

A REPÜLŐGÉP LESZÁLLÁSI ÚTHOSSZÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Békési Bertold mérnök főhadnagy
főiskolai tanársegéd
Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Repülőtiszti Intézet
Fedélzeti Rendszerek Tanszék

Már a repülés kezdetétől egyik legbonyolultabb feladat volt a leszállás biztonságos végrehajtása. A cikkben a repülőgép leszállási úthosszát próbálom meghatározni analitikus módszerrel. Ezen belül is röviden megvizsgálom a leszállás különböző szakaszait (siklás a biztonságos magasságig, felvétel, kilebegtetés, függőleges süllyedés, kifutás). Végül kitérek a Piszov féle feltételekre, mint a repülőgép érintőleges gyorsulására a függőleges süllyedés folyamán.

BEVEZETÉS

A repülőgép leszálláshoz való bejövetele és annak végrehajtása az egyik legbonyolultabb, speciális feladat a repülés során. A feladat összetettségét a föld közelsége határozza meg. Ennek következtében az automatikus vezérlő rendszer repülési paraméter stabilizálása iránti követelmények magasak.[8]

Leszállás alatt a repülőgép 350 - 400m repülési magasságról a földetérésig történő süllyedését és a kifutópályán teljes megállásig való mozgását értjük.[5]

Különbséget kell tenni a leszálláshoz történő bejövétel - amikor a repülőgép a siklopályán mozog 20 - 30m magasságig - és a konkrét leszállás között, amikor a repülőgép a függőleges síkban manővert végrehajtva földetér és a kifutópályán történő kigurulást követően megáll (vagy enélkül lefordul a gurulóútra).[3]

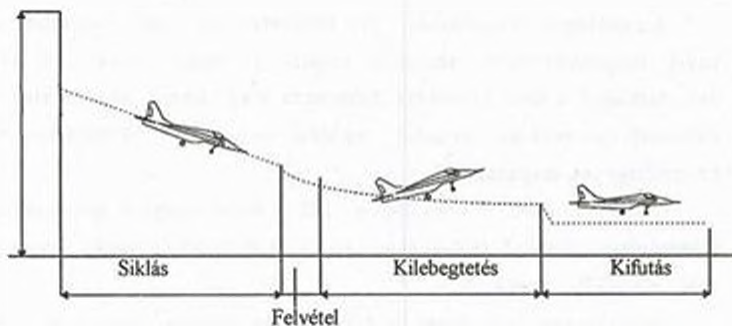
1. A LESZÁLLÁSI ÚTHOSSZ MEGHATÁROZÁSA

A leszállás végrehajtásához a repülőgép-vezető siklási üzemmódba viszi a repülőgépet, melynek folyamán a repülési magasság csökken. [4,7]

Siklaskor a hajtómű tolóerejét a lehető legkisebbre veszik, azaz számításoknál megközelítően vehetjük, hogy az $F_p = 0$.

Miután a repülőgép közeledik a földhöz a siklópálya hajlásszögét nullára csökkentjük, azaz a siklásból vízszintes repülésre térünk át. Továbbá a repülőgép egy bizonyos ideig egészen kis magasságon körülbelül párhuzamosan repül a leszállópálya felületével és sebessége folyamatosan csökken. [1,2,5,6,7,8]

A kilebegtetés azért szükséges, hogy a repülőgép a párnahatás felhasználásával a lehető legkisebb sebességgel érjen földet. Ezt követően a repülőgép földet ér és kigurul. A leszállás ekkor fejeződik be. Ennek szemléltetése az 1. ábrán látható.



1. ábra
A repülőgép leszállásának vázlatja

A siklás kezdetekor a repülőgép sebességének nagyobbak kell lennie a minimálisnál azért, hogy legyen tartaléka a felvételnél szükséges túlterhelés legyőzéséhez, valamint ezt egyúttal a biztonságos repülés feltételei is előírják.

A kilebegtetés kezdetén a sebesség így a minimális sebességnél nagyobbra adódik. A kilebegtetés folyamán ahogy csökken a sebesség a vízszintes repülés feltételeit figyelembe véve - a súlyerő egyenlő a felhajtóerővel - fokozatosan növelni kell az állásszöveget (α) ezáltal nő az ellenállási erő (F_x) és a repülőgép sebessége csökken.

A felhajtóerő tényezőt csak a maximális értékig ($c_{y_{max}}$) lehet növelni, hiszen $\alpha_{krit.}$ -nál nagyobb állásszögek mellett a c_y kisebb lesz mint $c_{y_{max}}$ így ha az állásszöveget tovább növeljük $\alpha > \alpha_{krit.}$ a felhajtóerő F_y kisebb lesz mint a gép súlya (G), azaz a vízszintes repülés feltétele $F_y = G$ nem teljesül. A $(G - F_y)$ különbség lefelé irányuló gyorsulást hoz létre, létrejön egy függőleges v_y süllyedő sebesség és a magasság csökken egészen a földetérésig.

A repülőgép sebességének vízszintes összetevőjét a függőleges süllyedés befejezésének pillanatában (a talajfogás pillanatában) a leszállás sebességének nevezzük.

Így a leszállásának (általános esetben) öt szakaszát különböztetjük meg:

1. Siklás a biztonságos magasságig ($H_{bikt.}$)
2. Felvétel
3. Kilebegtetés
4. Függőleges süllyedés
5. Kifutás

A siklási szakasz hosszát a "A repülőgép siklása homogén közegben" című cikk (1.12) összefüggésével határozhatjuk meg [4]

$$L_{sikl.} = K H_{bikt.} \quad (1.1)$$

ahol:
$$K = \frac{F_y}{F_x} = \frac{c_y}{c_x}$$

A síklás vízszinteshez viszonyított pályahajlásszöge a [4] cikk (1.11) összefüggése alapján¹

$$\Theta = \arctg\left(\frac{I}{K}\right) \quad (1.2)$$

A felvétel számításánál első megközelítésben a pálya sugarát (R) állandónak vehetjük, így a felvétel ideje alatt megtett út:

$$S \approx \Theta R \quad (1.3)$$

Az S út vetülete a vízszintes síkra a pályahajlásszög (Θ) kis értéke miatt magával az S útnak a hosszával azonosnak vehető:

$$L_{\text{fct}} \approx S = \Theta R \quad (1.4)$$

Az erőket levetítve a pályára merőleges egyenesre kapjuk

$$\frac{mv_{\text{útt}}^2}{R} = F_y - G \cos \Theta \quad (1.5)$$

ahonnan a felvétel pályájának sugara

$$R = \frac{mv_{\text{útt}}^2}{F_y - G \cos \Theta} \quad (1.6)$$

Tegyük fel, hogy $\cos \Theta = 1$ és bevezetve a függőleges túlterhelési tényezőt (n_y) kapjuk

$$n_y = \frac{F_y}{G} = \frac{q_{\text{akt}} A c_{y,\text{akt}}}{q_{\text{akt}} A c_{y,\text{akt}}} \quad (1.7)$$

ahol $c_{y,\text{akt}}$ - a felhajtóerő tényező siklaskor

$c_{y,\text{felv}}$ - a felhajtóerő tényező felvételnél

Így a felvétel úthosszára a következő kifejezést kapjuk

$$L_{\text{felv}} = \frac{v^2}{gK} \frac{1}{\frac{c_{y,\text{felv}}}{c_{y,\text{akt}}} - 1} \quad (1.8)$$

A számítások során vehetjük, hogy $c_{y,\text{felv}} = (0,85 - 0,90)c_{y,\text{akt}}$

A kilebegtetési szakaszon $F_P=0$ esetén a repülőgép mozgásegyenletei a következők: [4]

$$\frac{G}{g} \dot{v} = -F_x \quad (1.9)$$

$$F_y = G \quad (1.10)$$

Osszuk el az előbbi egyenletet a másodikkal figyelembe véve, hogy

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dL_{\text{kib}}} \quad (1.11)$$

megkapjuk a kilebegtetési szakasz hosszát

$$L_{\text{kib}} = \frac{1}{2g} \int_{v_1}^{v_2} K dv^2 \quad (1.12)$$

A kilebegtetési szakaszon a sebességet megközelítően egyenlőnek vehetjük a siklasi szakasz sebességével, ezért a (1.12) egyenletben az integrálást $v_{\min}^2 + v_{\text{sikl}}^2$ között kell végrehajtani.

Ha figyelembe vesszük, hogy a kilebegtetés folyamán nagy állásszögek esetén a jósági tényező (K) szűk határok között változik, akkor egy középértéket véve $K = \text{const}$ esetén a kilebegtetési szakasz hosszának megközelítő összefüggését kapjuk

$$L_{\text{kilb}} \approx \frac{K}{g} (v_{\text{sikl}}^2 - v_{\min}^2) \quad (1.13)$$

ahol, $K = K_{\max.}$ -nak vehető (Pisnov V. Sz. szerint)

A függőleges süllyedés számításánál Pisnov szerint a következő feltételezésekből indulhatunk ki.

1. A repülőgép érintőleges gyorsulását (\dot{v}) a függőleges süllyedés folyamán azonosnak tekintjük a függőleges süllyedés kezdetének pillanatában lévő gyorsulással:

$$\dot{v} \approx \text{const} = \dot{v}_1 = -\frac{F_x}{m} \quad (1.14)$$

Az ilyen feltételezés azon alapszik, hogy a függőleges süllyedéskor a repülőgép sebessége csökken, de az ellenállási erőtényező (c_x) növekszik (mivel az állásszög (α) nő). Így első megközelítésben a légellenállási erő F_x közel állandó marad.

2. A függőleges süllyedéskor a felhajtóerő tényezőt (c_y) változatlanul $c_{y\max.}$ -al egyenlőnek tekintjük. Ez utóbbi feltételezést azért tehetjük meg, mert az állásszög (α) függőleges süllyedéskor szűk határok között változik, így a felhajtóerő tényező (c_y) változása jelentéktelen.

3. A függőleges süllyedő sebességet (v_y) a vízszintes repülési sebességhez (v) képest kicsinek tekintjük.[7]

A korszerű utasszállító repülőgépeknél a függőleges süllyedő sebesség $v_y \approx 2 + 4 \text{ m/s}$, ugyanakkor a vízszintes repülési sebesség összetevő nagysága $v_x \approx v = 60 + 80 \text{ m/s}$, ami igazolja a feltételezésünket.

Ilyen peremfeltételek mellett a repülőgép pályamenti sebessége a függőleges süllyedési szakaszon a következő kifejezéssel határozható meg

$$v = v_{\min} - g \frac{c_x}{c_y} t \quad (1.15)$$

mivel a függőleges süllyedés kezdetén

$$F_y = G$$

és

$$F_x = \frac{c_x}{c_y} F_y = \frac{c_x}{c_y} G \quad (1.16)$$

A felhajtóerő

$$F_y = \frac{\rho}{2} v^2 Ac_y = \frac{\rho}{2} Ac_y (v_{\min} - g \frac{c_x}{c_y} t)^2 \approx \frac{\rho}{2} v_{\min}^2 Ac_y - \rho Ac_y g \frac{c_x}{c_y} t v_{\min}$$

és a különbség

$$G - F_y = \rho Ac_y g \frac{c_x}{c_y} t v_{\min} \quad (1.17)$$

A függőleges süllyedés mozgásegyenletéből

$$G - F_y = m \frac{dv_y}{dt}$$

Határozzuk meg a (1.17) egyenlet segítségével a repülőgép függőleges gyorsulását

$$\frac{dv_y}{dt} = \rho A c_y g \frac{c_x g}{c_y G} t v_{\min} = \frac{2g^2 c_x t}{v_{\min} c_y} \quad (1.18)$$

ahol

$$\rho A c_y = \frac{2G}{v_{\min}^2}$$

A (1.18) egyenletet integrálva $t_1 = 0$, $v_{y1} = 0$ -tól t , v_y -ig megkapjuk a függőleges süllyedő sebességet

$$v_y = \frac{g^2 c_x t^2}{v_{\min} c_y} \quad (1.19)$$

Tovább integrálva a (1.19) egyenletet a függőleges süllyedés magasságát kapjuk

$$H = \frac{g^2 c_x t^3}{3v_{\min} c_y} \quad (1.20)$$

Az (1.20) egyenletből megkapjuk a függőleges süllyedés idejét adott magasságról:

$$t = \sqrt[3]{\frac{3Hv_{\min}c_y}{g^2c_x}} \quad (1.21)$$

Végül a (1.15) összefüggés felhasználásával, figyelembe véve a (1.21) egyenletben leírtakat meghatározzuk a leszállási sebességet

$$v_{\text{lez}} = v_{\min} \left[1 - \sqrt{\frac{3Hg}{v_{\min}^2} \left(\frac{c_x}{c_y} \right)^2} \right] \quad (1.22)$$

Ha a függőleges süllyedés magasságát átlagosan $H \approx 0,7\text{m}$, a jósági tényezőt $K \approx 5$, a minimális sebességet $v_{\min} \approx 60\text{m/s}$ értékekre vesszük, akkor a (1.22) egyenlet alapján azt kapjuk, hogy

$$v_{\text{lez}} = 0,94v_{\min}$$

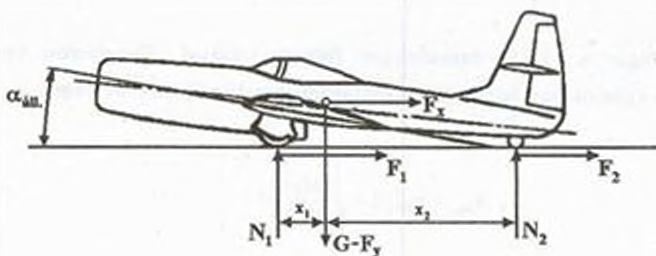
Ezt az adatot használják általában a számításoknál a leszállási sebesség meghatározásánál

$$v_{\text{lez}} = 0,94 \sqrt{\frac{2G}{\rho Ac_{y_{\min}}}} \quad (1.23)$$

Leszállás után a repülőgép kigurul a leszállópályán. Kigurulás közben a repülőgépre a következő erők hatnak:

- felhajtóerő $F_y = \frac{\rho}{2} v^2 Ac_y$
- légellenállási erő $F_x = \frac{\rho}{2} v^2 Ac_x$
- nehézségi erő (súly) G
- a kerekek reakcióereje N_1 és N_2

- a kerekek gördülő surlódási ereje F_1 és F_2



2.sz. ábra

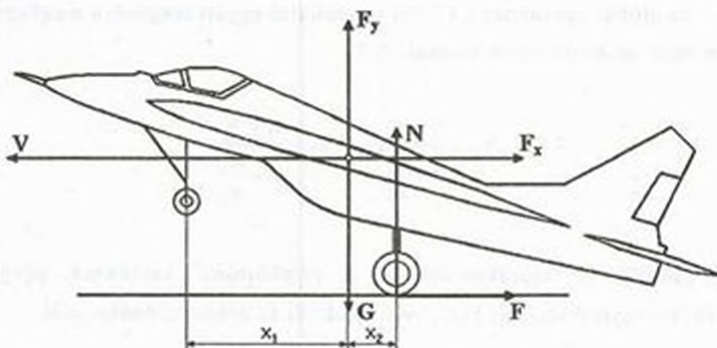
A repülőgép kigurulása, amelynél a főfutókerekek a súlypont előtt vannak elhelyezve

Az olyan repülőgép, amely farokkerékes futóművel van ellátva és a főfutók a repülőgép súlypontja előtt, a farokfutómű a súlypont mögött helyezkedik el hárompontos leszállást hajt végre (2. ábra). [6,7]

Ekkor a teljes kigurulási szakaszon az úgynevezett állóhelyzetbeni állásszög $\alpha_{\text{áll}}$ változatlan. (A szárny húrja és a vízszintes felület közötti szög a repülőgép álló helyzetében.)

Az olyan repülőgép amely orrfutóművel van ellátva és a főfutók a repülőgép súlypontja mögött helyezkednek el, általában 2 pontos a főfutómű kerekeire való leszállást hajtják végre. A kigurulás utolsó szakaszában engedi le a gép orrát a repülőgépvezető és a kigurulás végén van hárompontos gurulás (3. ábra).

Megfelelő közelítéssel azt mondhatjuk, hogy ez utóbbi esetben az állásszög a kigurulás alatt állandó és megfelel a $c_y = c_{y_{\text{max}}}$ -hoz tartozó állásszögnek, azaz α_{krit} . Így a kigurulás számításánál függetlenül a futómű típusától az állásszöget (α) változatlanak tekinthetjük.



3.sz. ábra
A repülőgép kigurulása, amelynél a főfutókerekek a súlypont mögött vannak elhelyezve

A repülőgép kigurulásának mozgásegyenletei:

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x - F_1 - F_2 \quad (1.24)$$

$$G - F_y = N_1 + N_2 \quad (1.25)$$

Az orrkerekes futóművel ellátott gépeknél - a főfutómű a repülőgép súlypontja mögött van - az előbbi egyenleteknek megfelelően feltételezhető, hogy $F_1 = N_1 = 0$.

A farokkerekes repülőgépeknél az F_1 és F_2 surlódási erők helyett általában ezeknek az eredőjét (F) egyszerűbb kiszámítani.

Az eredő F surlódási erő meghatározásához először határozzuk meg a kerekek reakcióerőit az N_1 és N_2 -t, feltételezve, hogy az aerodinamikai erők nyomatéka a repülőgép súlypontjára nézve zérussal egyenlő. Ekkor a 2.ábrának megfelelően:

$$N_1 x_1 = N_2 x_2$$

Ez utóbbi egyenletet a (1.25) egyenlettel együtt megoldva megkapjuk a kerekek reakcióerőinek értékét:[6,7]

$$N_1 = \frac{G - F_y}{1 + \frac{x_1}{x_2}}, \quad N_2 = \frac{G - F_y}{1 + \frac{x_2}{x_1}}$$

Jelöljük a főfutókerekek és a farokfutómű kerekének gördülő súrlódási együtthatóit μ_1 és μ_2 -vel, írjuk fel az eredő súrlódási erőt

$$F = F_1 + F_2 = \mu_1 N_1 + \mu_2 N_2 = (G - F_y) \mu \quad (1.26)$$

ahol az átszámított súrlódási tényező

$$\mu = \frac{\mu_1}{1 + \frac{x_1}{x_2}} + \frac{\mu_2}{1 + \frac{x_2}{x_1}} \quad (1.27)$$

A futómű típusától függetlenül a (1.24) egyenletet felírhatjuk a következő alakban:

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x - \mu(G - F_y) \quad (1.28)$$

ahol az orrkerekek a repülőgépnél $\mu = \mu_2$ -vel, a farokkeres repülőgépnél pedig μ az (1.27) egyenletben leírtak szerint számolandó.

Integrálva az (1.28) egyenletet megkapjuk a repülőgép kigurulásának idejét

$$t = \frac{G}{g} \int_0^{v_{max}} \frac{dv}{F_x + \mu(G - F_y)}$$

vagy

$$t = \frac{1}{g} \int_0^{v_{\max}} \frac{dv}{(c_x - \mu c_y) \frac{\rho A v^2}{2G} + \mu} \quad (1.29)$$

A (1.28) egyenletben szereplő $\frac{dv}{dt}$ írjuk fel a következő alakban:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dL}$$

amelyből integrálás után megkapjuk a kigurulási úthosszat.

$$L_{\text{kigur.}} = \frac{1}{2g} \int_0^{v_{\max}^2} \frac{dv^2}{(c_x - \mu c_y) \frac{\rho A v^2}{2G} + \mu} \quad (1.30)$$

Mivel a kigurulás, vagy másképpen nevezve kifutás ideje alatt általában használják a fékeket, így a súrlódási tényező a kigurulás ideje alatt nagyobb, mint a nekifutás ideje alatt felszálláskor.

A súrlódási tényező értékét egy közepes intenzitású fékezésnél $\mu = 0,2 + 0,3$ -nak vehetjük.

A repülőgép teljes leszállási úthosszát megkapjuk a (1.1), (1.8), (1.12) és (1.30) egyenletek összegzésével, hiszen az a rövid útszakasz amely a függőleges süllyedés útszakasza a többihez képest elhanyagolható.

Az (1.30) egyenletben szereplő integrál analitikus módszerrel számítható és helyette V.P. Vetsinkin² összefüggését használhatjuk:

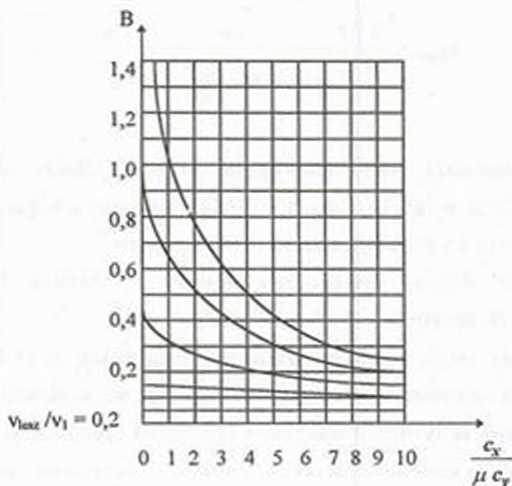
$$L_{\text{kigur.}} = \frac{v_i^2}{2g\mu} B \quad (1.31)$$

ahol a v_1 az a sebesség, amellyel a repülőgép vízszintes repülést tudott volna végrehajtani, farokkerekes gépnél a szárny állóhelyzetbeni állásszögével, orrkerekes gépnél a $c_y = c_{y \max}$ -nak megfelelő α_{krit} állásszöggel.

A B együttható a következő alakban írható fel:

$$B = \frac{I}{\frac{I c_x}{\mu c_y} - I} \ln \left[I + \left(\frac{I c_x}{\mu c_y} - I \right) \frac{v_{lez}^2}{v_1^2} \right]$$

A B együttható meghatározása a 4.ábra segítségével lehetséges a $\frac{v_{lez}}{v_1}$ és az $\frac{I c_x}{\mu c_y}$ jellemzők ismeretében.



4. ábra
Grafikon a repülőgép kigurulási úthosszának meghatározásához

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk bemutatta a repülőgép leszállási úthossza meghatározásának elméleti megközelítését. Áttekintettem a leszállás szakaszait.

A függőleges süllyedés kiszámításánál figyelembe vettem a Pisnov féle feltételeket.

Kitértem a kigurulásra különválasztva azt a két esetet, amikor a főfutókerekek a súlypont előtt vannak és amikor a súlypont mögött helyezkednek el.

Végezetül meghatároztam a repülőgép teljes leszállási úthosszát Vetsinkin összefüggésének segítségével illetve eljutottam a repülőgép kigurulási úthosszának meghatározására szolgáló grafikon megrajzolásához.

A feldolgozott téma nagyrészt csak külföldi irodalomban szerepel, ezért úgy gondolom, hogy a repülés egyik legkritikusabb fázisának ez gyakorlatias felhasználása jól használható a kiképzéshez és záródolgozatok illetve TDK-k készítéséhez.

¹ Az (1.2) egyenletben elhanyagoltuk a negatív előjelet, azaz előzőekkel ellentétben siklaskor a Θ szög előjelét pozitívnak vesszük.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] - Aszlanjan A. E. Szisztyemi avtomatycseszkovo upravlenijja poljotom letatyelnih apparatov, Kijevszkoje vizssee voennee aviacionnoe inzsenyernoje ucsilise, Kijev, 1984.
- [2] - Bajborogyina J. V. Bortovije szisztyemi upravlenijja poljotom, Transzport, Moszkva, 1984.
- [3] - Békési Bertold A repülőgépek irányításának automatizálása leszálláskor, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, Magyar Honvédség Szolnoki Repülőtiszt Főiskola, 1996/2, 13-24old.
- [4] - Békési Bertold A repülőgép siklása homogén közegben, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Repülőtiszt Intézet, 1997/1.
- [5] - Bodner V. A. Szisztyemmi upravlenijja letatyelnimi apparatami, Masinosztroenyije, Moszkva, 1973.
- [6] - Gorosenko B. T. Dinamika poljota szamoljota, Goszudarsztvennoe izdatyelsztvo oboronnoj promislennosztji, Moszkva, 1954.
- [7] - Osztoszlavszkij I. V., Sztrazseva I. V. Dinamika poljota, Masinosztroenyije, Moszkva, 1969.
- [8] - Re/914 Vadászrepülőgépek automatikus vezérlő rendszerei, Honvédelmi Minisztérium kiadása, 1981.

Since the beginning flying has almost been impossible without carrying the landing out.

In this article we are going to determine the distance of landing with analytical method.

I can have a look at different sections of landing (for example: gliding to safety altitude, flare out, climb down and landing run).

At last we going to study suppositions of Pisznov.