



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem**

Közlekedésmérnöki Kar

Közlekedésautomatika Tanszék

**Repülőgépen alkalmazható szélbecslő
algoritmusok vizsgálata**

OTDK dolgozat

Baár Tamás

Konzulens: Bauer Péter

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben című program támogatta.

A TDK dolgozat elkészülésében külön köszönet illeti konzulensemét, Bauer Pétert aki segítségével és útmutatásával jelentős mértékben hozzájárult a dolgozat sikeres elkészítéséhez.

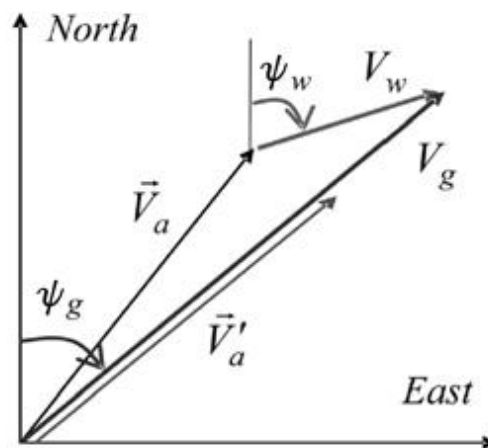
Tartalom

Szélbecslés szükségessége	4
Euler szögek.....	5
A kipróbált szélbecslő eljárások áttekintése	7
Szélbecslés Euler-szögek segítségével.....	7
Tesztelés	11
Az algoritmus javítása.....	14
Szélbecslés GPS és Pitot cső segítségével.....	15
Tesztelés	18
A kiválasztott algoritmus tesztelése C környezetben, valós adatokon	28
Eredmények, továbblépési lehetőségek	41
Felhasznált Irodalom.....	43

Szélbecslés szükségessége

Az MTA SZTAKI-ban rendelkezésre álló E-flite Ultrastick 25e típusú távirányítású repülőgép, a végzett átalakítások után képes önálló repülésre. Ez azt jelenti, hogy térképen megadott útvonalpontok alapján végig tud repülni egy útvonalon. Amennyiben ezek a pontok túlságosan közel vannak egymáshoz, és a repülőgép fizikai korlátjai miatt nem tudná a megadott sorrendben érinteni őket, a fedélzeti algoritmus egy új útvonalat számít ki, ami lehetővé teszi a repülési feladat végrehajtását, az adott pontok érintésével. A számítógépes szimulációk bebizonyították, hogy az eljárás szélcsendes időjárás során megfelelően működik. A valóságban azonban ilyen szituáció szinte elképzelhetetlen, a szél hatásával minden repülés során számolni kell.

A kérdés az, hogy a fellépő széllekedések hogyan befolyásolják az említett repülőgép pályáját. A szél a repülőgépet az optimális pályájáról eltéríti, „lefújja”, ezzel pontatlanabbá téve a követési eljárást. A dolgozatban kidolgozott algoritmus a szélnek ezt az eltérítő hatását számítja ki. Fontos megjegyezni, hogy a modell kidolgozása során egyszerűsítésekkel élünk. A szél hatását csupán 2 dimenzióban, észak-kelet koordináta rendszerben modelleztük, és feltételeztük, hogy a repülés ideje alatt az iránya nem változik. A szél hatása a következő ábrán látható.



1. ábra Szél hatása a repülési sebességre (az ábra forrása [5])

Itt V_a a repülőgép levegőhöz képesti sebességének irányát jelzi, V_w a szél irányát, míg V_g a kettő összegét mutatja, azaz a repülőgép tényleges haladási irányát a földhöz képest. Ezt a V_g sebességet tudjuk GPS segítségével érzékelni. Az ábrából kitűnik, hogy erős szél, azaz nagy V_w esetén V_a és V_g jelentősen eltérhet egymástól. Így a számítások pontatlanok lesznek.

Euler szögek

A repülőgép irányítása során a repülőgép orientációját Euler szögek segítségével írjuk le. Ezért szükséges először pár szót szólni róluk. A követési eljárás során párhuzamosan két koordináta rendszert alkalmazunk. Az első a repülőgéphez rögzített Test koordináta-rendszer, ami a repülőgéppel együtt mozog, illetve forog, X tengelye a repülőgép hossz tengelye. Y tengelye az X tengelyre merőleges másik vízszintes tengely. A Z tengely az előző kettőre merőleges, függőleges irányú lefelé mutató tengely. A másik koordináta rendszer a Föld koordináta rendszer, ami a Föld egy pontjához van rögzítve. X tengelye az északi, Y tengelye a keleti irányba mutat. Z tengelye az X és Y tengelyekre merőleges, függőleges tengely, amely lefelé mutat. A két koordináta rendszer átjárható, meghatározott sorrendű forgatásokkal az egyik rendszerben

megadott vektor átszámítható a másik rendszerbe [2]. Ezt a transzformációt írják le az Euler-szögek. A három Euler-szög a következő: ψ azimut szög (z tengely körüli forgatás), θ bólintási szög (y tengely körüli forgatás), ϕ bedöntési szög (x tengely körüli forgatás).

A pályakövető eljárás a repülés során ismert helyzet és orientáció adatokat követel meg a repülőgépre vonatkozóan. Ezért fontos többek között az Euler szögek ismerete. A szükséges adatokat nem tudjuk közvetlenül mérni, csak mért adatokból becsülni. Ehhez kifejlesztésre került egy orientáció (attitude) becslő [1]. A becslő gyorsulást, mágneses térerősséget (mindhármát Test koordinátarendszerben), barometrikus és Pitot cső nyomást, illetve GPS adatokat használ fel.

Az Euler szögek becsléséhez két egymástól független vektornak a mérése szükséges. A két vektor a Föld mágneses terét leíró vektor, illetve a GPS által mért sebesség vektor az [1]-ben publikált módszer szerint. Repülés közben a becselőben alkalmazott kiterjesztett Kálmán szűrő ezeknek az adatoknak a segítségével végzi a szükséges szögek meghatározását. A GPS-ből származó adatok a korábban bemutatott módon befolyásolva vannak a szél által. Így a belőlük származtatott Euler szögek és az azokból számított további adatok is hibával terheltek. Az útvonalkövetésben való alkalmazáson túl ezért is volt szükség egy eljárás kidolgozására, aminek segítségével a szél erőssége becsülhető és a pontatlanság csökkenthető.

A kipróbált szélbecslő eljárások áttekintése

Szélbecslés Euler-szögek segítségével

Első megközelítésben egy William Premierlani által kidolgozott eljárást próbáltunk ki [3], amit Konzulensem alakított át [4], hogy alkalmazható legyen a rendelkezésre álló repülőgépen.

Az eredeti eljárás [3] szerint, a háromdimenziós szél vektor meghatározható a GPS sebesség és a test és föld rendszer közötti transzformációs mátrixa segítségével. Az alap összefüggés az

$$1. \quad S=V+W \text{ egyenlet.}$$

Ahol S a GPS által mért sebesség vektora, V a repülőgép levegőhöz képesti sebessége Föld koordináta rendszerben és W a szélesebesség szintén Föld koordináta rendszerben. Ha feltételezzük azt, hogy a szél iránya nem változik, akkor a szélirány becslésére lehetőségünk van minden olyan időpillanatban, amikor a repülőgép repülési állapota (repülési iránya) megváltozik. Két időpillanatot tekintve felírható a következő egyenletrendszer

$$2. \quad S_1=V_1+W_1$$

$$S_2=V_2+W_2, \text{ ahol } W_1=W_2.$$

Ezeket az összefüggéseket átrendezve, kaphatjuk a következő egyenleteket:

$$3. \quad S_2-S_1=V_2-V_1,$$

$$4. \quad W = \frac{[(S_2+S_1)-(V_2+V_1)]}{2}.$$

Amennyiben a repülőgép irányt változtat, meghatározhatjuk a V_a repülési sebességet a 3. egyenlet és a transzformációs mátrix felhasználásával. Ehhez feltételezzük, hogy a repülési sebesség nagysága állandó és mindig párhuzamos a repülőgép X tengelyével.

Ilyenkor a sebességvektorban bekövetkező változás az irányváltoztatás hatására jön létre.

Ekkor a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$5. S_2 - S_1 \approx V_a * \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * (F_2 - F_1)$$

Ahol

V_a a sebesség nagyság

ψ a maradó azimut szög eltérés a transzformációs mátrixban

F a repülőgépet jellemző, az Euler szögeket tartalmazó transzformációs mátrix megfelelő oszlopa.

Ebből a repülési sebesség közelítőleg a következőképpen számolható

$$6. V \approx \frac{|S_2 - S_1|}{|F_2 - F_1|}$$

A maradó oldalirányú azimut szög eltérés (yaw) becslésére két egységvektort határozhatunk meg

$$7. s_{21} = \frac{S_2 - S_1}{|S_2 - S_1|}$$

$$f_{21} = \frac{F_2 - F_1}{|F_2 - F_1|}$$

A maradó oldalirányú azimut szög eltérésre egy közelítő megoldást kaphatunk, ha az így megadott vektorokkal felírjuk a következő egyenletrendszert

$$8. \begin{bmatrix} s_{21x} \\ s_{21y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_{21x} \\ f_{21y} \end{bmatrix}$$

Minden ismert adatot visszahelyettesítve a 4. egyenletbe a következő kifejezéseket kapjuk a szélirányra.

$$9. W_x = \frac{S_{1x} + S_{2x} - V * (\cos(\psi) * (F_{1x} + F_{2x}) - \sin(\psi) * (F_{1y} + F_{2y}))}{2}$$

$$W_y = \frac{S_{1y} + S_{2y} - V * (\cos(\psi) * (F_{1y} + F_{2y}) - \sin(\psi) * (F_{1x} + F_{2x}))}{2}$$

$$W_z = \frac{S_{1z} + S_{2z} - V * (F_{1z} + F_{2z})}{2}$$

9.

A most ismertetett módszer először megállapítja a repülőgép sebességének nagyságát, majd kiszámolja a szükséges korrekciókat és végül a szél komponensek nagyságát. A tanszéki repülőgép rendelkezik Pitot csővel, aminek segítségével mérésel meghatározhatjuk a repülőgép tengely irányú sebességét, így ennek becslése nem szükséges.

A [4]-ben ismertetett ennek megfelelően átalakított algoritmus röviden:

Test koordináta rendszerben a repülőgép sebessége:

$$V_a^B = \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ugyan ez átszámítva Föld koordináta rendszerbe:

$$10. V_a^E = \begin{bmatrix} \cos\theta \sin\psi \\ \sin\theta \sin\psi \\ -\cos\psi \end{bmatrix} * V_a$$

Az eredeti eljárásban csak ψ -re tételeztünk fel hibát, most θ – ra is. A korrigált szögek a következőképpen írhatóak fel.

$$11. \psi' = \psi + \psi_e$$

$$\theta' = \theta + \theta_e$$

Ahol ψ', θ' a korrigált Euler-szögeket jelentik. ψ, θ a szögbecslő által becsült szögek, míg az e indexes tagok a hibákat jelölik.

A hibákat is figyelembe véve, közelítőleg a következő összefüggést kapjuk

$$12. V_a^E = \begin{bmatrix} c\theta_e c\psi_e & -c\theta_e s\psi_e & s\theta_e c\psi c\psi_e - s\theta_e s\psi s\psi_e \\ c\theta_e s\psi_e & c\theta_e c\psi_e & s\theta_e s\psi c\psi_e + s\theta_e c\psi s\psi_e \\ 0 & 0 & c\theta_e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi \\ -\sin\theta \end{bmatrix} * V_a = C * F * V$$

ahol F és V ismert értékeket, C korrekciós értékeket tartalmaz.

Amennyiben állandó szél értéket veszünk figyelembe az $S^E = V_a^E + W^E$ egyenlet a következőképpen alakul ((1) és (2) a különböző időpillanatokban mért értéket jelöli):

$$13. S^E(1) - S^E(2) = V_a^E(1) - V_a^E(2) = C(F(1)V(1) - F(2)V(2))$$

$$\Delta S = C \Delta F$$

$$\Delta S = \begin{bmatrix} \Delta s_x \\ \Delta s_y \\ \Delta s_z \end{bmatrix} \quad \Delta F = \begin{bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \\ \Delta f_z \end{bmatrix}$$

$$14. \begin{bmatrix} \Delta s_x \\ \Delta s_y \\ \Delta s_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_e c\psi_e & -c\theta_e s\psi_e & s\theta_e c\psi c\psi_e - s\theta_e s\psi s\psi_e \\ c\theta_e s\psi_e & c\theta_e c\psi_e & s\theta_e s\psi c\psi_e + s\theta_e c\psi s\psi_e \\ 0 & 0 & c\theta_e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \\ \Delta f_z \end{bmatrix}$$

Innen $c\theta_e$ és ψ_e meghatározható. $c\theta_e = \frac{\Delta s_z}{\Delta f_z}$, és $s\theta_e = \pm \sqrt{1 - c^2\theta_e}$

$c\theta_e$ -t és $s\theta_e$ -t a 14. egyenletbe helyettesítve, átrendezések után kapjuk hogy

$$15. \begin{bmatrix} \Delta s_x \\ \Delta s_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi_e & -s\psi_e \\ s\psi_e & c\psi_e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

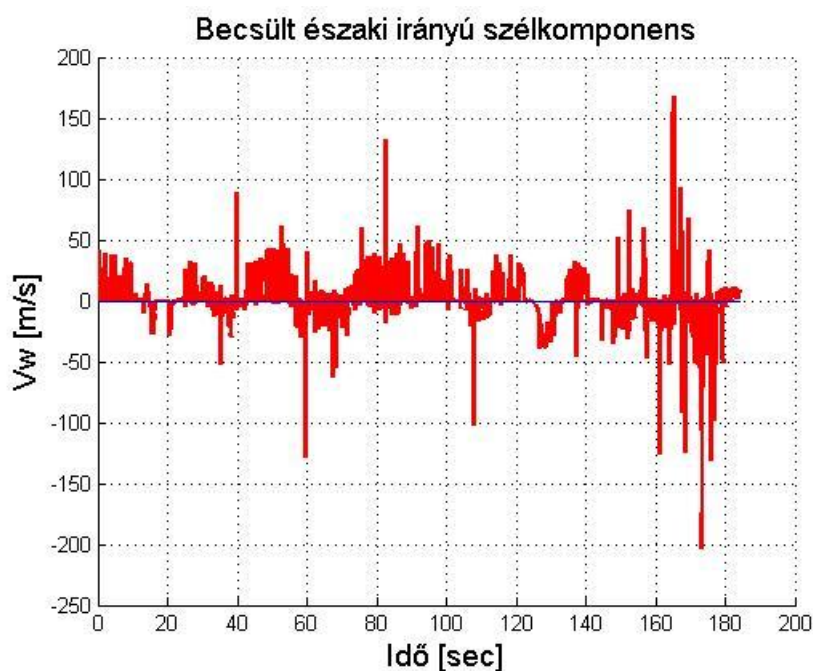
A (15.) egyenletrendszerből ψ_e kifejezhető:

$$s\psi_e = \frac{\Delta s_y v_x - \Delta s_x v_y}{v_x^2 + v_y^2} \Rightarrow \psi_e$$

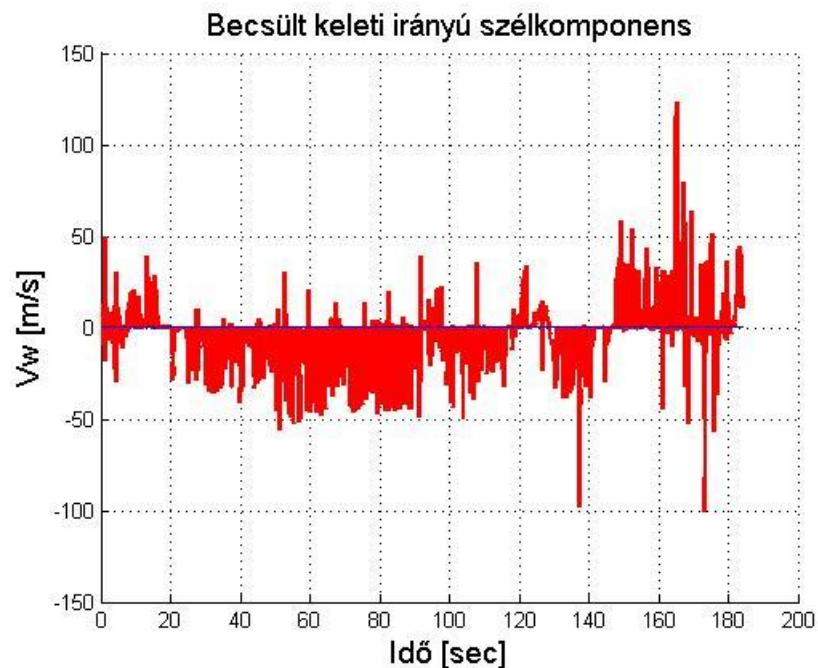
A kapott értékek kiszámítása után a 15. egyenletrendszert le kell ellenőrizni. Amennyiben a kapott értékek nem elégítik ki az egyenletrendszert, a másik θ_e értéket kell választani és ψ_e -t újra ki kell számolni.

Tesztelés

Ezt az eljárást számítógépen teszteltük. A tesztelés során Matlabot használtunk. A fent levezetett algoritmust Matlabban egy *.mat fájlban leprogramoztuk. Előre elkészített próbafájlok segítségével teszteltük. A próbafájlok különböző, szimulált repülések adatait tartalmazták. Voltak fájlok amik szeles időjárást szimuláltak, voltak amik szélcsendet, illetve voltak olyanok amiknél különböző mérési hibákat is számításba vettünk. Belőlük lehetett kinyerni a teszteléshez szükséges adatokat is. Az eljárás lényege az volt, hogy a szél értékeket mi állítottuk be előre, így tudtuk, hogy milyen eredményeket kell kapjunk ha a programunk helyesen működik. Láthattuk, hogy az elkészített programunk helyesen következtet-e a szél nagyságára és irányára. A lefuttatott Matlab algoritmus eredményeit összehasonlítottuk a szimulációkban eltárolt adatokkal. Szélcsendes szimulációra a következő értékeket kaptuk.



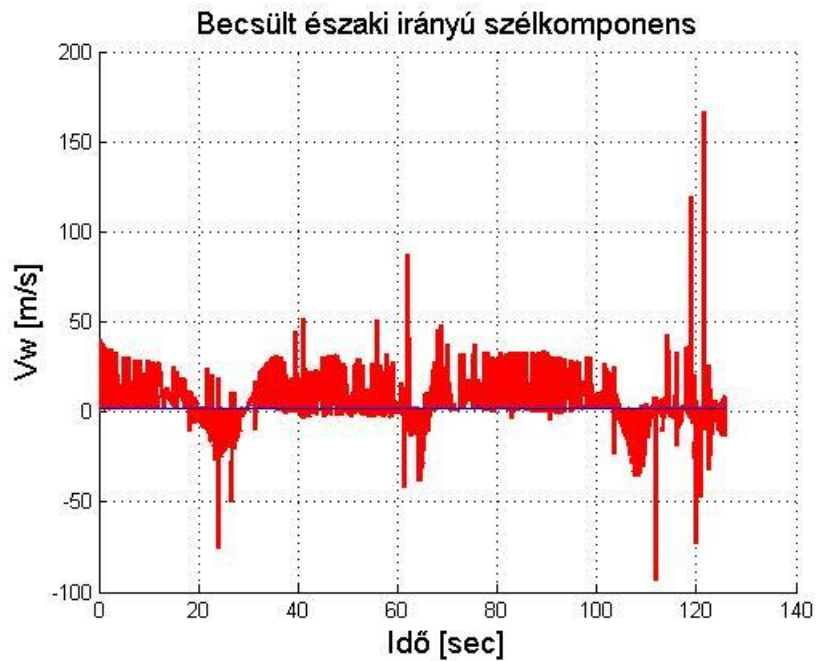
2. ábra Becsült északi irányú szélkomponens szélcsendben



3. ábra Becsült keleti irányú szélkomponens szélszélben

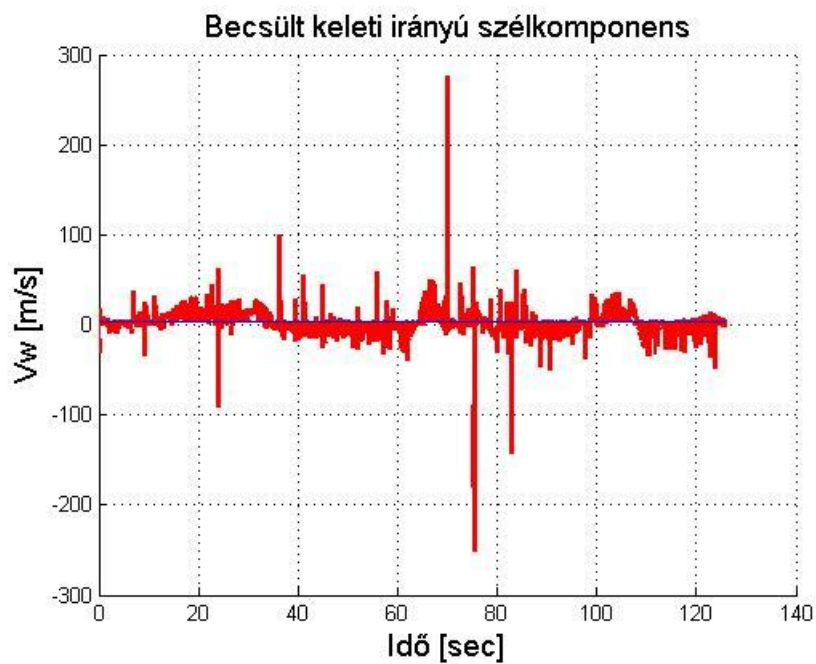
Szélszélcsend szimuláltunk, tehát mind az északi mind a keleti komponensre 0-hoz közeli értéket kellett volna kapjunk. A grafikonokból látszik, hogy az értékek 0 körül ingadoznak, de az eredmény nagyon zajos. Megvizsgáltuk széles időjárás esetén is. A

megadott szélvektor $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix}$ volt. Az eredményeket külön ábrában, északi és déli szélkomponensként ábrázoltuk. A következő értékeket kaptuk



4. ábra Becsült északi irányú szélkomponens szeles időben

Ezen eredmények azt mutatják, hogy az algoritmus helyenként rátalál a helyes értékre, de általában igen nagy eltéréssel körülötte ingadozik. Emiatt a bizonytalanság miatt az algoritmust ebben a formájában nem alkalmas arra, hogy a repülőgépen használhassuk.



5. ábra becsült keleti irányú szélkomponens szeles időben

Az algoritmus javítása

A Θ_e komponens bizonytalan számítása tűnt a problémának, ezért az eljárást próbáltuk finomítani, az egyenlet rendszert más módon megoldani. Az új módszer a harmadik egyenletet elhanyagolja.

$$16. \begin{bmatrix} c\Theta_e c\psi_e & -c\Theta_e s\psi_e & s\Theta_e c\psi c\psi_e - s\Theta_e s\psi s\psi_e \\ c\Theta_e s\psi_e & c\Theta_e c\psi_e & s\Theta_e s\psi c\psi_e + s\Theta_e c\psi s\psi_e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta f_x \\ \Delta f_y \\ \Delta f_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta s_x \\ \Delta s_y \end{bmatrix} = 0$$

Az egyenlet bal oldalát elneveztük $f(x)$ -nek és így $f(x)=0$ egyenletet kaptuk. $f(x)$ egy nem lineáris függvénye az $x = \begin{bmatrix} \Theta_e \\ \psi_e \end{bmatrix}$ vektornak. Ha ismerjük x kezdeti értékét akkor a Newton-Raphson módszer segítségével megoldhatjuk (lásd [6]).

Először vettük a függvény Taylor soros közelítését x_k körül

$$17. f(x_{k+1}) \approx f(x_k) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} |x_k (x_{k+1} - x_k) = 0$$

Majd ebből közelítettük x_{k+1} -et

$$18. x_{k+1} \approx x_k - \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x} |x_k \right]^{-1} * f(x_k)$$

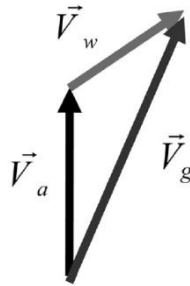
Az iterációt addig folytatjuk, amíg el nem érünk egy megadott toleranciát.

$$19. \|x_{k+1} - x_k\|^F < \epsilon$$

A tesztelés ugyanúgy zajlott, mint az előző algoritmusnál. A Matlabban leprogramozott algoritmust ugyanazokkal a próbafájlokkal teszteltük. A tesztelés eredménye itt sem volt megfelelő, az előzőhöz hasonló hibákba ütköztünk. Így ennek az eljárásnak a további megvalósítását elvetettük, új szélbecslő eljárás alkalmazhatóságát kezdtük vizsgálni.

Szélbecslés GPS és Pitot cső segítségével

Az új megoldás az [5]-ben ismertetett eljárás. Ez az elgondolás egy GPS vevőt és egy Pitot csövet használ és az úgynevezett szélháromszög segítségével határozza meg a szélirányt és erősséget. A számítások során egy kiterjesztett Kálmán szűrőt alkalmaz.



6. ábra Szél háromszög

A bemutatott ábra a szél háromszöget szemlélteti. V_a a repülőgép Pitot csöve által mért a repülőgép tengelyével párhuzamos sebesség, V_w a szélesebesség, V_g a GPS által mért sebesség. Az ábrából látható, hogy amennyiben a V_g , illetve V_a sebességek ismertek V_w meghatározható.

$$20. V_w = V_g - V_a \approx V_g - C_b^n * \begin{bmatrix} 1 \\ \beta \\ \alpha \end{bmatrix} * V_{pitot}$$

C_b^n A transzformációs mátrix Test koordináta rendszerből Föld koordináta rendszerbe

β a csúszási szög

α az állásszög

Amennyiben a repülőgép irányt vált, fordul, a földi sebessége és sokszor a levegőben mért sebessége is változik az időben. Ezeknek a változóknak a segítségével becsülhető a szélirány és szélnagyság. Ez a módszer is állandó szélirányt és nagyságot feltételez.

A levegőhöz képesti sebességet (V_{pitot}) egy nyomásmérő segítségével számolhatjuk ki, amit a Pitot csőhöz csatlakoztatunk. A sebesség négyzete innen Bernoulli egyenletét felhasználva

$$21. V_{pitot}^2 = K * \frac{2\Delta P}{\rho}$$

ahol ΔP a dinamikus nyomás, ρ a levegő sűrűsége, K egy korrekciós tényező.

A Pitot cső ideális, egyenletesen áramló gázt feltételez, a valóságban azonban ez nem így van. A Pitot cső felhelyezésénél is adódhatnak hibák. A korrekciós tényező ezeket a hibákat korrigálja.

A V_a repülési sebesség, V_{pitot} Pitot cső által mért sebesség, α az állásszög és β az oldal irányú csúszás közötti összefüggés:

$$22. V_{pitot}^2 = |V_a|^2 \cos\alpha \cos\beta$$

Ami az előző egyenletet felhasználva írható úgy, hogy

$$23. V_a^2 = \frac{V_{pitot}^2}{\cos\alpha \cos\beta} = \frac{\Delta P}{\frac{\rho \cos\alpha \cos\beta}{2K}} = \frac{\Delta P}{sf}$$

Ahol sf egy korrekciós tényező a dinamikus nyomás és a V_{pitot}^2 között.

Ennél az eljárásnál is a szélesebbeséget és szélirányt szeretnénk megállapítani.

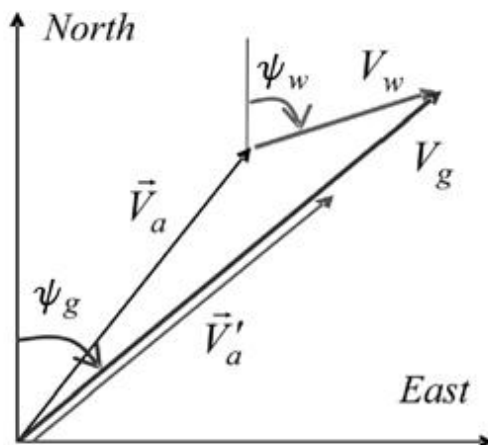
Az állapotokat random walk eljárásként modelleztük. A random walk egy matematikai leíró formula, amivel a valamilyen szinten véletlen által vezérelt folyamatokat szokták leírni. Le lehet írni például így egy gázmolekula útját, ahogy egy áramlásban halad, vagy például egy folyamatosan változó részvény értékét is.

A rendszer dinamika az $x = [V_w \ \psi_w \ s_f]^T$ állapot vektorral a következő

$$24. x_{(k+1)} = F x_{(k)} + w_k$$

$$\text{ahol } F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, w_k \sim N(0, Q_k)$$

A számításhoz szükséges sebességeket és szögeket a 7. ábra mutatja be. Itt ψ_g a repülőgép földhöz viszonyított haladási irányát adja meg a Föld koordináta tengely északi tengelyéhez viszonyítva. ψ_w A szél irányát adja meg, szintén a Föld koordináta tengely északi tengelyéhez viszonyítva.



7. ábra Szélháromszög (az ábra forrása [5])

Ha a szélháromszögre alkalmazzuk a koszinusztételt az alábbi összefüggést kapjuk

$$25. V_g^2 + V_w^2 - 2V_g V_w \cos(\psi_w - \psi_g) = V_a^2 = \frac{\Delta P}{sf}$$

V_g , illetve ψ_g a GPS egységből kapott adatok, V_a^2 a Pitot cső segítségével számítható. Az így nyert adatok segítségével felépíthető a Kálmán szűrő. A kezdő értékeket a szerzők a következőképpen határozták meg.

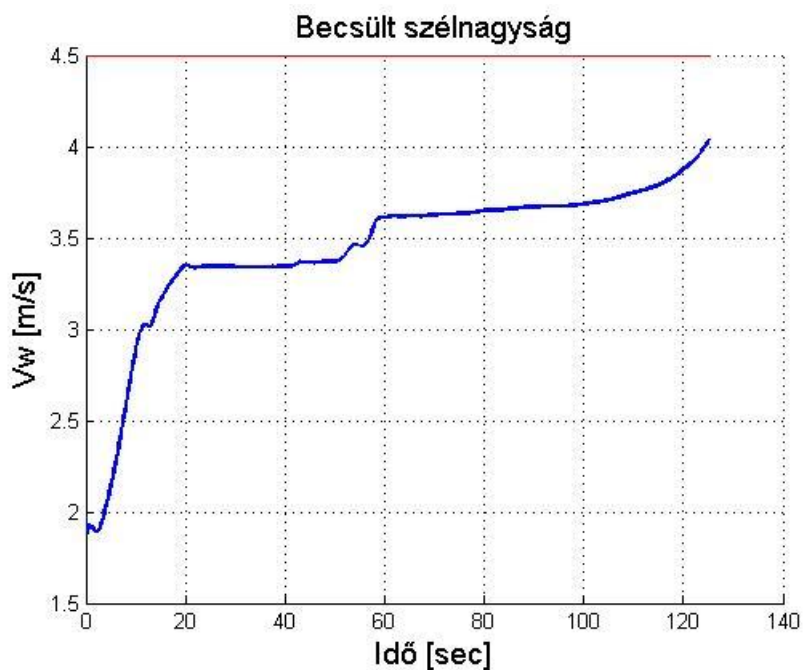
Először képezték egy $V'_a = V_a * \frac{V_g}{V_a}$ vektort, ami V_a nagyságú, de V_g irányába esik. Majd képezték V_g és V'_a különbségét. $(V_w)_{init} \approx V_g - V'_a$. Kezdeti szögnek pedig a GPS sebességvektor irányát veszik.

Tesztelés

A tesztelés a már említett módon zajlott, ugyan azokkal a próbafájlokkal. Először egy olyan Kálmán szűrőt készítettünk ami csak a V_w , illetve ψ_w tényezőket becsli, és ezek segítségével végez korrekciót.

A repülőgépen a GPS adatok frissítése 4hz-en történik (az egyéb adatoké 50 Hz-en), így a szimulációban szereplő adatok közül csak minden 12. adatot kell számításba venni. Ezért a kód, a köztes időben az előző értéket tartja. Ennek hatására a grafikonok lépcsőzetesen változnak, de a becslés, megfelelő.

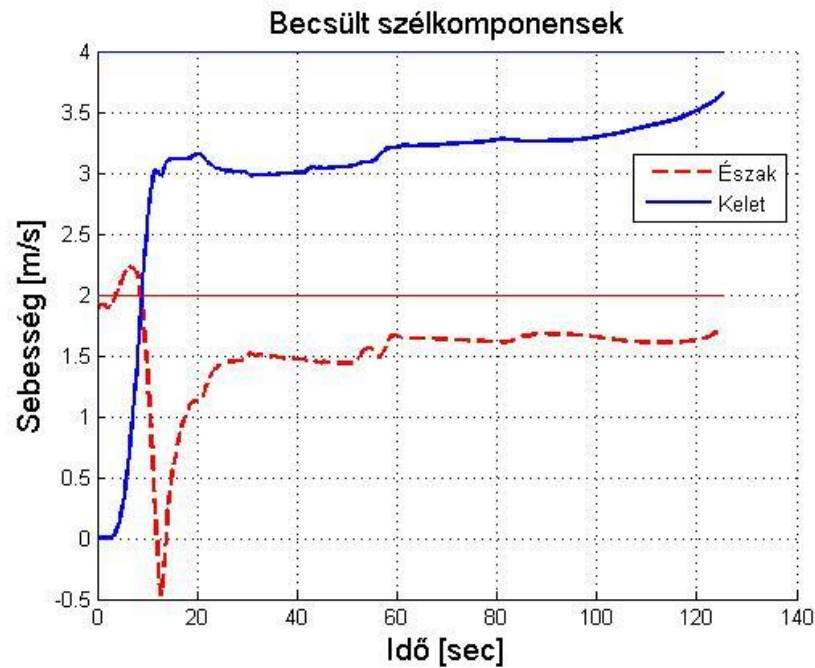
A kibővített Kálmán szűrő zajkovariancia mátrixainak beállítása után, a szimulációban megadott $W = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix}$ szélvektorra és a szimulált adatokra a következő eredményt kaptuk.



8. ábra Becsült szélnagyság

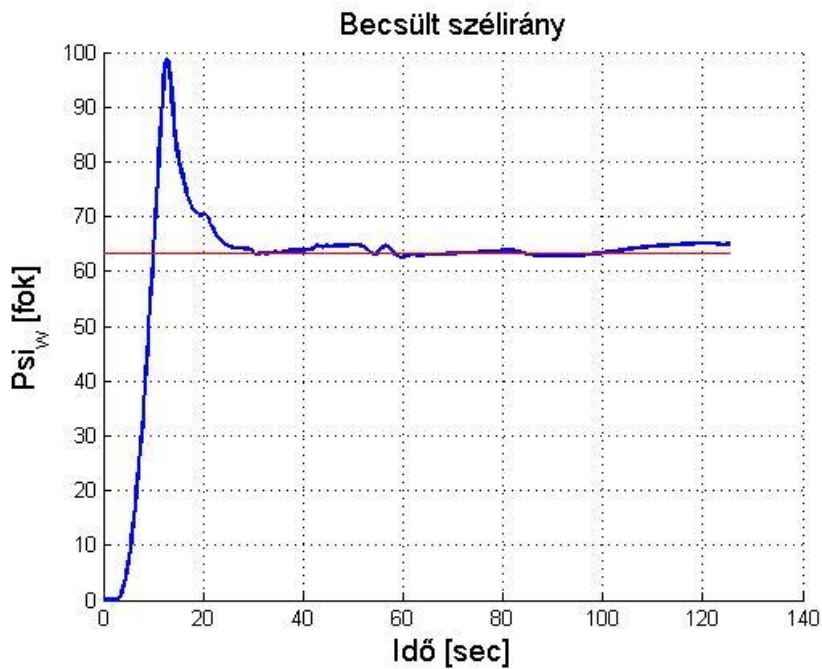
A 8. ábrán az előző eljáráshoz képest látható a jelentős javulás. Az ábrán egy piros vízszintes vonal jelzi a beállított értéket (W vízszintes síkban vett abszolútértékét), kékkel az algoritmus által számított értékeket tüntettük fel. Az eljárás egész jól közelíti a kívánt értéket.

Ezek után megvizsgáltuk a számított északi és keleti komponenseket külön-külön.



9. ábra Becsült szélkomponensek

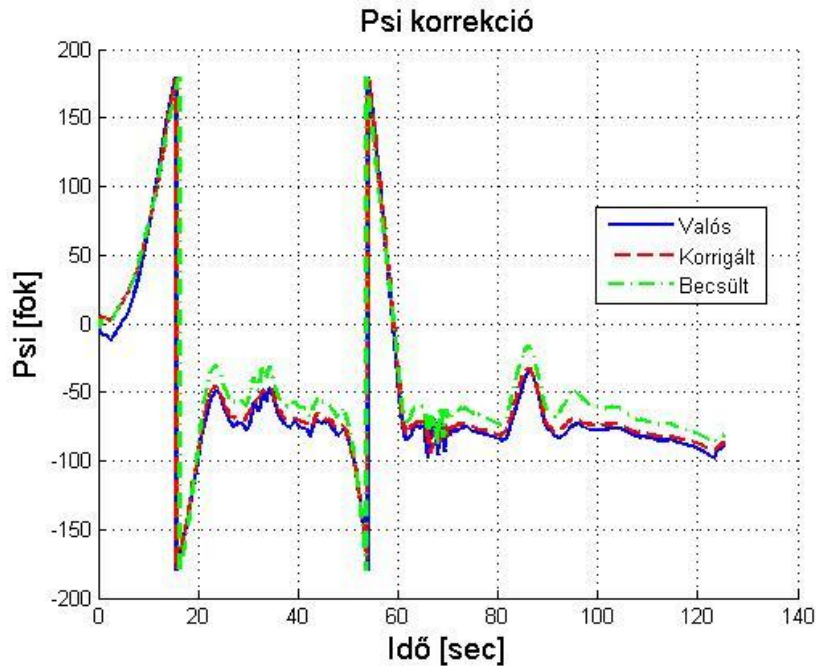
Az ábrából itt is látható a közelítés viszonylagos pontossága. A becslőnek körülbelül 20 másodpercre van szüksége ahhoz, hogy a számított komponensek a valós értékektől mindössze 1 m/s-mal térjenek el. Az idő előrehaladtával a becslés pontossága javul.



10. ábra Becsült szélirány

A szélirány becslésére jó eredményt kaptunk. Ezt mutatja be a 10. ábra. Az algoritmusnak ahhoz hogy megfelelő értékeket szolgáltatson itt is 20 másodperc körüli időre volt szüksége. A beállítás után a megadott szélirányt kis ingadozásokkal követi.

Az algoritmus segítségével elvégeztük a ψ szög korrekcióját is. Ennek eredményét mutatja be a következő ábra.



11. ábra Psi korrekció

Kékkel jelöltük a valós értéket. Zölddel van jelölve a szél hatását figyelmen kívül hagyó algoritmus által számított érték. Piros szín jelöli a szélbecslő algoritmus által pontosított ψ értéket. Látható hogy a korábbi állapotokhoz képest jelentős javulást tudtunk elérni annak ellenére, hogy a szélkomponensek becslése nem a legpontosabb.

A következőkben az eljárásn változtattunk, hogy a Θ hibáját is becsülje a Kálmán szűrő, az sf korrekciós tényezőn keresztül.

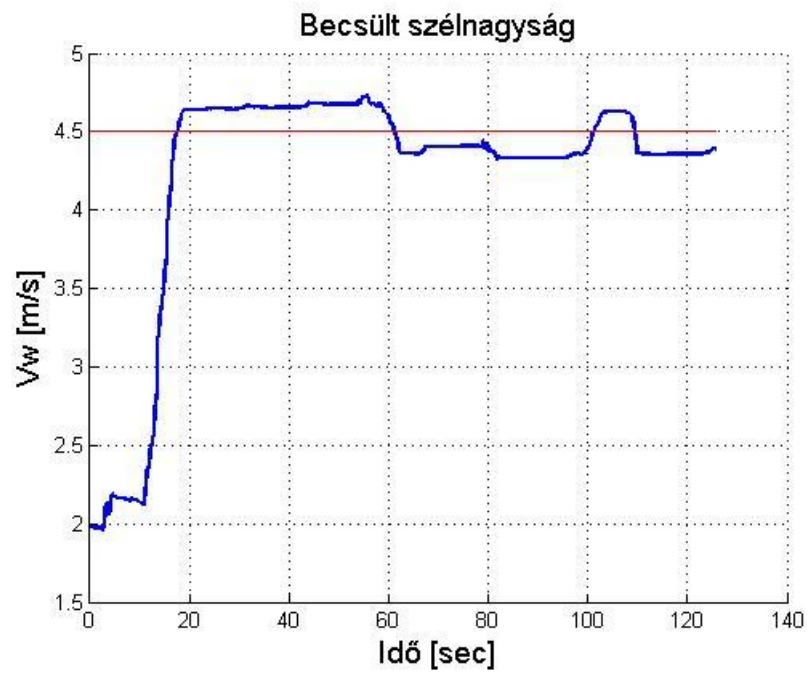
A repülőgép Pitot sebességének vízszintes komponense

$$28. V_a * \cos\Theta.$$

Ennek négyzetét a (25.) egyenletbe helyettesítve adódik

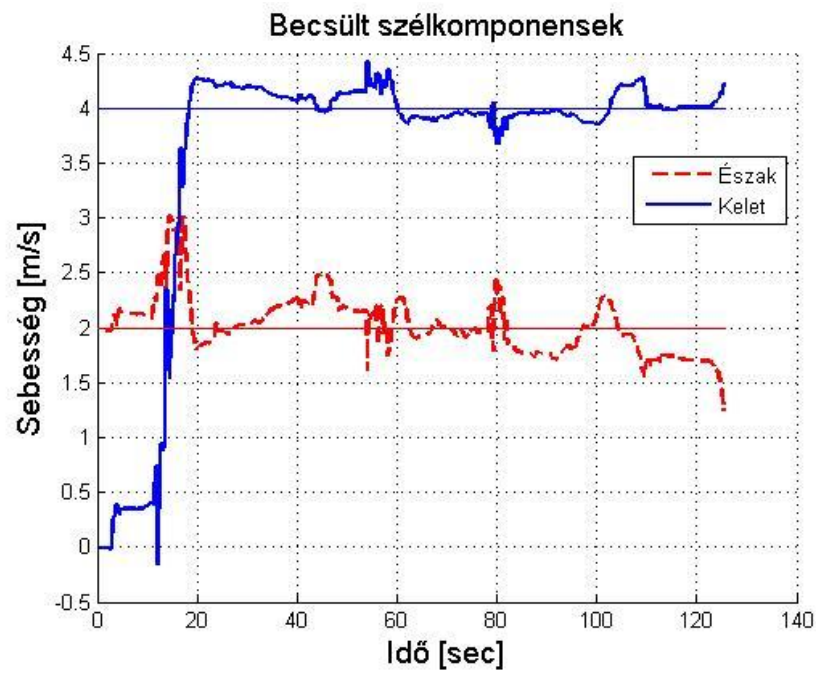
$$29. V_a^2 \cos^2\Theta = \frac{\Delta P}{sf}$$

Ennek segítségével és $\cos^2\Theta = \frac{1}{sf}$ feltevéssel sf-ből Θ számítható. Ez az eljárás csak abban az esetben működik, amikor sf értéke egynél kisebb. Ebben az esetben is nehéz az adódó $\pm\Theta$ értékek között dönteni. A módszer nem működött megbízhatóan, ezért végül nem is ezt alkalmaztuk. A tesztelésére a következő eredményeket kaptuk.



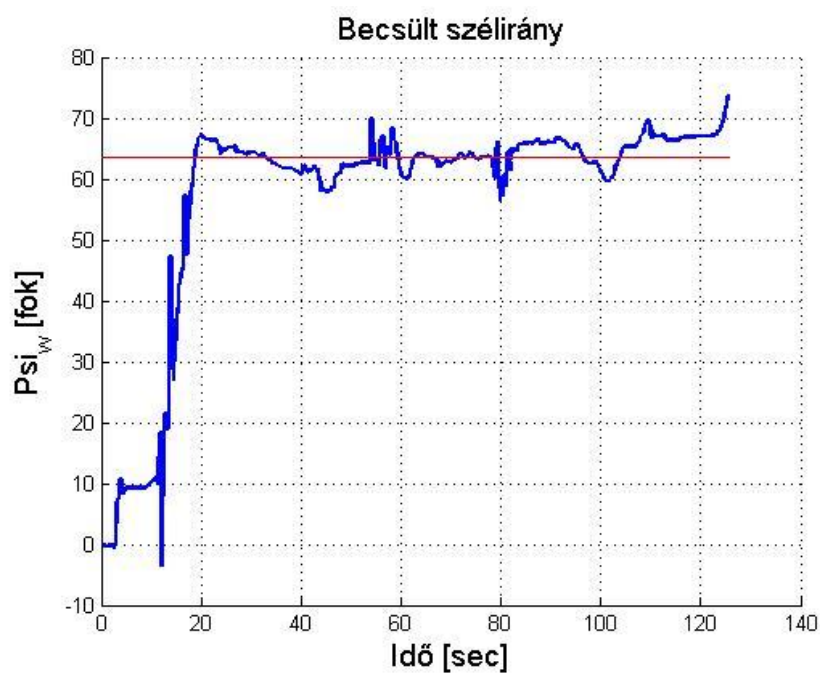
12. ábra Becsült szélnagyság

Az algoritmus a szélnagyság 4,5 m/s-os értékét jól megtalálta, és viszonylag stabilan követi is.

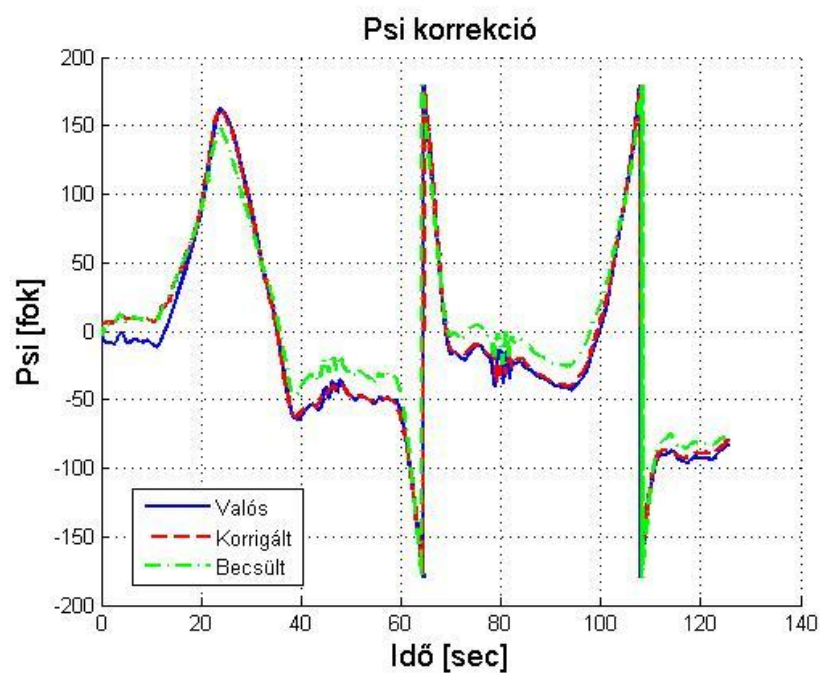


13. ábra Becsült szélkomponensek

A 13. ábrán bemutatott két szélkomponens érték is viszonylag pontosan, kis ingadozásokkal beállt a megadott értékek köré.



14. ábra Becsült szélirány



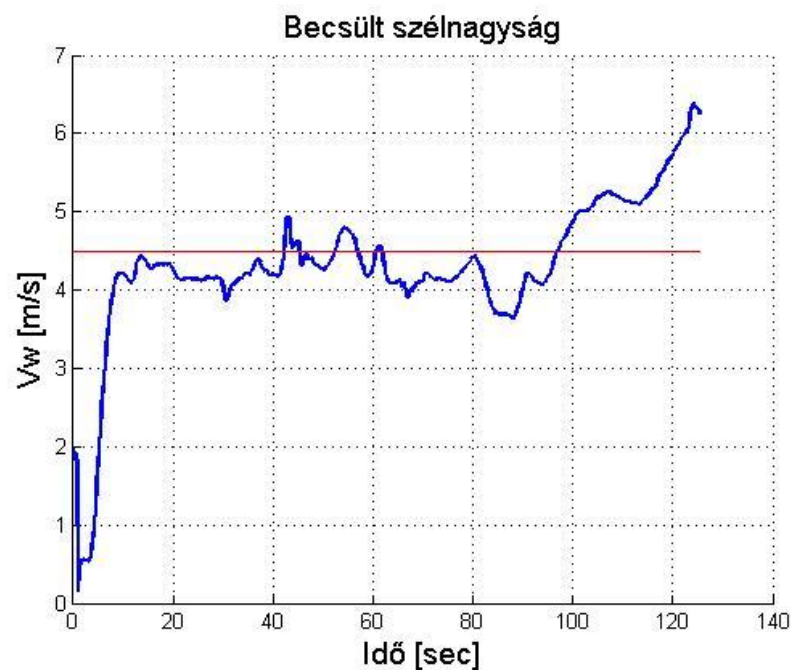
15. ábra Psi korrekció

A 14. ábra szélirány becslését szemlélteti, ez az előző esetben jobb volt, akkor egy sokkal egyenletesebb görbét adódott.

A kapott értékeket felhasználva a korrekció most is sokat javított a ψ szög becslésén.

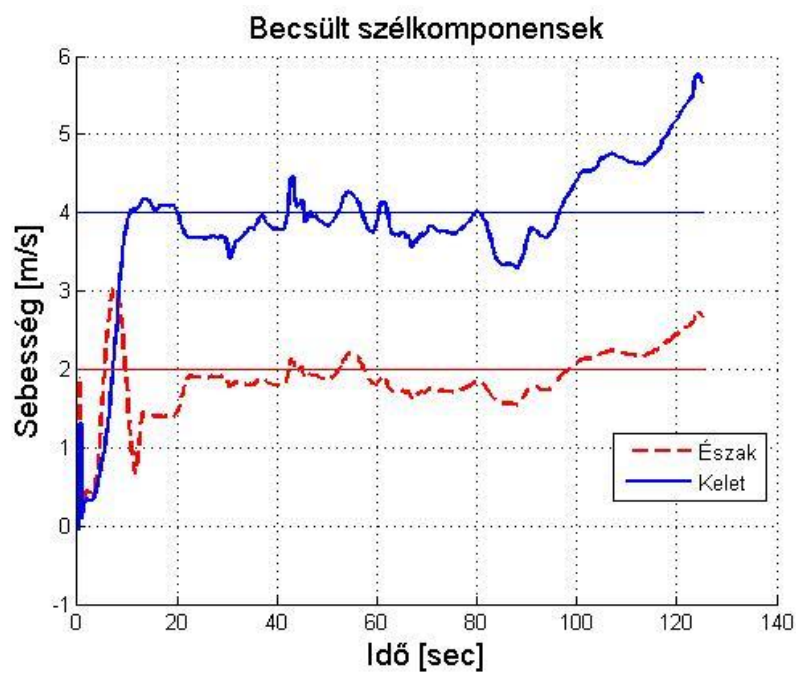
Az eljárás ismételt módosításával az algoritmus egy harmadik változatát is elkészítettük, ahol csak az sf korrekciós tényező értékét becsli, a Θ szög hibájával most nem számol.

A következő eredményeket kaptuk.

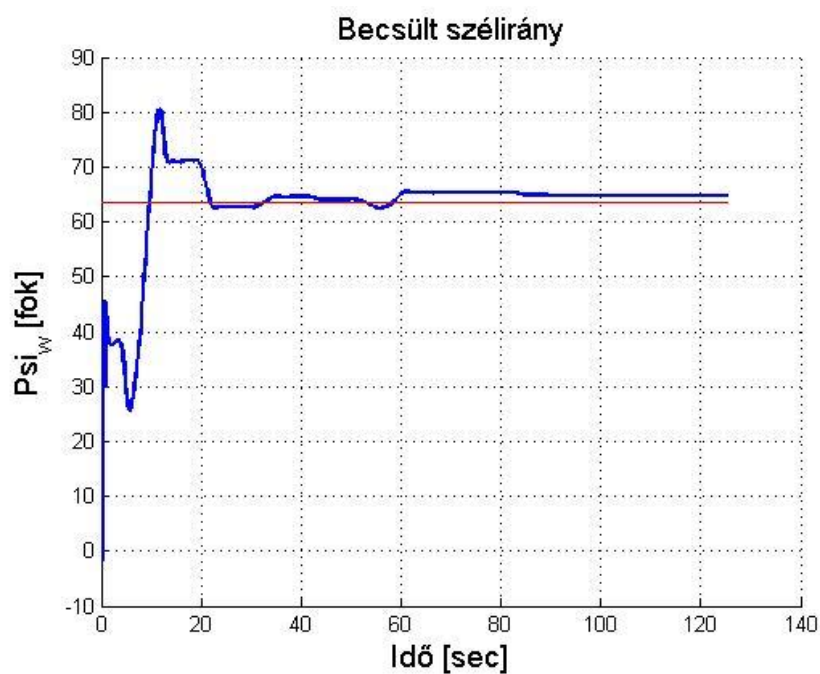


16. ábra Becsült szélnagyság

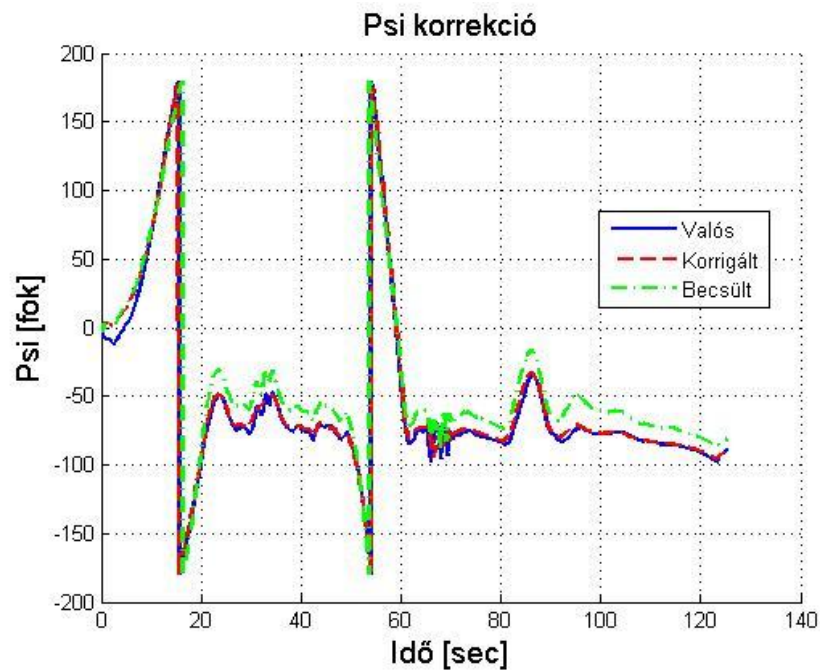
A program 8 másodperc alatt 0,5 m/s-os távolságon belül kerül a beállított értékhez képest, majd e körül az érték körül ingadozik. A 17. ábrából jól láthatjuk, hogy az északi és keleti összetevőket viszonylag pontosan és gyorsan megtalálja.



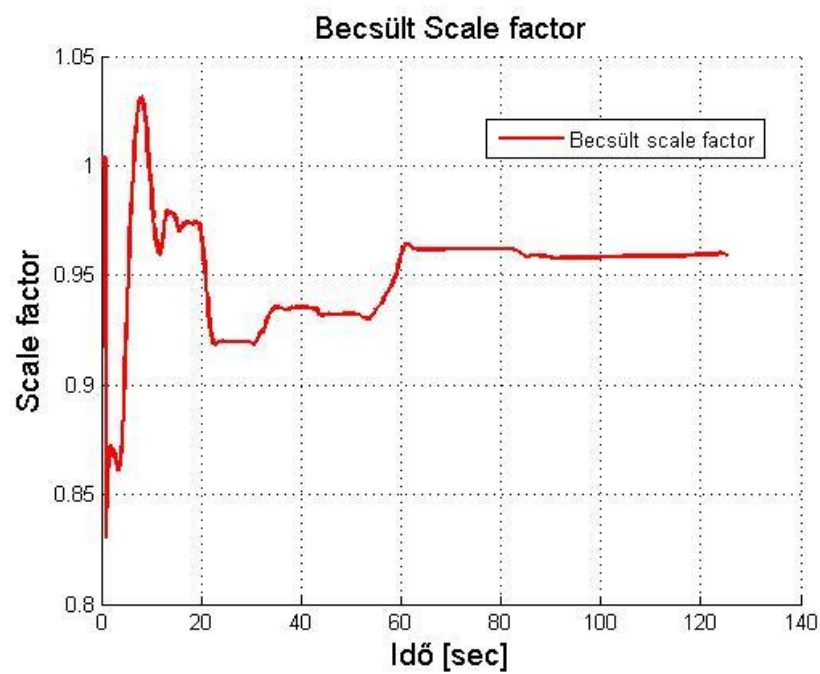
17. ábra Becsült szélkomponensek



18. ábra Becsült szélirány



19. ábra Psi korrekció



20. ábra Becsült Scale factor

A 18. ábra mutatja, hogy szélirány becslése ennél a módszernél a legpontosabb. A szűrő viszonylag hamar mintegy 22 másodperc alatt beáll a kívánt érték köré. Körülbelül 60 másodperctől pedig már ingadozás nélkül 1 fokos eltéréssel becsli a szél irányát.

A 19. ábrán bemutatott ψ szög korrekciója itt bizonyult a legjobbnak. A korrigált értékek a valós értékeket nagyon pontosan követik. A szűrő segítségével jelentős javulást tudtunk elérni.

A 20. ábrán az sf korrekciós tényező becsült értékét láthatjuk. 1 perc eltelte után stabilan beáll 0.96-os értékre.

A bemutatott algoritmusok közül a ψ korrekció eredményessége és a szélirány becslés pontossága miatt, úgy döntöttünk, hogy ezt, a legutóbb bemutatott verziót fogjuk alkalmazni a repülőgépen.

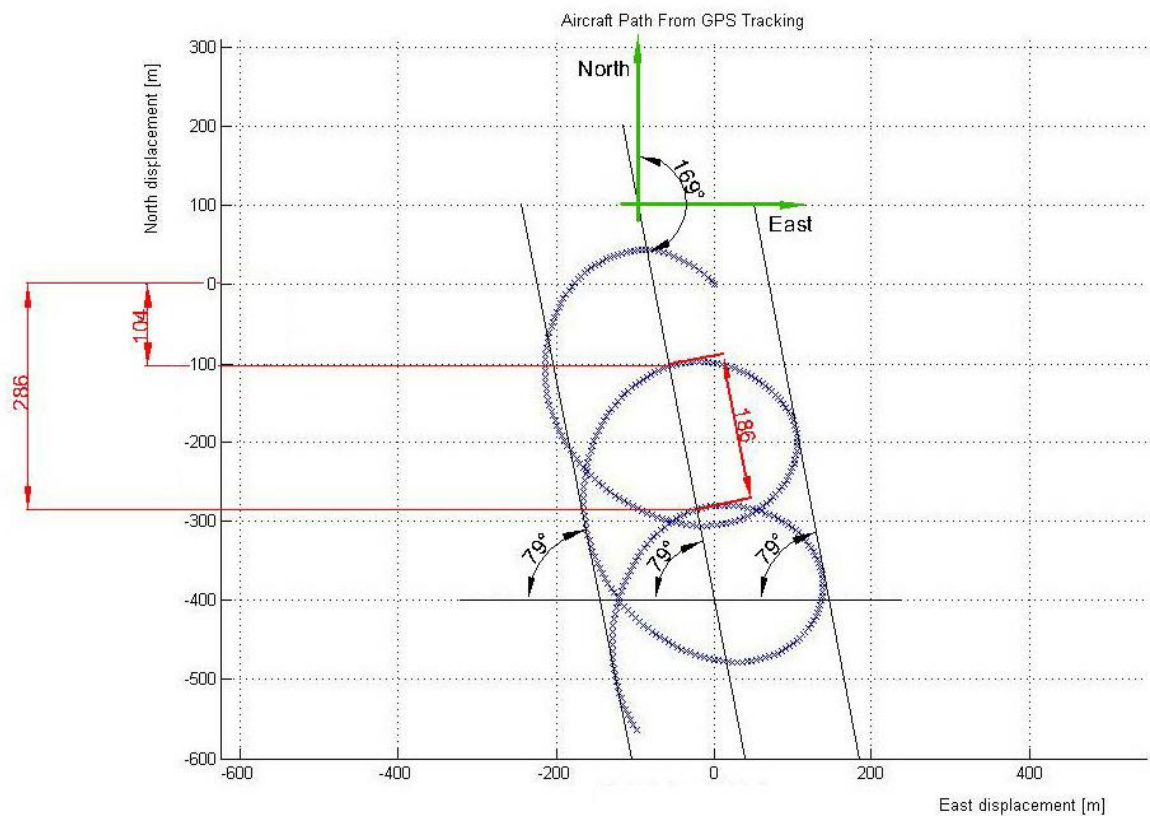
Az algoritmusról elmondható, hogy a kívánt feltételeket elég jól teljesíti. A megadott értékeket jól közelíti. Körülbelül egy perces beállási idő után megbízható adatokat szolgáltat.

A kiválasztott algoritmus tesztelése C környezetben, valós adatokon

A repülőgép fedélzeti számítógépén egy C program fut. Az előzőekben kiválasztott algoritmust ebbe a C programba építettük bele. Az így kapott kóddal valós adatokon alapuló szimulációt végeztünk. A szimulációhoz szükséges adatokat korábbi valós repülések, elmentett adataiból nyertük. Olyan fájlokat választottunk, amikben az adatokból meg tudtuk határozni a szélirányt és szélnagyságot. A repülőgépen a GPS egység nem mindig működik megfelelően, ezért a saját repüléseinkből nem tudtunk elegendő adatot szerezni. A minnesotai egyetem rendelkezik egy a miénkkel szinte teljes egészében megegyező repülőgéppel, ezért felhasználtuk az ő repülési adataikat is.

Szélirány, szélnagyság megállapítása

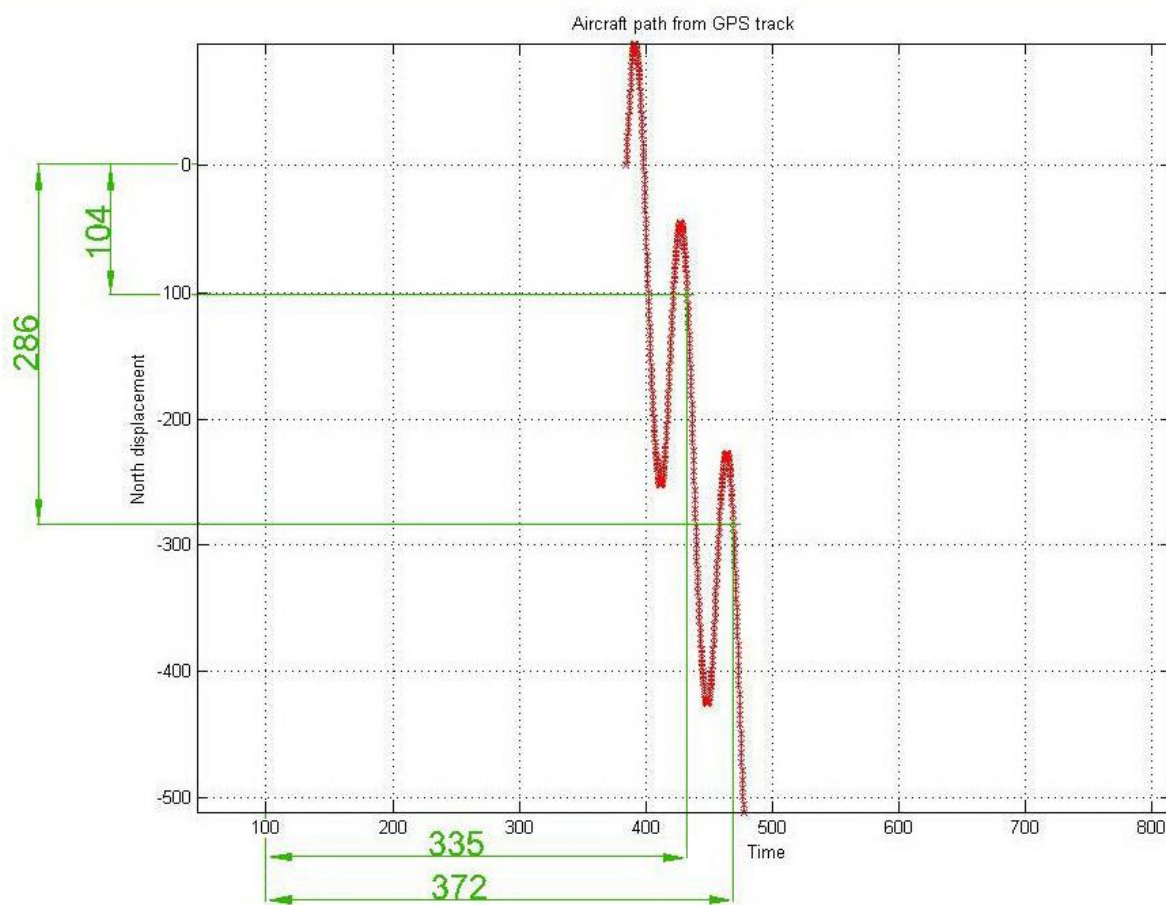
A repülési adatokból Matlab fájlokat generáltunk. A fájlok nem tartalmaztak a szélirányra és szélnagyságra vonatkozó adatokat, ezért ezeket nekünk kellett utólag meghatározni. A repülőgép repülése során GPS vevő segítségével rögzíti az útvonalát. Így ezt az útvonalat meg tudtuk jeleníteni Észak-Kelet koordináta rendszerben. Olyan pálya darabokat kerestünk, ahol a repülőgép konstans bedöntéssel köröket repült. Az így repült körök középpontjainak eltolódásából tudtuk becsülni a szél irányát. Ezt mutatja be a következő ábra.



21. ábra Repülési útvonal alapján a szélirány számítása

Kék szín jelzi az egyes időpillanatokhoz tartozó koordinátákat. A repülőgép északról déli irányba repült. Ebben az esetben az ábrán látható második és harmadik körrel számoltunk. A körök legnyugatabbra és legkeletebbre lévő pontjaihoz érintőket illesztettünk és meghatároztuk a meredekségüket. A meredekségek átlagával felvettünk egy egyenest a két érintő között, mind a kettőtől egyenlő távolságban. A meredekség rögtön megadja a szél irányát. A körök középpontja ezen egyenes mentén tolódik el. Megkerestük azt a pontot mind a két körön ahol az előbb említett egyenes metszi a körvonal északi részét. Ez a két pont a körnek ugyan azon pontja, csak eltolva, így távolságuk megadja az eltolás nagyságát. Így tudhatjuk, hogy a szél hatása miatt egy kör megtétele alatt mennyit tolódott el a kör középpontja.

Következő lépésben meghatároztuk az ehhez az eltolódáshoz tartozó időt.



22. ábra A szélesség számításához szükséges idők meghatározása az északi koordináták segítségével

A repülőgép északi pozícióját ábrázoltuk az idő függvényében. Az északi pozíciók alapján a 20. ábrán kijelölt pontokat könnyen megtalálhatjuk a 21. ábrán, a nulla ponttól vett távolságuk alapján. Ezek után az idő tengelyen lemérhetjük a pontokhoz tartozó időket, és számíthatjuk ezek különbségét.

Így ismerjük a középpont elmozdulását és az ehhez tartozó időt. A kettőből számítható az elmozdulás sebessége. A repülőgép végig konstans bedöntéssel repült, így az eltolódás csak a szél hatásának következménye. Így az elmozdulás sebessége egyenlő a szél sebességével. Meghatároztuk a szükséges paramétereket, amivel az algoritmus működésének helyességét vizsgálhatjuk.

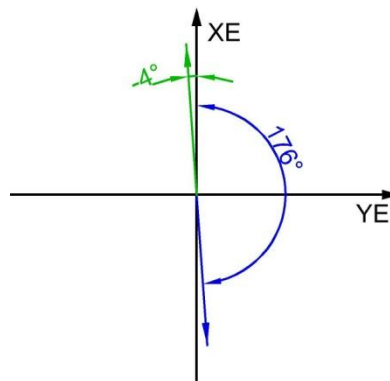
Teszt eredmények

Az algoritmus tesztelését hat repülés adatain végeztük el. A Minnesotából kapott fájlok viszonylag hosszú 500-800 másodperc hosszúságú repüléseket jelentenek. Közülük mindegyikben találhatunk több olyan repülési szakaszt is, ahol a repülőgép konstans bedöntéssel repült. Ezekre külön a már említett számítási módszer segítségével meghatároztuk a szélirányt és szélnagyságot. Az eredményeket a következő táblázat szemlélteti. A táblázat első négy sorában a minnesotai repülések, az utolsó két sorában pedig itthoni repülések szerepelnek. A becslőt az első négy sor adatainak segítségével hangoltuk be.

Szél adatok							
Repülés		Irány [°]	Nagyság [m/s]	Repülés		Irány [°]	Nagyság [m/s]
faser05_1	Számított	176	5,6	faser05_2	Számított	162	5,5
	Becsült	-4	-4,5		Becsült	-14	-4,5
	Eltérés	0	1,1		Eltérés	4	1
faser08_1	Számított	159	7,7	faser08_2	Számított	161	6
	Becsült	-31	-6,1		Becsült	-28	-5,4
	Eltérés	10	1,6		Eltérés	9	0,6
thor59_1	Számított	185	2,4	thor59_2	Számított	210	2
	Becsült	-6	-3,1		Becsült	-11	-3,1
	Eltérés	11	0,7		Eltérés	40	1,1
thor60_1	Számított	202	1,46	thor60_2	Számított	183	2,5
	Becsült	-713	[-6,7 ; -4,5]		Becsült	-713	[-6,7 ; -4,5]
	Eltérés	15	[5,24 ; 3]		Eltérés	4	[4,2 ; 2]
convdata2	Számított	169	5,2				
	Becsült	[155 ; 161]	[3,5 ; 4,5]				
	Eltérés	[14 ; 8]	[1,7 ; 0,7]				
convdataWPN1	Számított	~118	-	convdataWPN1	Számított	~115	-
	Becsült	[519 ; 512]	[4,3 ; 3,9]		Becsült	[512 ; 502]	[4,3 ; 3,9]
	Eltérés	[41 ; 34]	-		Eltérés	[37 ; 27]	-

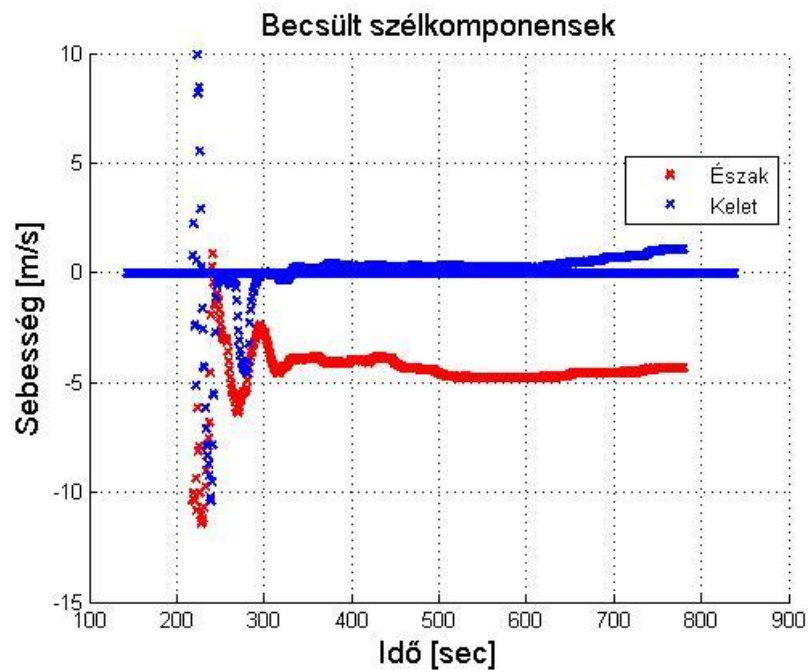
1. táblázat A számított és becslőt szélirány és szélnagyság összehasonlítása

Az adatokból láthatjuk, hogy a becslő a helyes szélirányt és szélnagyságot adja meg, de esetenként ellentétes irányból közelíti azt. Hogy ezt könnyebben megérthessük vizsgáljuk meg a faser05_1-es mérés adatait. Itt 176 fokot kaptunk a számításból a szélirányra, a becslő -4 fok körüli értékeket ad.

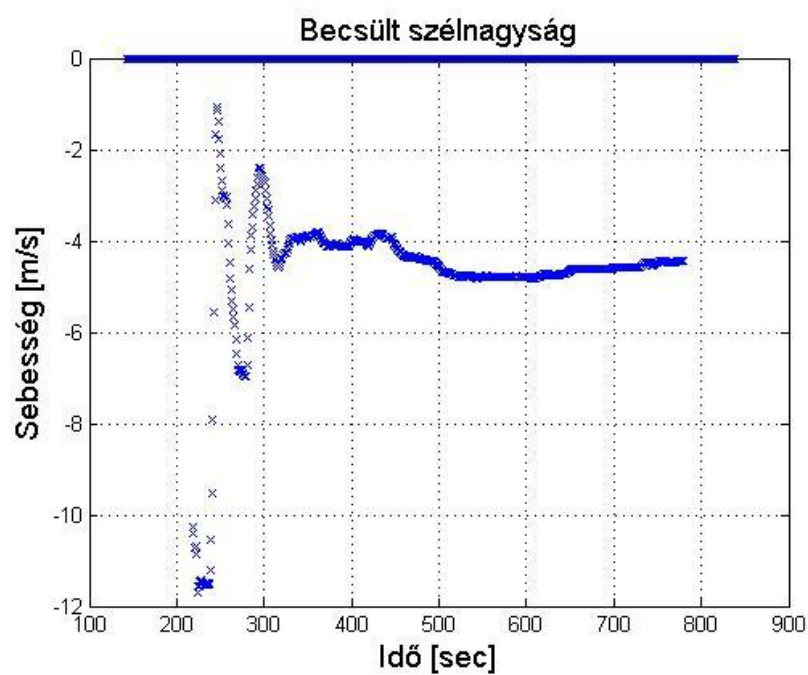


23. ábra Számított és becsült szélirány összehasonlítása

Az ábrából láthatjuk, hogy ugyan arról az egyenesről van szó, csak ellentétes irányból mérjük a szöget. Ha megnézzük a számított és a becsült sebességet, láthatjuk hogy a becslő ott is negatív értéket ad meg. Ez azt jelenti, hogy a fent zöld színnel ábrázolt vektor pont ellentétes irányba mutat, 180 fokkal el van forgatva. Ez esetben pont egy irányba mutat a kék vektorral, amit a mérési adatokból számítottunk. A becslés és a számítás megegyezik. Emiatt a táblázatban a sebesség eltérését mindenhol pozitív előjellel adtuk meg.



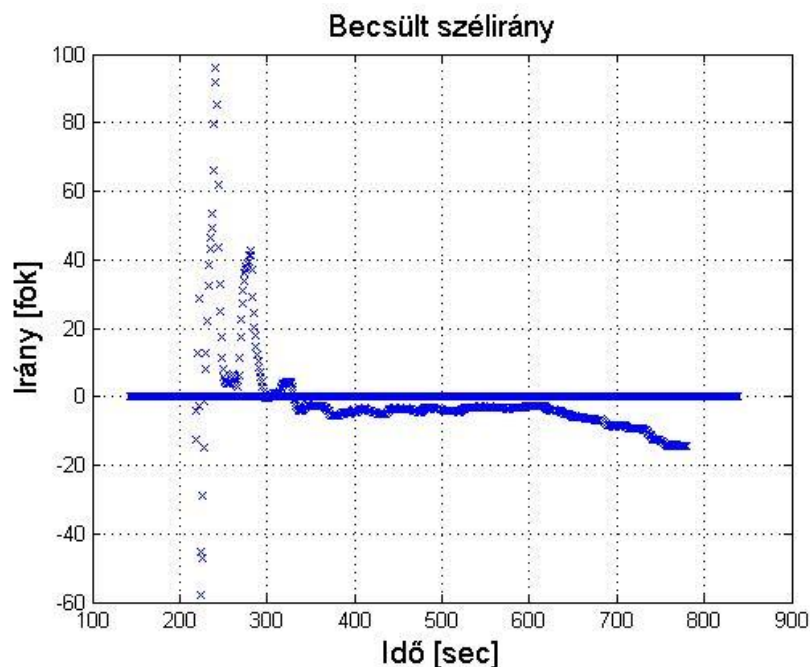
24. ábra Becsült szélkomponensek (faser0_5)



25. ábra Becsült szélnagyság (faser0_5)

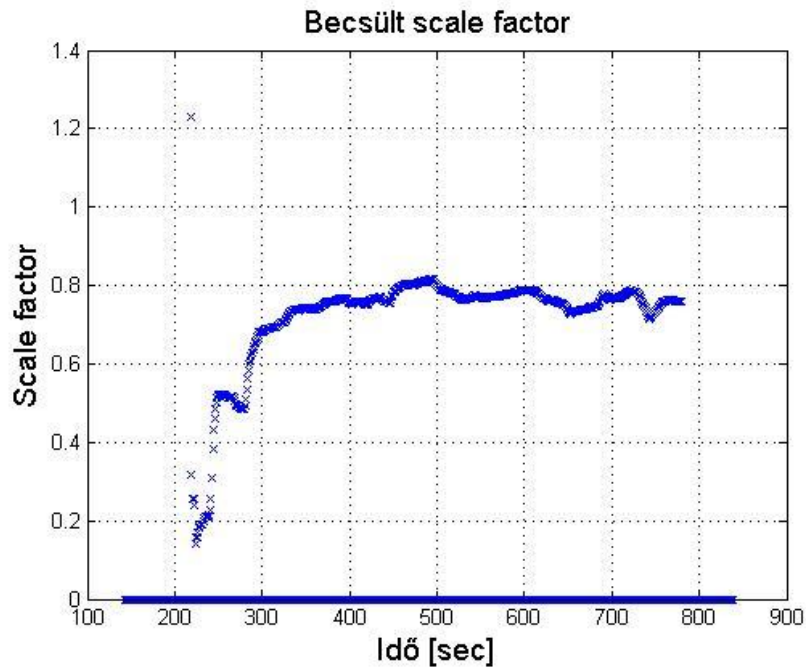
A 24. ábra mutatja, hogy algoritmus által becsült szélkomponensek megfelelnek az előbbi állításnak. Látható, hogy a keleti irányú komponens nagyon kicsi, 0-hoz közeli érték. Ezzel szemben az északi összetevő jelentős.

A 25. ábra mutatja az abszolút szélnagyságot. A szűrő kezdeti ingadozások után -4 és -4,6 közötti értékekre áll be. Ez a számított értéktől 1 - 1,5 m/s-os eltérés. A táblázat többi adatával összehasonlítva látható hogy a számított és a becsült értékek között általában ez az 1 - 1,5 m/s-os eltérés található meg.



26. ábra Becsült szélirány (faser0_5)

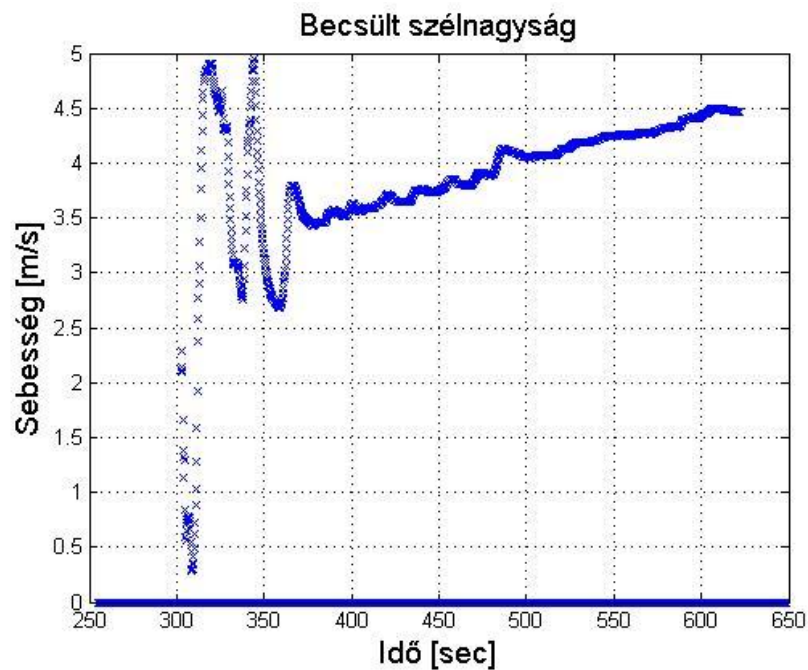
A repülés során a szélirány körülbelül 14 fokot változott. A repülés első szakaszában a már ismertetett 176 fokot mértük, amire -4 fokot számított az algoritmus. A repülés második szakaszában a számított szélirány 162 fok volt. A 26. ábrából Látható, hogy a becsülő elkezdte ezt az értéket követni. A repülés végére -14 fokot számít, ami 166 foknak felel meg. Tehát az algoritmus nem csak konstans szélirányt tud becsülni, hanem esetenként képes követni a szél irányának lassú változását is.



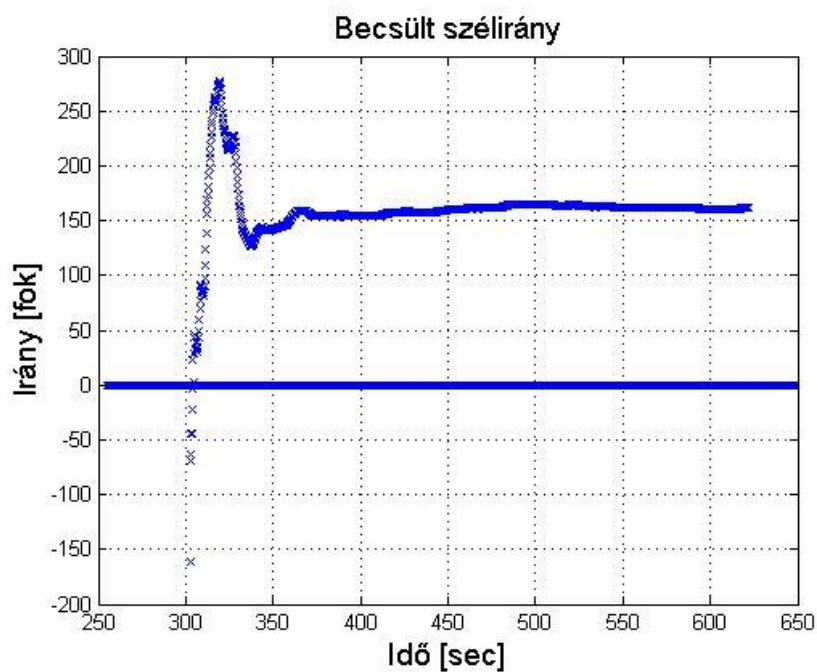
27. ábra Becsült Scale factor (faser0_5)

A korrekciós tényező (Scale factor) becslésére 0,72-0,8 körüli értékeket kaptunk.

Az előzőekben bemutatott mérések során a szűrő hangolását a minnesotai repülőgép műszereire állítottuk be. A szűrő ugyan ezekkel a beállításokkal jól működik a mi repülőgépünkön is. A két repülőgép nagyon hasonló, de a műszereik a mérési hibái eltérőek lehetnek. A convdata2 repülést saját repülővel végeztük. A következő eredményeket kaptuk.



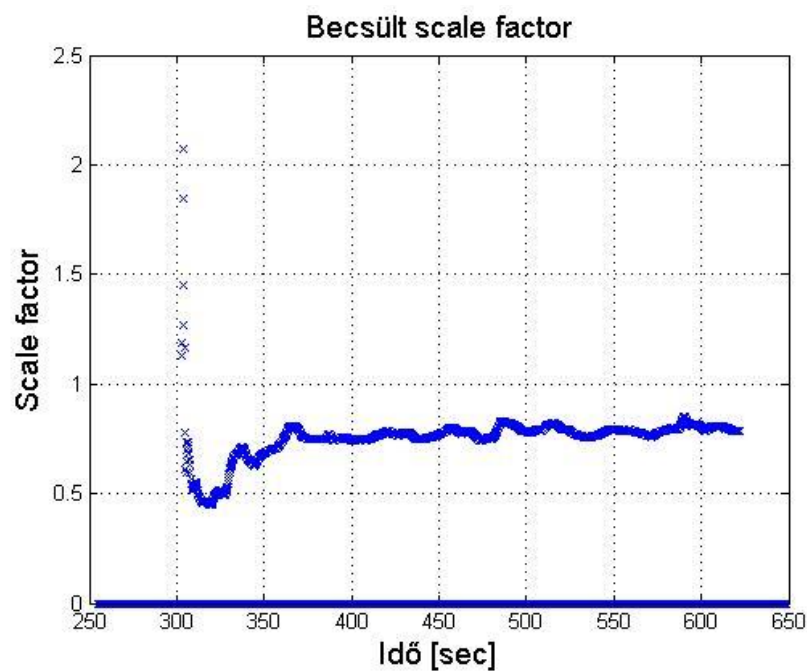
28. ábra A convdata2 repülés alapján becsült szélnagyság



29. ábra A convdata2 repülés alapján becsült szélirány

A becsült szélnagyság értékét a 28. ábra mutatja be. A kezdeti ingadozások után, 3,5 m/s-os értékről folyamatosan növekszik 4,5 m/s-ig. Tehát itt is körülbelül 1-1,5 m/s-ot téved a becslő.

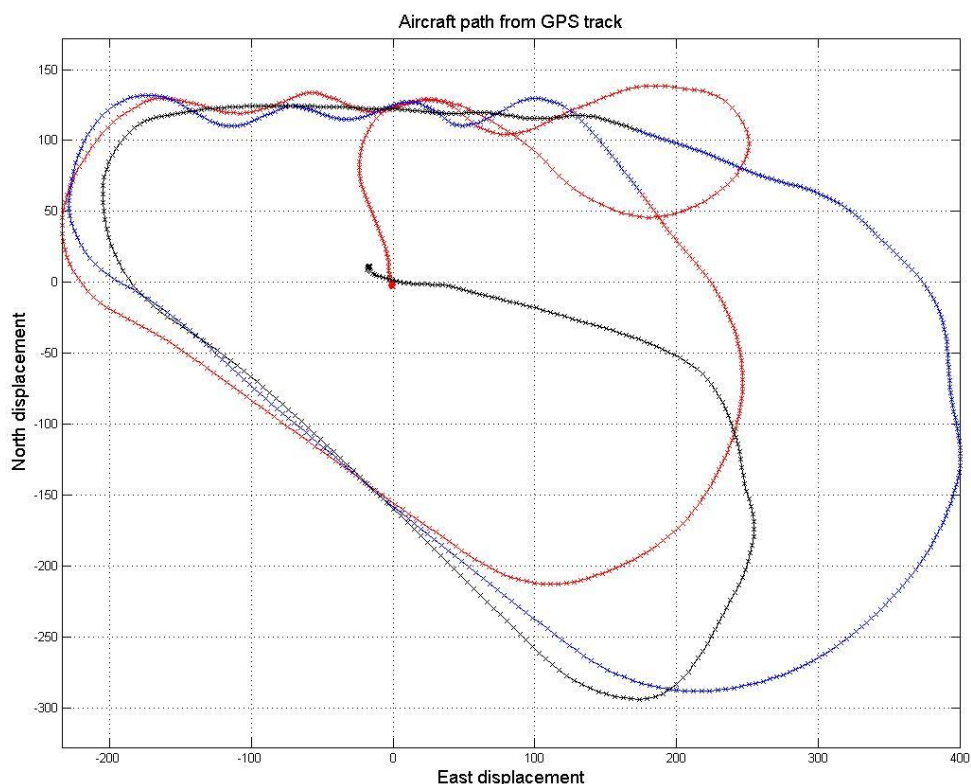
A szélirány a kezdeti ingadozások után nagyon szépen beáll 155 és 161 fok közé a 29. ábrán látható módon. A számított érték 169 fok. Az eltérés itt is 10 fokon belül van.



30. ábra A convdata2 repülés alapján becsült Scale factor

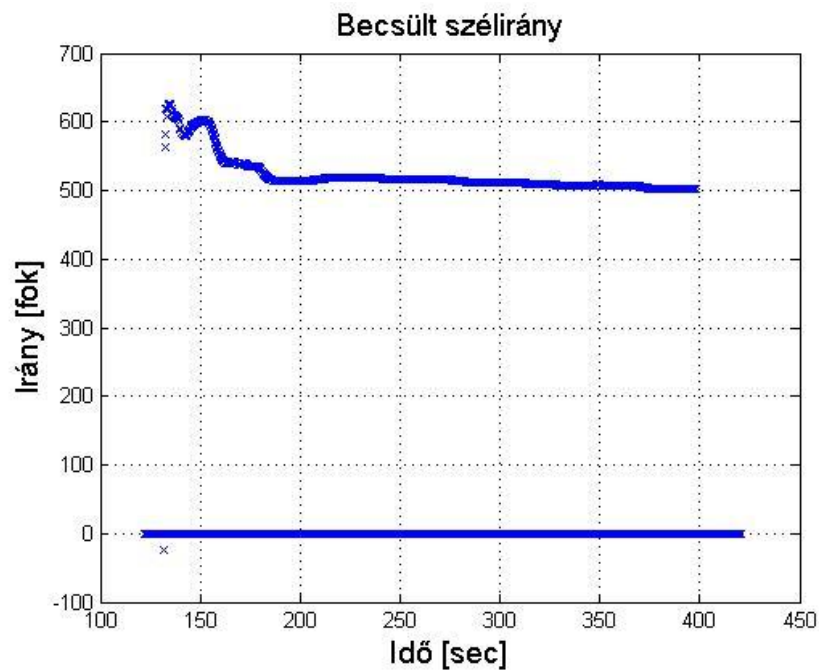
A Scale factor az ábrán látható módon, viszonylag stabilan beáll 0,76 körüli értékre. Az ingadozásának mértéke $\pm 0,02$ egység.

Miután a fent említett tesztelésekre megfelelő eredményeket kaptunk, az algoritmust kipróbáltuk egy útvonalkövető repülés adatain is. Az útvonalkövető repülés azt jelenti, hogy a repülőgépnek önállóan kell megadott pontokat érintve végigrepülnie a kijelölt útvonalon. Ennek vizsgálata azért fontos, mert a későbbiekben a szélbecslő algoritmus segítségével ennek a repülőgépnek a pályakövetését szeretnénk pontosítani. A táblázatban ennek a repülésnek az adatait a convdataWPN1 név jelöli.

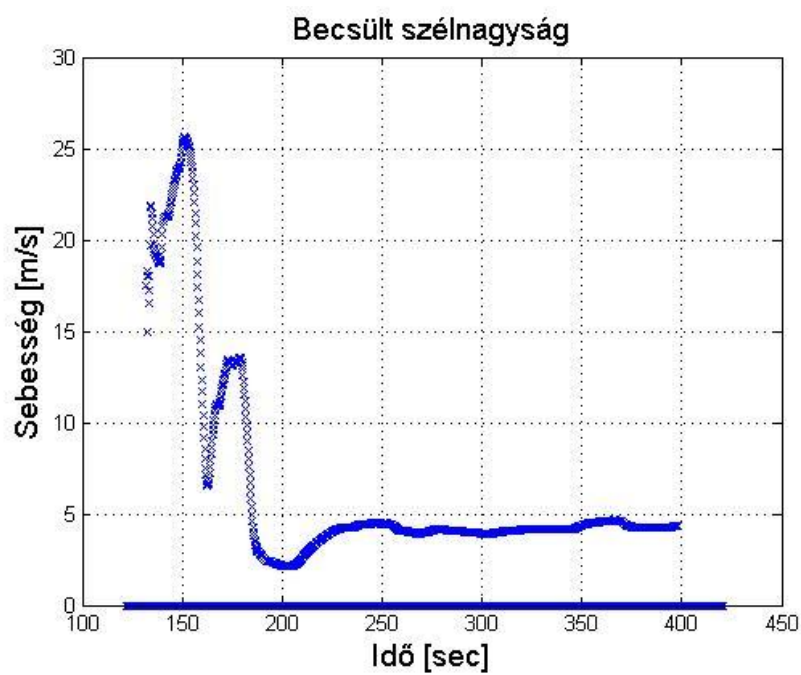


31. ábra A WPN1 nevű pályakövető repülés útvonala

A 31. ábra mutatja az útvonalat. A könnyebb áttekinthetőség érdekében az útvonal három színnel van ábrázolva. A repülőgép először a piros görbén repül végig, majd egy újabb kört tesz a kéken, és végül a fekete görbén leszáll. A pályán látszik, hogy nem tartalmaz konstans bedöntéssel repült szakaszokat, mint ez előzőek, ezért itt más eljárással kellett meghatározni a szélirányt és szélnagyságot az ellenőrzéshez. Ha megnézzük az útvonalat láthatjuk, hogy a Nyugaton végzett fordulók sokkal kisebb ívűek, a keleten végzett fordulók sokkal nagyobb ívűek. Ebből arra következtettünk, hogy nyugati irányból fúj a szél. Ekkor a nyugaton végzett fordulóknál segíti a repülőgépet, kisebb lesz a fordulási sugár, a keleten végzett fordulóknál akadályozza, a pályájáról lesodorni igyekszik. Ezért itt nagyobb lesz a fordulási sugár. Az ábra alapján becsléseket végeztünk szélirányra vonatkozóan. 115-119 fok körüli értéket kaptunk. A becslő ettől jelentősen eltér, 155-159 fokot becsül. Ezt szemlélteti a 32. ábra.



32. ábra Becsült szélirány



33. ábra A WPN1 nevű repülésnél becsült szélnagyság

A Szélnagyság kezdeti nagy ingadozások után beáll 4,3 és 3,9 közé és ezt stabilan tartja. Ezt mutatja a 33. ábra.. Erre a becslőnek körülbelül 60 másodpercre van szüksége. A valós szélirányról és szélnagyságról nincs pontos értékünk, de a becslő mindkét esetben konvergál, ezért valószínűleg megbízható adatokat szolgáltat.

A 2. táblázat tartalmazza az egyes repülések esetében szélirányokhoz és szélnagyságokhoz tartozó beállási időket. Beállási időnek nevezzük azt az időt, ami a felszállástól eltelik addig az időpontig amíg a becslő által számított értékek már egy elfogadható határon belül ingadoznak. Ezen idők mellett fel van tüntetve, hogy az adott beállási idő hány százaléka a teljes repülésnek.

Repülés	A beálláshoz szükséges idő				Teljes repülés ideje [s]
	Irány [s]	Irány [%]	Nagyság [s]	Nagyság [%]	
faser05	121	22,04	98	17,85	549
faser08	59	16,81	62	17,66	351
thor59	69	12,87	73	13,62	536
thor60	18	3,27	18	3,27	550
convdata2	53	17,1	58	18,71	310
convdataWPN1	29	11,65	63	25,3	249
Átlag	58,2	14	62	16,1	-

2. táblázat A becslő beállási ideje

A táblázatból látható, hogy ahhoz hogy a becslő megbízható adatokat szolgáltatson mind szélirány, mind szélnagyság becslés esetén átlagosan körülbelül 1 perces beállási időre van szüksége. A faser05-ös repülés során a beállítás tovább tartott, viszont a később szolgáltatott adatok sokkal jobbak voltak.

A beállítások a repülési idő első 20%-ában történtek, ezek után a becslő a repülés fennmaradó 80%-ában használható korrekcióra.

Eredmények, továbblépési lehetőségek

A dolgozat elején ismertettük a szél hatását egy repülőgép pályájára. Megindokoltuk a kidolgozott szélbecslő eljárás szükségességét.

Megvizsgáltunk két szélbecslő eljárást. Az elsőként bemutatott módszer egy GPS vevőt és egy transzformációs mátrixot használ fel, ami kapcsolatot teremt a repülőgéphez illetve a földhöz rögzített koordinátarendszer között. Konstans szélirányt feltételezve az eljárás lehetőséget biztosít a szélirány becslésére minden olyan esetben amikor a repülőgép repülési állapota megváltozik. A becslő algoritmust repülőgépre testre szabva, Matlabban leprogramoztuk és szimulált adatokon teszteltük. Az eredmények kiértékelése bebizonyította, hogy a becslő nem működik megfelelően. Az eredmények javítása érdekében módosításokat végeztünk rajta, de a tesztek bebizonyították, hogy az algoritmus, a módosítása után sem szolgáltat elfogadható adatokat. Ezért új eljárást kerestünk.

A másodikként megvizsgált eljárás egy GPS vevőt és egy a repülőgépre erősített Pitot csövet használ. Ez a 7. ábrán bemutatott szélháromszöget alkalmazza. Egy kibővített Kálmán szűrő segítségével becsli a szél irányát és nagyságát. Az algoritmust először Matlabban leprogramoztuk és többféle változatát elkészítve, szimulált adatokon teszteltük. Az eredmények kielégítőek voltak. A legmegbízhatóbban működő szűrőt kiválasztottuk és C nyelven leprogramozva beépítettük a repülőgépen futó programba. Az így elkészített programon Matlab segítségével valós adatokon történő szimulációt végeztünk. A teszt eredményeket összehasonlítottuk a valós adatokból számított értékekkel. Az eredmények elemzése bebizonyította, hogy a szűrő kellő megbízhatósággal működik és alkalmas a szélirány és szélnagyság becslésére, illetve a repülőgép pályakövetésének pontosítására.

A későbbiekben a fent bemutatott második eljárást szeretnénk a repülőgép fedélzeti számítógépén futtatni és valós adatokon történő , HIL (Hardware In the Loop) szimulációt végezni vele.

A szélbecslő eljárás kialakítására azért került sor, hogy a későbbiekben a repülőgép pályakövetését pontosíthassuk vele. Ezért a tesztelések végeztével az algoritmust szeretnénk beépíteni a pályakövető eljárásba. A szakdolgozatom keretében ezekkel a témákkal szeretnék foglalkozni.

Felhasznált Irodalom

- [1] Bauer Péter és Bokor József, „Development and Hardware-in-the-Loop Testing of an Extended Kalman Filter for Attitude Estimation” *11th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, 57-62. old., november 18-20., Budapest, 2010
- [2] Bauer Péter, „Koordináta transzformációk Euler szögek alkalmazásával”, 2009.február.17.
(http://www.kka.bme.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=161&Itemid=167&lang=hu)
- [3] William Premerlani, „IMU Wind Estimation (Theory)” 2009.december.12.
(<http://www.pdfport.com/view/616410-imu-wind-estimation-theory.html>)
- [4] Bauer Péter, „A possible wind estimation and Euler angle correction method”, MTA SZTAKI, 2012 Június
- [5] AM CHO, JIHOON KIM, SANGHYO LEE and CHANGDON KEE, „Wind Estimation and Airspeed Calibration using a UAV with a Single-Antenna GPS Receiver and Pitot Tube” IEEE Seoul National University August 6, 2009
- [6] Benkő Tiborné, Tóth Bertalan: Programozzunk C nyelven, ComputerBooks, 2010.
- [7] Beard, R. W. & McLain, T. W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice Princeton University Press, 2012.