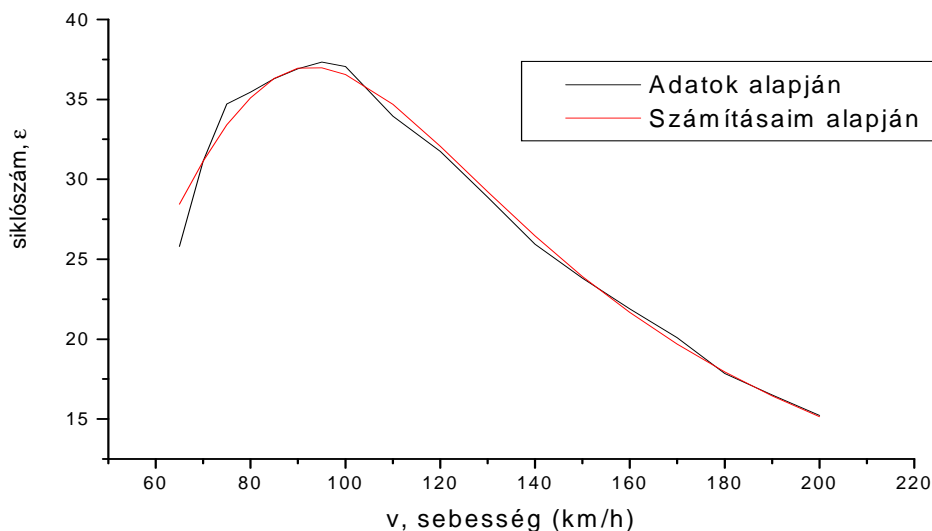
Tehát megfelelő paramétereket választva, a merülősebesség a sebességnek közelítőleg a következő függvénye:

$$w(v) = Av^2 + Bv + C$$

Az így kapott egyszerű alakot nagyon jól fel tudjuk használni, változatos számításokat és becsléseket tudunk vele végezni. Rögtön határozzuk meg a siklószám sebességtől való függését, az ún. siklószámgörbét:

$$\varepsilon = \frac{v}{|w|} = \frac{v}{|Av^2 + Bv + C|}$$

A görbét nagyon könnyen ábrázolhatjuk Origin segítségével. Én az összehasonlítás végett, ábrázoltam az eredeti siklószámgörbe pontjait is, melyet egy gyári diagramról olvastam le. Jól látható, hogy nincs számottevő különbség, közelítésünk tehát helytálló. Ennek a későbbiekben még hasznát is vesszük a távrepülési számításoknál, és a különféle számítógépes kalkulációknál.



4.2 A köröző repülés mechanikai viszonyai

A vitorlázórepülésben a köröző repülés kiemelkedő fontossággal bír. A légkörben jelenlévő termikék többnyire kis méretűek, átmérőjük csupán néhány száz méter, ezért kiaknázásuk más módon szinte nem is lehetséges. Egy hosszabb ideig tartó, több órás repülés során a körözéssel töltött idő is órákban mérhető, ezért érdemes megvizsgálnunk egy kicsit alaposabban a termikelés mechanikai viszonyait.

A vitorlázó-repülőgép vízszintes síkban törtéltő irányváltoztatását, kanyarodását **fordulónak** nevezzük, melynek legfontosabb paramétere a bedöntési szöge, amely megmutatja, hogy a szárny tengelye, a keresztengely mekkora szöget zár be a vízszintessel.

ÁBRA

A centripetális erőt az Y vízszintes komponense adja, a G -vel egyensúlyt pedig a függőleges komponense tart:

$$\begin{aligned}F_{cp} &= Y \cdot \sin \alpha \\G &= Y \cdot \cos \alpha\end{aligned}$$

Ezek alapján:

$$\frac{F_{cp}}{G} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$F_{cp} = G \operatorname{tg} \alpha$$

Így könnyen meg tudjuk határozni az adott sebességű, adott bedöntésű forduló sugarát:

$$m \frac{v^2}{R} = m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$\boxed{R = \frac{v^2}{g \operatorname{tg} \alpha}}$$

Tehát a forduló sugara két tényező függvénye. Nem mindegy hogy mennyire döntjük be a repülőgépet és nem mindegy, hogy mekkora a sebességünk.

Vizsgáljuk most meg azt, hogy egy fordulóban mekkora terhelés hat a pilótára, mekkorának érzi saját testsúlyát. Valójában a testsúly látszólagos megnövekedése annak tulajdonítható, hogy a repülőgép hirtelen irányváltoztatásait a pilóta teste, tehetetlenségénél fogva nem szeretné követni. A mozgásállapot-változást egy erőnek kell létrehozni, s ezt az erőt érzi a repülőgép vezetője amikor az ülésbe szorul. (Pontosabban ennek az erőnek és saját súlya ellenerejének az eredőjét.) Ahogy Y körpályán tartja az egész rendszerünket és még a G gépsúllyal is egyensúlyt tart, úgy az ülésből származó F erő is körpályán tartja a pilótát és ugyanúgy egyensúlyt tart a pilóta mg -jével.

ÁBRA

Ebből következik, hogy ez az erő úgy aránylik a pilóta súlyához, mint ahogy Y a gép G súlyához. Az F nagysága nem nagyon érdekes, a gyakorlatban inkább azt szokás figyelembe venni hogy az egyenes vonalú egyenletes repüléskor tapasztalható súlyának hányszorosát érzi a pilóta,

vagyis az általa látszólag érzett gyorsulás nagysága hányszorosa g -nek, a megszokott földi gravitációs gyorsulásnak. Az így kifejezett hányados nevezik **terhelési többesnek** is:

$$n = \frac{F}{mg} = \frac{a}{g} = \frac{Y}{G} = \frac{G/\cos\alpha}{G} = \frac{1}{\cos\alpha}$$

Ebből tehát a gyorsulás, mely végeredményben g és a_{cp} vektori összege:

$$\vec{a} = \vec{g} + \vec{a}_{cp}$$

$$a = ng = \frac{1}{\cos\alpha} g$$

Tehát csak a bedöntés szögétől függő érték. Ezt a gyorsulást, ezt a terhelést nyilván ember és gép egyaránt érzi, és a túl nagy értékek egyiküknek sem tesznek jót. Egy átlagember ilyen ún. pozitív túlterhelésből, speciális ruházat nélkül közelítőleg $6g$ -t bír ki eszméletvesztés nélkül. A vitorlázó-repülőgépek többségénél is $5-6g$ a megengedett maximális pozitív terhelési többes, ennek kb. másfél - kétszeresénél már törik a szárnyszerkezet, maradandó alakváltozások lépnek fel. A negatív túlterhelést, mely pl. hátonrepülés közben léphet fel $3g$ körül szokták maximálni, de léteznek olyan vitorlázó-műrepülőgépek amelyek mindkét terhelésfajtából az említett értékeknél többet bírnak. Ilyen negatív és pozitív túlterhelések természetesen nem csak forduló közben érhetik a repülőgépet, hanem pl. zuhanásból történő hirtelen felvétel, gyors kormánymozdulatok, vagy erős termikbefúvások során, egyszóval bármikor. Éppen ezért a repülőgépeknél meg szoktak állapítani egy ún. v_A , **manőverezési sebességet**, mely alatt gyakorlatilag lehetetlen a szerkezetet túlterhelni. A v_A sebesség alatt repülve még a leghirtelenebb manőver sem okozhat gondot, mert ennél a sebességnél a maximális felhajtóerő-tényező elérése esetén keletkező légerők is a biztonságos tartományban vannak. A manőverezési sebesség megállapítása értelemszerűen a szárnyszerkezet terhelhetőségének függvényében történik:

$$v_A = \sqrt{\frac{2Y_{\max}}{c_{y\max} \rho A}}$$

Ahol Y_{\max} a szárnyon megengedett maximális légerő. A v_A felett bizony már előfordulhat, hogy egy hirtelen erős feláramlásba repülve, a repülőgép sebességének és a termik függőleges sebességének összeadódása révén, a szárny és az áramlás bezárt szöge megnő és ez a szárny túlterheléséhez vezet, de szerencsére a mérnökök a repülőgépeket általában $j = 1,8$ biztonsági tényezővel készítik tehát, a szerkezet elvileg a megadott értékek $1,8$ -szeresét is ki kell hogy bírja maradandó alakváltozás, törés nélkül. Ezt nem tanácsos kipróbálni, mert nem biztos hogy egy több éve használatban lévő repülőgép hozza a gyári paramétereket.

A fordulókkal kapcsolatban még egy nagyon fontos dolgot nem vizsgáltunk meg, mégpedig azt, hogy hogyan változnak a repülőgép jellemző sebességei a bedöntés növelésével. Az előbb jegyeztük meg, hogy Y értéke fordulóban $1/\cos\alpha$ -szorosára nő. Ezért:

$$Y = c_y \frac{\rho}{2} v^2 A \Rightarrow Y' = \frac{Y}{\cos\alpha} = \frac{c_y}{\cos\alpha} \frac{\rho}{2} v^2 A$$

Tehát a Y növekedéséhez állandó sebességnél c_y értékét is növelünk kellett, a botkormány enyhe húzásával, az állásszöget növelve. Természetesen c_y -nak maximuma van, nem növelhető egy bizonyos határon túl az átesés veszélye nélkül, éppen ezért minden bedöntésű fordulóhoz

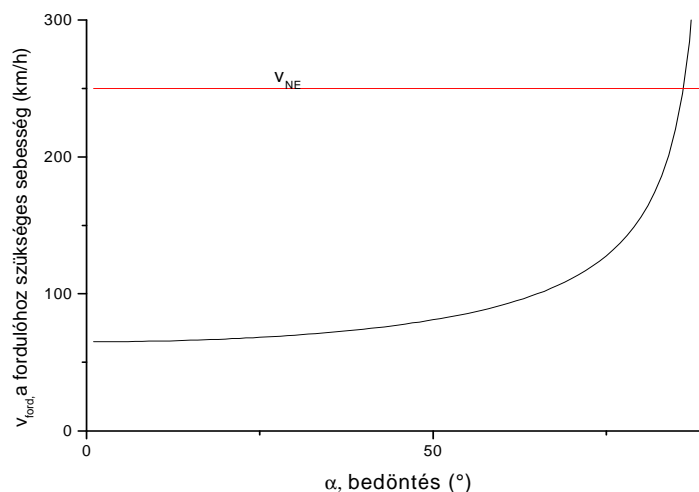
tartozik egy minimális sebesség, mely a következőképpen határozható meg, előző képletünkbe $c_{y\max}$ -ot beírva:

$$Y' = \frac{Y}{\cos \alpha} = \frac{mg}{\cos \alpha} = c_{y\max} \frac{\rho}{2} v_{ford}^2 A \Rightarrow v_{ford} = \sqrt{\frac{2mg}{c_{y\max} \rho A \cos \alpha}}$$

Ez a fordulósebesség kifejezés nagyon hasonlít a repülőgép minimális vagy más néven átesési sebességének kifejezésére egyenes vonalú repülésben, mellyel pár fejezettel korábban foglalkoztunk:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2mg}{c_{y\max} \rho A}} \Rightarrow v_{ford} = v_{\min} \sqrt{\frac{1}{\cos \alpha}}$$

Így megállapítható, hogy adott bedöntésű csúszásmentes fordulóban, hogy ne essünk át, legalább a fenti formulának megfelelő sebességgel kell rendelkezünk. Persze erre egy kis sebességtöbbletet szokás rakni, különösen földközélen, ahol egy esetleges átesésből már nem biztos hogy sikerül kivezetni a repülőgépet. A bedöntés és a szükséges sebesség közötti összefüggést mutatja a következő ábra:



Természetesen a fenti összefüggést nem csak a minimális sebességre tudjuk levezetni. A bedöntés növekedésével a vitorlázó-repülőgép gazdaságos és optimális sebességei is a nagyobb értékek felé tolódnak, az összefüggés minden esetben a fentiekhez hasonló alakban írható:

$$v_{opt.ford} = v_{opt} \sqrt{\frac{1}{\cos \alpha}} \quad v_{gazd.ford} = v_{gazd} \sqrt{\frac{1}{\cos \alpha}}$$

A fordulóban az optimális sebességnek túl sok jelentősége nincs, a gazdaságosnak annál több. Rövidesen le fogjuk vezetni, hogy a fordulóban a merülősebesség bármely sebéségnél nagyobb, mint az egyenes vonalú repüléshez tartozó merülősebesség, és emellett még a szélsőértékhelye, a gazdaságos sebesség is eltolódik.

ÁBRA

A fordulóban tapasztalható merülősebesség a termikelés szempontjából nagy jelentőségű, hisz nem mindegy mekkora sebességgel, milyen bedöntéssel repülünk a lehető legnagyobb emelkedési sebesség eléréséhez. Nyilván a termikelés hatásfoka akkor a legnagyobb, ha a gép merülősebessége a lehetőségekhez mérten minimális. A merülősebesség meghatározásához, termikelés esetére, a következő levezetést dolgoztam ki, a saját polinomos sebességpólárist közelítő formulám alkalmazásával:

A forduló során a felhajtóerő és a felhajtóerő tényező a következőképpen változik meg:

$$Y' = \frac{Y}{\cos \alpha} \Rightarrow c_y' = c_y \frac{1}{\cos \alpha} \quad (1)$$

A siklószám a c_y / c_x hányadosaként határozható meg. Tehát ha a fordulóbeli c_y' -t már ismerjük, akkor csak c_x' -t kell meghatározni és tudjuk a siklószámot. A siklószám ismeretében pedig, a siklósebességet felhasználva a merülősebesség is megkapható. Nézzük, hogy kaphatjuk meg c_x' -t. Célszerű megnézni, hogy a fordulóbeli felhajtóerő-tényezőhöz mekkora siklósebesség tartozna egyenes vonalú repülés esetén, mert ha ez a sebesség megvan, akkor a közelítő képletünkkel meg tudjuk határozni az ehhez tartozó siklószámot és abból a merülést.

$$v' = \sqrt{\frac{2mg}{c_y' \rho A}} = \sqrt{\frac{2mg \cos \alpha}{c_y \rho A}} \quad (2)$$

Amiből az következik, hogy a fordulóban tapasztalható állásszöghöz (és felhajtóerő-tényezőhöz) egyenes siklásban a sebességnek így kell nőnie:

$$v' = v \sqrt{\cos \alpha} \quad (3)$$

Az ellenállás-tényező tehát így változik meg a fordulóban:

$$c_x = \frac{c_y}{\mathcal{E}(v)} \rightarrow c_x' = \frac{c_y'}{\mathcal{E}(v')} = \frac{c_y}{\cos \alpha} \frac{1}{\mathcal{E}(v')} = \frac{c_y}{\cos \alpha} \frac{Av'^2 + Bv' + C}{v'} \quad (4)$$

Ebbe helyettesítsük be a sebesség megváltozására vonatkozó (3)-számú kifejezést:

$$c_x' = \frac{c_y}{\cos \alpha} \frac{Av^2 \cos \alpha + Bv \sqrt{\cos \alpha} + C}{v \sqrt{\cos \alpha}} \quad (5)$$

Innen könnyen megkaphatjuk a siklószámot a fordulóban:

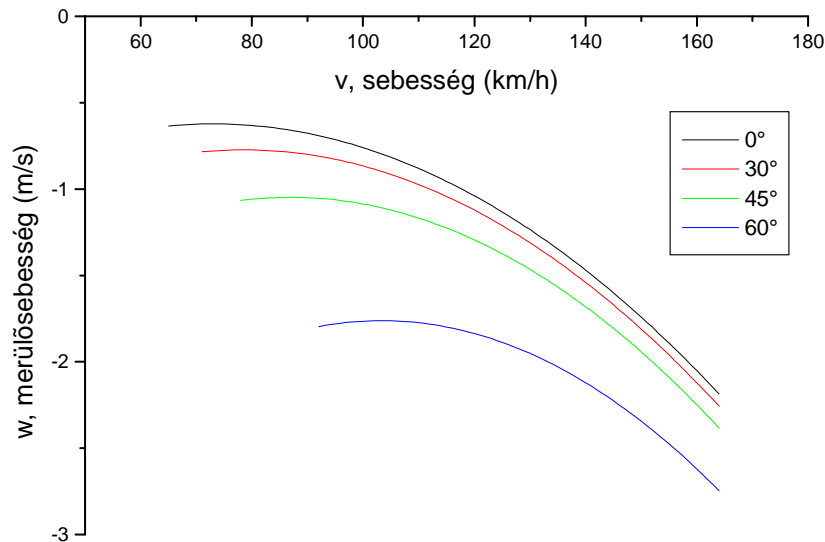
$$\mathcal{E}_{ford} = \frac{c_y}{c_x'} = \frac{\phi_y \cos \alpha v \sqrt{\cos \alpha}}{\phi_x (Av^2 \cos \alpha + Bv \sqrt{\cos \alpha} + C)} \quad (6)$$

Innen pedig a merülősebesség:

$$w_{ford} = \frac{v}{\mathcal{E}_{ford}} = v \frac{Av^2 \cos \alpha + Bv \sqrt{\cos \alpha} + C}{\cos \alpha v \sqrt{\cos \alpha}}$$

$$w_{ford} = \frac{Av^2 \cos \alpha + Bv\sqrt{\cos \alpha} + C}{(\cos \alpha)^{3/2}}$$

Nos ebből megkaptuk ugye azt, hogy hogyan függ a merülősebesség a fordulóban, a bedöntés szögétől és a körözési sebességtől. Ezt ábrázoltam is egy sebességpoláris segítségével:



Jól látható, hogy a nagyobb bedöntés nagyobb merülősebességet eredményez, de ha jobban megfigyeljük a görbéket még azt is észrevehetjük, hogy a görbék szélsőérték helyei a nagyobb sebességek irányába tolódtak. Ez annak a következménye, hogy minden sebesség $1/\sqrt{\cos \alpha}$ -szorosára nő forduló esetén.

Vizsgáljuk meg egy kicsit a fordulósugar szempontjából is a merülősebességeket. Először fejezzük ki a fordulósugárból a hozzá tartozó sebességeket pl 30° és 60° bedöntés esetére, majd a sebességek ismeretében számítsuk ki az adott bedöntésű forduló merülősebességeit.

$$R = \frac{v^2}{g \tan \alpha} \Rightarrow v = \sqrt{R g \tan \alpha}$$

$$w_{ford} = \frac{Av^2 \cos \alpha + Bv\sqrt{\cos \alpha} + C}{(\cos \alpha)^{3/2}}$$

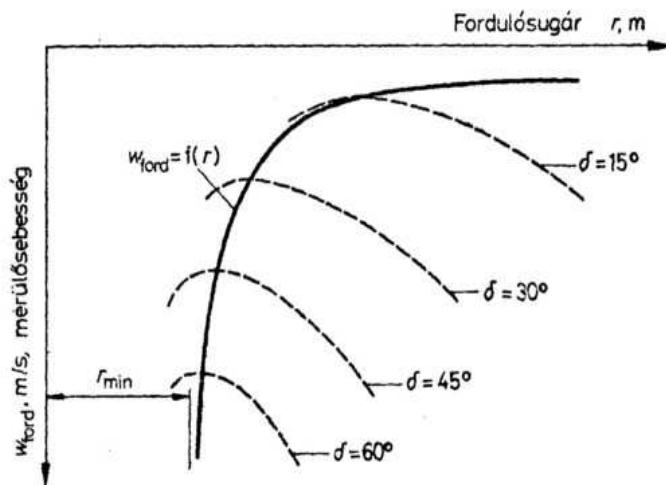
Ezek alapján adódik a közvetlen kapcsolat R és w közt, adott α -ra:

$$w_{ford} = \frac{ARg \tan \alpha \cos \alpha + B\sqrt{Rg \tan \alpha} \sqrt{\cos \alpha} + C}{(\cos \alpha)^{3/2}}$$

Ahol a lehetséges egyszerűsítések után a következő kifejezés adódik:

$$w_{ford} = \frac{ARg \sin \alpha + B\sqrt{Rg \sin \alpha} + C}{(\cos \alpha)^{3/2}}$$

A következő ábrán láthatjuk a fenti összefüggésünket grafikusán ábrázolva. A merülősebesség fordulósugártól való függését az optimális sebességeknél a vastag görbe mutatja, de emellett az egyes bedöntési szögekhez tartozó sebességfüggés is fel lett tüntetve a szaggatott görbékkel.



5.

Ha az ábrát értékelnünk kell, megállapíthatjuk, hogy mindig érdemes úgy repülnünk, hogy mérlegeljük a termik erősségét és méretét, hisz a fordulósugár és a merülés egymás rovására változtatható csak. Általában a 45° körüli bedöntés mondható átlagosnak, ennél erősebben dönteni csak akkor szokás ha a termik szűk.

A dolgozat talán leglényegesebb pontjához érkeztünk. A távrepülés a vitorlázórepülés egyik kiemelkedő „műfaja”, s talán mind közül a legérdekesebb is. Már korábban említettem a távrepülési rekordokat, s néha nehéz belegondolni, hogy megfelelő időjárás esetén vitorlázógépünkkel egy nap alatt akár jóval messzebb juthatunk mint személygépkocsival. A néhány száz kilométer hosszú repülések mindennaposak kis hazánkban is. A repülőgépek, a technika javulása az utóbbi tíz évben jelentős terhet vett le a pilóta válláról, de azért a feladat még mindig embert próbáló és a megtervezése kritikus.

5.1 A környezet modellezése

A sikeres repülés kulcsa mint már korábban is utaltam rá egy jól működő termiklátó-szemüveg kifejlesztése lenne, melynek segítségével a vitorlázó-repülőgép vezetője pontosan lokalizálni tudná a termikeket és így az útvonalát a levegőben folyamatosan tervezhetné, módosíthatná. Egyelőre nem tudok ilyen vagy ehhez hasonló eszközről, de elvileg már létezhet. Mindenesetre számításaink során be kell érünk egyszerű modellekkel.

Nagyon jó lenne tudnunk, hogy távrepülésünk során hogyan érhetjük el a lehető legnagyobb átlagsebességet, és ehhez milyen sebességgel kell siklanunk, azonban a repülésünket biztosító termikék változatos helyeken, változó erősséggel bukkannak fel, s így rájuk alapozni szinte lehetetlen. Ideálisan talán számítógéppel lehetne modellezni az ilyen jellegű időjárást. Megadnánk a számítógépnek, hogy a napi időjárás előrejelzések alapján random helyen random időben felbukkanó termikekkel számoljon, s az egész problémát statisztikusan kezelve el tudnánk dönteni, hogy merre érdemes indulnunk, milyen repülési paraméterek tartása mellett. Tovább javíthatnánk a helyzetet, ha pontos információnk lenne a talaj anyagi minőségéről, reflexiójáról az útvonal mentén, mert így a termikék várható felbukkanási helyeit is meg tudnánk határozni. Egyelőre úgy tűnik ez is meghaladja képességeinket, erőforrásainkat, ezért a távrepülések esetleges tervezéséhez egy végtelenül egyszerű modellhez fordulhatunk segítségért.

A **modell** amit használunk, néhány olyan feltételezésen alapul, mely a valóságtól némiképp elrugaszkodik, de ennek ellenére jól használható. Az alapfeltételezések:

- A termikék erőssége állandó, a feláramlási sebesség egyenletes
- A termikék között merülőzónák működnek, melyeket a termikekhez hasonló egyenletesség jellemez.
- A termikék olyan közel helyezkednek el egymáshoz, hogy a köztük levő távolság az általunk választott repülőgéppel áthidalható legyen.
- A termikék közötti távolsághoz képest a termikék kiterjedése elhanyagolható, a termikbe való érkezés pillanatától folyamatosan emelkedünk, nem kell időt eltöltenünk a termik magjának keresésével.

5.2 A legelőnyösebb siklósebesség távrepülés közben:

A távrepülések számításaival foglalkozó tankönyvek a következő egyszerű és szemléletes példán keresztül vezetik le a távrepülés során tartandó legelőnyösebb siklósebességet.

Három azonos típusú repülőgép azonos magasságból siklani kezd a következő termik felé. Az első a gazdaságos sebességgel, tehát a legkisebb merülősebességhez tartozó sebességgel, a második az optimális sebességgel, tehát a legjobb siklószám mellett, míg a harmadik mindkettőnél gyorsabban repül. Nyilvánvaló hogy leghamarabb a 3. repülőgép éri el a termiket, de az is nyilvánvaló hogy hármuk közül a legalacsonyabban is. A 2. gép ér oda másodikként, és a legmaga-

sabban, és utolsóként az 1. gép fut be a kettő másik gép közti magasságon. De míg a többiek elérik a termiket, addig a 3. számú gép már vígan köröz, és valószínűleg mire a 2. gép megérkezik, addig ő már felette jár, ezzel hatalmas előnyt szerezve, hisz hamarabb indulhat tovább mint társai. Természetesen ez csak akkor teljesül, ha jól választotta meg a sebességét, mert ha túl gyorsan siklott, lehet hogy olyan alacsonyan érte el a termiket, hogy már nem tudta ledolgozni a közte és a 2. gép közt lévő magasságkülönbséget.

Vajon adott időjárási helyzetben milyen sebességgel kell siklani ahhoz, hogy a leggyorsabbak legyünk? Nézzük meg ennek a kinematikai oldalát:

Ideális termikiek között siklik a repülőgépünk v_s sebességgel. Jó közelítéssel, a kis siklószög miatt ezt a sebességet azonosnak vesszük a v vízszintes összetevőjével. A repülőgép merülősebessége v sebességnél w , de ehhez még hozzáadódik a két termik közti közegmerülés w_m . A függőleges sebességet mérő műszer, a variométer tehát w_f merülést mutat. ($w_f = w + w_m$) Az ábrán jelölt A és B pontok közti távot t_1 idő alatt teszi meg a repülőgép, majd a másik termikben már w_e sebességgel emelkedik t_2 idő alatt a C pontig (Δh). Értelemszerűen ez a w_e , a termik emelkedősebességének és a gép fordulóban mutatott merülésének a különbsége. A modellnek ez a legkritikusabb pontja, ugyanis w_e -t a termik erőssége is meghatározza, ill. közvetve a termik mérete és a pilóta képességei is. A termik erősségét csak becsülni tudjuk az adott útvonalra az adott napra és ettől jelentős eltérések is lehetnek, de emellett még zavarólag hat a termik mérete is, hisz szűk termikben nagyobb bedöntéssel lehet csak megmaradni és ezáltal w értéke is nagyobb. A körözés precizitása, az optimális körözési sugár megtalálása pedig már a pilóta kezén múlik.

Ha ezeket a zavaró körülményeket mind figyelembe vesszük, akkor hamar elmegy a kedvünk a további számításoktól. Szerencsére a mindennapi gyakorlatban a w_e értéke szinte közvetlenül adódik nekünk. Ha épp levegőben tartozkodó pilótatársunkat kérdezzük az időjárás felől, akkor egészen biztos hogy ő a w_e -t közli velünk, hisz nem is tud mást, a műszere a w_e emelkedősebességet mutatja. Emellett a professzionális időjárás-előrejelzésekben, az erre szakosodott repülés-meteorológusok kérésünkre meg tudják adni az adott napra, az adott régióra érvényes várható gradienst ill. a várható termikerősséget, melyekből w_e értékére következtethetünk. Egy átlagos vitorlázógépnél egy átlagos termikelés során nagyjából 1 m/s-os saját merülősebességgel kell számolni, melyet a megadott termikerősségből ki lehet vonni.

Térjünk vissza a gondolatmenetünkre. A repülőgép az A és C pontok közti s távolságot a következő átlagsebességgel teszi meg:

$$v_a = \frac{s}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

A $v_s = v$ feltételezésből következik, hogy:

$$t_1 \approx \frac{s}{v} \quad (2) \quad \text{és} \quad t_2 \approx \frac{\Delta h}{w_e} \quad (3)$$

A siklószám definíciójából:

$$\varepsilon = \frac{s}{\Delta h} = \frac{v}{w + w_m} \Rightarrow \Delta h = \frac{s}{\varepsilon}$$

Ezekből:

$$\Delta h = \frac{s(w + w_m)}{v}$$

Most Δh -t behelyettesítve (3) –ba:

$$t_2 = \frac{s(w + w_m)}{vw_e} \quad (4)$$

Majd (2)-t és (4)-t behelyettesítve (1)-be:

$$v_a = \frac{s}{\frac{s}{v} + \frac{s(w + w_m)}{vw_e}}$$

Egyszerűsítések és reciprokok alakra hozás után:

$$\frac{1}{v_a} = \frac{1}{v} + \frac{w + w_m}{vw_e}$$

A jobboldalt hozzuk közös nevezőre és adjuk össze a tagokat:

$$\frac{1}{v_a} = \frac{w_e + w + w_m}{vw_e}$$

Szorozzuk át az emelkedősebességgel:

$$\boxed{\frac{w_e}{v_a} = \frac{w_e + w + w_m}{v}} \quad (5)$$

A kapott egyenletünket könnyen szemléltethetjük geometriai formában is egy sebességpolárison, kihasználva a hasonló háromszögekre ismert matematikai összefüggéseket.

Ábra

Látható, hogy a tartandó v siklósebességet egy egyszerű szélsőértékprobléma megoldásaként kaphatjuk meg. Az origo fölül $w_e + w_m$ magasságból érintőt kell húznunk a polárishoz, és az érintési pont v koordinátája adja az előnyös v_e sebességet. A magyar szakirodalomban fellelhető talán egyetlen könyv mely a kezembe akadt, főleg grafikus, szerkesztéses megoldást javasol a sebességek meghatározására. Én ezzel nem elégedtem meg, hisz a gondolatmenetet folytatva és a korábban tárgyalt sebességprofil közelítő módszert alkalmazva a problémának könnyen a végére járhatunk.

Az érintési pont ott van, ahol a sebességi görbe meredeksége megegyezik az érintő meredekségével. A sebességi görbe meredeksége:

$$w(v) = Av^2 + Bv + C \Rightarrow \frac{dw(v)}{dv} = 2Av + B$$

Az érintő meredeksége látszik az ábra alapján is, de gyakorlatilag a fenti egyenlet adja:

$$\frac{w_e}{v_a} = \frac{w_e + w + w_m}{v}$$

A két meredekséget tegyük egyenlővé:

$$\frac{w + w_m + w_e}{v} = 2Av + B$$

Fejtsük ki w -t:

$$\frac{Av^2 + Bv + C + (w_m + w_e)}{v} = 2Av + B$$

Az egyenletet rendezzük és fejezzük ki v -t:

$$v = \sqrt{\frac{C + w_m + w_e}{A}}$$

Természetesen hogy értelmes eredményt kapjunk, a módszer geometriai jellege miatt célszerű a függőleges sebességeknél az előjelektől eltekinteni. Tehát w_m , w_e és w abszolútértékével kell számolnunk. Ez annyit tesz, hogy w esetében a paraméterek közül A és C előjele is pozitív kell hogy legyen, különben előfordulhat, hogy negatív számot kapunk a gyök alatt.

Tehát v személyében megkaptuk az **előnyös v_e sebességet**, innen már könnyen megkaphatjuk az elérhető átlagsebességet is az (5) egyenlet segítségével:

$$v_a = \frac{v w_e}{w + w_m + w_e}$$

Természetesen itt is figyelmen kívül hagyjuk a mínusz előjeleket. A kapott eredmény tájékoztat minket arról, hogy mekkora **átlagsebesség** hozható ki az adott napi időjárásból.

5.3 Távrepülés szélben

A fenti eredmények szélcsend esetére vonatkoztak, tehát feltételeztük hogy a légkörben csak vertikális áramlások működnek. A gyakorlatban ilyen nagyon ritkán van, ezért meg kell gondolnunk hogy szél jelenléte esetén hogyan módosulnak számításaink.

Ha eltekintünk a földhöz közeli pár száz méteres levegőrétegről, ahol a közeg sűrűsége miatt a szélsébség nem állandó, akkor a szelet jó esetben ideális áramlasként kezelhetjük. Ez távrepülésünk szempontjából annyit jelent, hogy mi repülünk termikről termikre, és közben olyan érzésünk támad, mintha valaki elhúzná alattunk a „térképet”. A közeghez képest azonos átlagsebességet tudunk elérni mint szél nélkül, csak a földhöz képest történik változás. Éppen ezért a következő vektorábra segítségével gondolkodhatunk:

Ábra

A **föld feletti átlagsebességünk** (v_{af}) nyilvánvalóan a szél nélkül elérhető átlag-sebesség (v_a) és a szélsébség (v_{sz}) vektori összegeként értelmezhető. Ha tudjuk az útvonal irányszögét (γ), valamint a szél irányszögét (δ), akkor meg tudjuk határozni az általunk tartandó irányszögét (β), ami a pályán maradás feltétele. Látható, hogy:

$$v_{sz} \sin(\gamma - \delta) = v_a \sin(\beta) \quad (1)$$

De az is látható, hogy:

$$v_{af} = v_a \cos \beta - v_{sz} \cos(\gamma - \delta) \quad (2)$$

Az (1)-ből $\sin \beta$ ill. β kifejezhető, hisz minden adatunk rendelkezésre áll. Az átlagsebességet már kiszámolhattuk előzőleg, a szél iránya és sebessége pedig könnyen beszerezhető meteorológiai információ. A β ismeretében a föld feletti átlagsebesség is kiszámítható (2) segítségével.

A vektorábrán látható, hogy a szél ront az átlagsebességünkön, hacsak nem tartalmaz az útvonalra nézve megfelelő nagyságú hátszélkomponenst, hisz akkor kimondottan segítségünkre van. A szél jelenléte esetén megfontolandó az is, hogy érdemes-e egyáltalán távrepülésre menni. Ha útvonalunkon túlságosan nagy a szél előfordulhat, hogy nem tudunk akkora átlagsebességet produkálni, hogy az kompenzálja az elsodródást.

Akkor tudunk előrejutni szembeszélben ha $v_{sz} < v_a$ és látható, hogy akkor tudunk az útvonalon maradni, ha:

$$v_{sz} \sin(\gamma - \delta) \leq v_a$$

Ez az (1) egyenletből következik $\sin \beta = 1$ esetén. Innen ha szükséges, korábbi számításaink alapján visszazámíthatjuk az ún. előrejutáshoz szükséges termikerősséget, szembeszél esetére.

Gyakran előfordul, hogy estefelé, mikor a termikék már gyengülnek és a táv vége felé jár a repülőgép, hogy a pilóta megáll olyan termikben, mely éppen hogy csak kompenzálja a magasságvesztést. Ilyenkor a termikék közül válogatni nem lehet, és az ilyen „nullákat” is meg kell becsülni, hisz hátszél esetén nullázgatás közben is egyre közelebb sodródik a célhoz. Ezt a módszert **ballonozó repülésnek** nevezik.

5.4 A besiklások számításai

Besiklásnak a távrepülés utolsó szakaszát nevezzük, mikor már az utolsó termikből kiemelkedve egyetlen siklással érjük el a célrepülőteret. A besiklás során is arra kell törekednünk, hogy a lehető legnagyobb átlagsebességet produkáljuk.

A legtöbbször előforduló probléma a táv végéhez közeledve, hogy adott magasságból mekkora sebességet tartsunk ahhoz, hogy a lehető leghamarabb, de még biztonságosan elérjük a repülőteret. Természetesen ekkor is figyelembe kell vennünk a meteorológiai körülményeket, de először most vizsgáljuk meg a szélcsend esetét:

A reptér s távolságra van és mi h magasságban hagyjuk ott az utolsó termiket. A célt h_0 biztonsági magasságban szeretnénk elérni, hogy ne okozzon problémát, ha esetleg a vártnál erősebb merülőzónába kerülünk útközben. Ezen adatokból a szükséges siklószám meghatározható:

$$\mathcal{E} = \frac{s}{h - h_0}$$

Ha siklószámot a sebességekkel fejezzük ki, akkor a két egyenlet egyenlővé tehető:

$$\mathcal{E} = \frac{v}{|w|} = \frac{v}{-(Av^2 + Bv + C)} = \frac{s}{h - h_0}$$

Innen v másodfokú egyenleten keresztül kiszámítható, de erre most nem térek ki. A megoldásul kapott gyökök közül mindig a nagyobbat kell figyelembe venni, hisz előfordulnak olyan

részei a polárisnak, ahol egy adott siklószög két különböző sebességgel is elérhető, de számunkra a gyorsaság számít.

Fontos ugyanezen megfontolásokkal azt az esetet is végiggondolnunk, ha nincs szélcsend. A polárisra a különböző irányú légmozgások olyan hatással vannak hogy eltolják a v vagy a w tengely mentén. Értelemszerűen szembeszél esetén a polárisunk a v tengely mentén elcsúszva közelebb kerül a w tengelyhez, hátszél esetén pedig tőle távolabb. A besiklás közben tapasztalható közegmerülés a gép merüléséhez hozzáadódva a polárist a w tengely mentén lefelé, az esetleg tapasztalható emelőzóna ezzel ellentétesen tehát felfelé tolja.

Ábra.

A szélcsendre vonatkozó számításunkat tehát módosítanunk kell szél esetére. A merülésnél figyelembe kell vennünk a w_k közegmerülést illetve a v_{ff} föld feletti sebességet, utóbbi a v_{sz} szélsebesség és a v siklósebesség vektorának összegzésével adódik, koszinusztétellel számítható. Az útvonal irányszöge γ , a szél irányszöge δ tehát:

$$\varepsilon = \frac{v_{ff}}{|w|} = \frac{v_{sz}^2 + v^2 - v_{sz}v \cos(180^\circ - (\gamma - \delta))}{w_k - (Av^2 + Bv + C)} = \frac{s}{h - h_0}$$

A következő egyenletet kell tehát v -re megoldanunk:

$$\frac{v_{sz}^2 + v^2 - v_{sz}v \cos(180^\circ - (\gamma - \delta))}{w_k - (Av^2 + Bv + C)} = \frac{s}{h - h_0}$$

Ennek kiszámítására terjedelmi korlátok miatt nem térnek ki.

A számítási feladatok megoldása a repülések előtt sok időt vesz igénybe, ezért a legtöbben nem is vesződnek ilyesmivel, sőt igazság szerint nem találkoztam még olyan pilótával, aki különböző becsléseket végzett volna felszállás előtt. Hogy valamelyest egyszerűsítsék a teendőket, évtizedekkel ezelőtt a repüléssel foglalkozó emberek kitaláltak különféle eszközöket a repülések optimalizálására ill. kidolgoztak fejszámolási módszereket.

A fejszámolási módszerek egyszerűen csak annyit jelentenek, hogy jegyezzük meg hogy a termik erősségének 1 m/s -mal való növekedésekor mennyivel kell növelni sebességünket, hisz a két mennyiség kapcsolata átlagos esetekben közelítőleg lineárisnak vehető. Hasonlóan minden számolásra vonatkozóan megjegyezhetünk egy-két jellegzetes pontot, és így ezeket becselő jelleggel alkalmazhatjuk a levegőben.

Lényegesen jobb megoldást jelentenek azok az eszközök, logaritmikus számolólécek és tárcsák melyeket szintúgy könnyen használhatunk repülés közben. Ezek közül kiemelkedő az ún. McCready tárcsa, mely a variométer (függőleges sebességet jelző műszer) skálája köré helyezett forgatható gyűrű. A gyűrűn található jelölő nyilat be kell állítanunk a következő termikben várható emelés nagyságához, és ezután azt a sebességet kell tartanunk, amelyre a variométer tűje rámutat a tárcsa skáláján. Ez a gyakorlatban nem túl egyszerű hisz a sebesség változtatása hatással van a variométer tűjének állására is, de kis gyakorlattal elsajátítható. Ha a jelzett sebességet tartjuk, akkor a legelőnyösebb sebességgel siklunk.

Én egy harmadik módját választottam a távrepülési számítások elvégzésének. Ugyan csak minimális programozási ismeretekkel rendelkezttem, de írtam egy saját programot Visual Basic 6.0 -ban, mely a szükséges paraméterek megadása esetén kiszámítja azokat az értékeket, melyek távrepülésünk során még jól jöhetnek. A saját készítésű szoftver hasonlóan számol, mint ahogy azt mi tennénk papíron, de néhol az egyenlet megoldás helyett inkább a futóindexes behelyettesítést választottam, mert ennek a kivitelezése kisebb programozási gyakorlatot igényel. A következőkben a program főbb pontjait és használatát szeretném röviden áttekinteni:

6.1 A Távrepülés 2.0 program használata

A használat során a fent található füleken (menüpontokon) érdemes végighaladni. Nincs is más lehetőség, mert amíg nem választunk repülőgépet az 1. pontban, addig számítást nem végezhetünk.

1.Repülőgép menüpont

Itt kötelező típust megadnunk. A típus lehet a listából választott, vagy megadhatunk magunk is. Amennyiben megelégszünk a felhozattal, egyszerűen az " Ezt választom " gombra kell klikkelni. Ezáltal aktiválódik a következő menüpont. A magunk által megadott típusokkal érdemes vigyázni, ugyanis a típus csak addig érvényes míg újra nem indítom a gépet, vagy újabbat nem kreálok. Tehát csak egyet képes tárolni a program és azt is csak ideiglenesen.

A saját típus definiálásának két módja van. Az egyszerűbb az, ha a típus jellemző paramétereit megadjuk és a " Becslés " gombra klikkelünk. A jellemző paraméterek a gazdaságos sebesség (v_g), az optimális sebesség (v_o), a minimális merülés (w_m) és a siklós szám (ϵ). A gomb megnyomása után a képernyőn megjelenik a számított sebességpoláris, mely a valódi polárisal csak éppen köszönőviszonyban van. Ennek az az oka, hogy megfelelő adatok híján két pontra illesztünk görbét. A görbe alatt három paraméter lesz látható (A, B, C) melyek a görbét jellemzik. Ha a " Mentés " gombra kattintunk, a saját típusunk megjelenik a listában, és a program bezárásáig használhatjuk.

Sokkal pontosabban definiálhatunk típust, ha előveszzük a repülőgép gyári dokumentációját, majd a mellékelt sebességpolárisról leolvasott adatokat $w(v)$ bepötyögjük pl. Microcal Origin nevű programba és másodfokú polinomot illesztünk rá. Az illesztett polinom együtthatói lesznek az A, B és a C. ($Ax^2 + Bx + C$). Az együtthatókat aztán megadhatjuk a görbe alatti mezőkben, és ha így klikkelünk a " MENTÉS " gombra, akkor is megjelenik a gépünk a listában, de természetesen jóval pontosabban tudunk majd számolni.

2.A meteorológia menüpont

Itt értelemszerűen a napi időjárási viszonyokat lehet megadni. A szélsébség és a szélirány nem szorul magyarázatra, talán csak annyit fűznék hozzá, hogy értelemszerűen azt a szöveget kell megadni, ahonnan a szél fúj. Az átlagos látszólagos termikerősség annyit jelent csupán, hogy azt a várható termikerősséget kell megadni, amit mi a műszeren is látunk. Tehát azt, amivel effektíve emelkedni is tudunk. Konkrét példa, hogy valaki leszól rádión, hogy 2-es emelések vannak. Jól tudjuk, hogy a termik magja ekkor kb. 3 m/s -mal emelkedik, de mi ezt csak 2-nek érezzük, ezért 2-t adunk meg. Pontosabban a repülés alatt várható átlagot kell beírni. Kollégánk hiába emelkedik kettes emelésben, ha a többi 3 társunk meg más helyeken fél méterben ücsörög. A közegmerülés a termikek közötti merülőzónák merülését jelenti, mely közelítőleg a termikek erősségének 20 % -a. Az " Adatok elfogadása " gomb megnyomása kötelező, mert így mehetünk a további menüpontokra.