



Unnið fyrir samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytið

Mælingar á loftkviku yfir Hvassahrauni

Forverkefni janúar-september 2021

1 Formáli

Háskólinn í Reykjavík og Samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytið gerðu samning hinn 31. desember 2020 um að HR tæki að sér mælingar- og rannsóknarverkefni, sem fælist í að gera flugmælingar á loftkviku yfir Hvassahrauni. Rannsóknarverkefninu er skipt í tvo hluta. Fyrri hluti þess, forverkefnið, felur í sér frekari þróun og prófanir þeirra aðferða sem notaðar verða við rannsóknir á svæðinu. Áætlað var skv samningnum, að þessum hluta yrði lokið innan níu mánaða frá upphafi verkefnisins með útgáfu áfangaskýrslu HR þar sem tilgreindar verða niðurstöður þróunarverkefnisins og nánari útfærsla á framkvæmd síðari hluta samningsins. Framhaldsverkefnið felst í að gera auknar og víðtækar mælingar og rannsóknir á kviku í lofti yfir fyrirhuguðu flugvallarstæði í Hvassahrauni, úrvinnslu niðurstaðna og skilum. Jafnframt er gert ráð fyrir að halda áfram frekari þróun á mælingaraðferðum og hugbúnaðargerð. Áætlað er að síðari hluta verkefnisins verði lokið fyrir lok árs 2022. Skýrslan, sem hér er lögð fram, fjallar um forverkefnið, þann tæknibúnað sem settur hefur verið saman og þær aðferðir, sem skilgreindar hafa verið til að gera kleift að framkvæma flugmælingar á loftkviku og sýna fram á að fýsilegt sé að gera slíkar mælingar í lofti. Jafnframt hefur fræðilegur bakgrunnur slíkra mælinga verið kannaður enda er slíkt mikilvæg forsenda þess að túlka mælingarnar á hagnýtan hátt og setja þær fram á aðgengilegu formi. Jafnframt hefur fengist mikil reynsla í að framkvæma mælingar af þessu tagi og bera þær saman við mælingar, sem gerðar eru á grundinni einkum með búnaði í mælímastri og LIDAR-búnaði. Í þessari skýrslu er áherslan á að lýsa þeim búnaði og aðferðum, sem taldar eru fýsileg til að gera markvissa úttekt á flugskilyrðum í grennd við og yfir flugvöllum hér á landi á þann hátt, með alþjóðlega viðurkenndar aðferðir að leiðarljósi. Skýrsluhöfundar telja að þessu markmiði hafi verið náð þótt ljóst sé að margt megi og þurfi enn að gera til að ná sem bestum árangri. Því er nauðsynlegt að halda áfram að vinna að þróun mæli- og úrvinnsluaðferða auk þess sem lögð verður áhersla á skipulega söfnun mæligagna. Sérstaklega er fýsilegt að beita nýjum gagnavinnsluaðferðum og reiknilíkönnum til að nýta betur þá gríðarlegu möguleika, sem ný mælitækni byggð á MEMS tækni býður upp á.

Verkefnisstjórar:

Gylfi Árnason Ph.D.; aðjúntk verkfræðideildar HR

Porgeir Pálsson Sc.D.; prófessor emeritus verkfræðideildar HR

Rannsóknarverkefni unnið samkvæmt samningi samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytisins og Háskólans í Reykjavík 31. desember 2020.

Efnisyfirlit

1 Formáli	i
2 Inngangur	1
2.1 Kvikumælingar í lofti	1
2.2 Markmið forverkefnisins	1
2.3 Fyrri athuganir vegna flugvallar á Kapelluhrauni	1
2.4 Eiginleikar flugkviku og leiðir til mælinga, EDR	1
3 Samsetning, ísetning og prófun mælibúnaðar fyrir mælingaflugvélinu	3
3.1 Frummælingaþörf (rúmhnit, hraði og lóðrétt hröðun)	3
3.2 Kostir og gallar við mælingu EDR með hröðun	3
3.3 Mælitækni	3
3.4 Drónastýritölva	4
3.5 Mælingar með snjallsímum	4
3.6 Prófun og kvörðun í tilraunastofu	4
3.7 Ísetning mælibúnaðar í flugvél	5
3.8 Trufflanir frá umhverfi	6
3.9 Prófanir á búnaði í flugvél	6
4 Svörun flugvélar við loftkviku	8
4.1 Líkan lóðréttrar loftkviku	8
4.2 Líkön flugvéla	9
4.3 Dýfulíkan flugvélar	10
4.4 Útreikningar á kvikusvarstuðlinum	11
4.5 Staðfesting á líkani flugvélarinnar	11
4.6 Hermunarprófanir á reiknilíkunum	12
5 Skipulag mæliferða með tilliti til veðurskilyrða, flugferla og flugtæknilegra þátta	13
5.1 Mælisvæði	13
5.2 Æskileg veðurskilyrði á mælingardegi	13
6 Söfnun og úrvinnsla gagna	14
6.1 Gagnasafn úr mæliflugferðum	14
6.2 Mat á nákvæmni á meðalgildi EDR fyrir eina sekúndu	14
6.3 Framsetning EDR niðurstæðna	14
6.4 Samanburður við mælingar með öðrum búnaði á svæðinu	16
7 Rannsóknarverkefni	17
7.1 Nýjar aðferðir til að mæla eiginleika loftkvikunnar í lofti	17
7.2 Notkun ómannaðra flugvéla og dróna	17
7.3 Notkun snjallsíma við mælingar	17
7.4 Tenging kvikumælinga og spálíkana	17
8 Niðurstöður	19
8.1 Mælibúnaður á grunni PX4 drónastýrikerfis hefur verið þróaður og prófaður	19
8.2 Frumniðurstöður lofa góðu	19
8.3 Fræðilegur grunnur fyrir úrvinnslu flugmælinga á loftkviku	19
8.4 Lokaorð	19
Viðaukar	21
A Mat á EDR með notkun hröðunarmælinga (á ensku)	22
B Líkön fyrir viðbrögð flugvélar (á ensku)	30
C Hermun með Von Karman kvikulíkana	44
D Tölva á væng með Pitot-röri	54
E Dempun, síun og söfnunartíðni	57
F Forrit og gagnaferð	62

G	Skoðun á innra sudi mælis	65
H	Staðgöngufall fyrir kvikusvarstuðulinn	68

2 Inngangur

2.1 Kvikumælingar í lofti

Eins og kunnugt er liggur Ísland á einhverju vindasamasta svæði á Norður-Atlantshafi og þó víðar væri leitað. Þetta kemur t.d. skýrt fram á korti af hafsvæðum heimsins auk þess að byggjast á aldalangri reynslu af búsetu og sjósókn landsmanna frá landnámi. Í upphafi flugs á Íslandi voru enda miklar efasemdir um hvort flugvélar mundu reynast nothæfar hér á landi við ríkjandi veðurlag. Fyrsta tilraun til flugs á Íslandi árið 1919 hafði m.a. þann megingiltgang að sanna fyrir landsmönnum að hægt væri að „fljúga í íslensku lofti“, sem margir höfðu vantrú á. Reynslan hefur sýnt að þrátt fyrir slíkar áhyggjur hefur tekist að stunda flug með ágætum árangri við erfið veðurskilyrði og hefur mikil reynsla byggst upp í tímans rás á því hvernig hægt sé að bregðast við þeim erfiðu flugskilyrðum, sem gjarnan ríkjá hér einkum að vetrarlagi. Hafa umfangsmiklar veðurathuganir og stöðugt betri veðurspár reynst heilladrjúgar í þessu skyni.

Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir helstu niðurstöðum um hvernig megi standa að því að gera mælingar á loftkviku í lofti í því skyni að byggja upp betri þekkingu og skilning á því hvernig flugvélar bregðast við slíkum skilyrðum einkum í aðflugi, fráflugi og lendingu á flugvöllum. Með því að víkka þannig út og nýta nýjustu mælitækni til að meta veðurskilyrði í flugi og lýsa með markvissari hætti þeim skilyrðum, sem búast má við á núverandi flugvöllum og ekki síður að meta aðstæður á nýjum flugvallasvæðum. Þetta skiptir miklu máli bæði vegna almenns flugöryggis og til að fá gleggri mynd af kvikueiginleikum einstakra flugvalla og tengja þau við almennar veðurmælingar, sem gerðar eru á flugvöllum til að meta flugskilyrði. Verkefnið, sem hér er skýrt frá er fyrst og fremst til komið vegna þeirrar rannsóknaráætlunar, sem stofnað var til af samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytinu og Reykjavíkurborg til að rannsaka nánar veðurfar og aðra umhverfisþætti í og yfir Hvassahrauni vegna hugsanlegrar byggingar flugvallar á því landsvæði til að leysa af hólmi Reykjavíkflugvöll í Vatnsmýri.

2.2 Markmið forverkefnisins

Markmið forverkefnisins, sem hér er fjallað um, er fyrst og fremst að sýna fram á að mæla megi loftkvikuna með litlum flugvélum og hentugum og tiltölulega ódýrum búnaði og setja niðurstöðurnar fram á viðurkenndan hátt. Þetta felur í sér að niðurstöðurnar megi ekki vera háðar eiginleikum flugvélarinnar en lýsi grunneiginleikum kvikunnar, sem yfirfæra má og túlka fyrir allar gerðir flugvéla. Kosturinn við að nota litlar flugvélar til mælinganna er fyrst og fremst að kostnaður við söfnun gagnanna verður lágur auk þess að almennt bregðast litlar og léttar flugvélar hraðar og meira við loftkviku en stórar og þungar vélar. Ókosturinn er sá, að litlar flugvélar geta ekki endilega athafnað sig í veðurskilyrðum, t.d. þegar vindhraði er yfir tilgreindu hámarki eða þegar máli skiptir að flogið sé í blindflugi. Því er mikilvægt að auðvelt sé að flytja mælibúnaðinn milli flugvéla þannig að hægt sé um vik að nýta stærri flugvélar til að útvíkka mælisviðið þegar þörf krefur.

2.3 Fyrri athuganir vegna flugvallar á Kapelluhrauni

Í skýrslu Leifs Magnússonar um flugvallarstæði í Kapelluhrauni (frá 1970) eru tilvísanir í athuganir á ókyrrð (flugkviku, *e. turbulence, aircraft turbulence*) í lofti í grennd við flugvallarstæðið. Niðurstöðurnar voru í stuttu máli að ef vindur væri austan til suðsuðvestanstæður (80-220 gráður), og næði 20 hnútum, væri mjög ókyrrt í svæðinu ef flogið væri undir 2500 fetum. Flugtaks- og landingarskilyrði teljist varhugaverð ef vindur úr þeim áttum fer yfir 30 hnúta. Þess er getið í skýrslunni að þarna er treyst á mat flugmanna, því ekki hafi verið til mælieiningar eða staðlar sem lýsa „þolanlegri“ ókyrrð. Í skýrslunni var talið að vegna ókyrrðar yrði nýtingartími vallarins um 3-12% lakari en Reykjavíkflugvallar, eftir því hvort miðað væri við 20 hnúta eða 30 hnúta vind.

Þar sem miðpunktur fyrirhugaðs flugvallar í Hvassahrauni er aðeins um 5 km frá Kapelluhrauni má ætla að þessar athuganir á ókyrrð megi yfirfæra á Hvassahraun, og því mikilvægt að meta ókyrrð þar með viðurkenndum mælieiningum og aðferðum.

2.4 Eiginleikar flugkviku og leiðir til mælinga, EDR

Flugkvika (*e. aircraft turbulence*) er afleiðing iðustreymis, það er þegar streymisstefna loftsins verður óregluleg og hvirflar myndast þannig að þrívíður vindhraði í hverjum punkti í loftinu breytist í sífellu að stefnu og stærð. Stærstu hvirflarnir sem myndast brotna síðan upp í smærri og smærri hvirfla sem að lokum missa afl sitt í varma vegna seigju. Flugkvika veldur óstöðugum hreyfingum á loftförum sem aftur valda farþegum óþægindum, og getur orðið svo mikil að tjón hlýst af og öryggi er ógnað. Afleiðingum flugkviku á hreyfingar loftfara hefur verið lýst á stigum, eins og sjá má á töflu 1.

Tafla 1: Dæmi um kvarða á styrkleika kviku. Tafla fengin frá [1]

Turbulence category	Peak acceleration ^a	Code
None	Less than 0.15 g	0
Light	0.15 g to, but not including, 0.5 g	1
Moderate	0.5 g to 1.0 g	2
Severe	Greater than 1.0 g	3

^a These accelerations, which may be positive or negative, are departures from the normal acceleration of gravity (1.0 g).

Lýsing á hröðurnar áhrifum kviku segir til um hreyfingar loftfars en farþegar mismunandi flugvéla sem jafnvel flygju hlið við hlið myndu ekki endilega upplifa sömu áhrif kviku. Þung og stór flugvél bregst öðruvísi við vindasviði utan loftfarsins en lítil og létt flugvél. Einn mælikvarði á afflið í kviku loftsins er TKE (*e. turbulent kinetic energy*), og annar er ε (*e. eddy dissipation rate*). Árið 2013 setti ICAO fram matsbreytuna EDR (sem þriðju rótina af eddy dissipation rate, $\varepsilon^{1/3}$, í einingunum $m^{2/3}s^{-1}$) til að lýsa affli iðustreymis á flugslóðum, sem flugrekendur geta notað til að áætla flugkviku ákveðinna flugvéla. Einnig setti ICAO fram aðferðir til að meta EDR út frá upplýsingum sem safnað er fyrir flugrita farþegaflugvéla og lýsti því hvernig EDR metið í einni flugvél megi nota til að spá fyrir um upplifun farþega (lóðrétta hröðun) í öðruvísi flugvél sem flygi um sama svæði á sama tíma. Tengslin eru í eftirfarandi jöfnu þar sem:

$$\varepsilon_W^{1/3} = \frac{\hat{\sigma}_z}{[0.7V_t^{2/3}I^*(f_l, f_h)]^{1/2}} \quad (1)$$

$\hat{\sigma}_z$ er staðalfrávik bandhleypisáðrar lóðréttrar hröðunar, V_t er flughraði, f_l og f_h eru lægri og hærri mörk bandhleypisunnar og $0.7V_t^{2/3}I^*$ er heildi bandhleypisáðs afrófs hröðunar flugvélarinnar fyrir epsilon=1. Til einföldunar, þá skilgreinum við kvikusvarstuðul flugvélarinnar sem

$$I = 0.7V_t^{2/3}I^*(f_l, f_h) \quad (2)$$

EDR er eiginleiki vindanna í loftinu, óháð flugvélum eða mæliaðferðum. Þetta þýðir að ef EDR er þekkt, þá má spá fyrir um lóðrétta hröðun (eða flugkviku upplifun) í hvaða flugvél sem er ef I og V_t fyrir hana er þekkt. Í þessu verkefni er notuð lítil og létt flugvél og lóðrétta hröðun hennar mæld þannig að reikna megi EDR meðan henni er flogið í grennd við Hvassahraun. Í heimild [1] er gerð grein fyrir tvennskonar mati á EDR sem hefur áhrif á flug; meðaltal yfir 60 sekúndur sem lýsir stöðugri kviku, eða „peak“ sem lýsir frávikum frá meðalgildinu. Þannig gæti komið fyrir að í tiltölulega rólegu meðal EDR komi í augnablik mjög há hröðun (peak) sem truflar flug en breytir meðal EDR ekki endilega mikið. Fyrir hvort gildanna eru til ákveðin mörk sem skilgreina kvikuna í léttu, meðal eða mikla kviku. Fyrir mæliftugvélinu er létt-, meðal-, og mikil kvika við „peak“ EDR=(0.1, 0.15 og 0.35) $m^{2/3}s^{-1}$. Samsvarandi fyrir t.d. Boeing 737 væri EDR=(0.1, 0.22 og 0.50) $m^{2/3}s^{-1}$. Áhugasamur lesandi getur kynnt sér þetta betur í WMO ritinu [1] og í bókinni Aviation Turbulence [2].

3 Samsetning, ísetning og prófun mælibúnaðar fyrir mælingaflugvélna

3.1 Frummælingaþörf (rúmhnit, hraði og lóðrétt hröðun)

I^* í jöfnu (1), er reiknað fyrir mæliflugvélna m.t.t hleðslu (eða massa), flughraða (*e. true airspeed*) og hleypisvið síunnar. EDR er reiknað frá ferveiki mældrar lóðréttrar hröðunar og flughraða. EDR er þá tengt tíma og staðsetningu (rúmhnitum; lengd, breidd og hæð) sem fengin eru með GPS staðsetningartækni. Við mælingarnar er flugmanni ætlað að halda föstum flughraða með fastri afstillingu til þess að ekki þurfi að mæla flughraða samfelld. Í flugkviku rannsóknnum hefur komið fram að megnið af flugkviku kemur fram í hreyfingum flugvélar á tíðnbilinu 0.1 – 2 Hz (sjá kafla 4), og því var talið að nægileg mælitíðni fyrir hröðunarkerkið væri t.d. 10 Hz.

Umhverfi til hröðunarmælinga í lítilli flugvél er erfitt vegna þess að vél og loftskrófa (titringur frá þeim veldur hárrí mælanlegri hröðun) eru lítið einangruð frá stjórnklefa vélarinnar þar sem flugmaðurinn og mælibúnaðurinn eru geymdir. Því þarf sérstakar ráðstafanir til að tryggja að hröðunarmælingar gefi hröðun sem kemur til vegna áhrifa vinda á flugvélna. Lagt var upp með að smíða mæli sem væri færanlegur á milli flugvéla, væri einfaldur í meðferð, og ekki svo dýr að verkefni af þessu tagi kæmist ekki almennilega til framkvæmda. Hér að neðan er því lýst hvernig til hefur tekist.

3.2 Kostir og gallar við mælingu EDR með hröðun

Markmið flugmælinganna er að meta flugkviku í svæðinu, og nota til þess EDR. EDR er einnig metið frá þrívíðum vindvigur sem er mældur í mastri á vegum Veðurstofunnar. Þar fæst þrívíður vindvigur í mismunandi hæð (mest 30 m) yfir jörðu, en eingöngu á einum stað í Hvassahrauni. Það er mögulegt að mæla vindvigna (og meta EDR) í svæðinu beint með vindmæli sem flogið væri með um svæðið, en slíkt er flókið í framkvæmd og krefst mikils tækjabúnaðar. Hér er valin einfaldari leið, þ.e. að mæla eingöngu lóðrétt hröðun flugvélar. Þessi aðferð býður upp á að mælitækin séu öll innanborðs, og krefst það engra sérstakra breytinga á flugvélinni sem þyrftu vottun flugvélaframleiðenda eða flugyfirvalda. Svona mælingar mætti því framkvæma í flugvélum í almennu áætlanarflugi, ef áhugi væri fyrir hendi. Þannig opnast einnig sá möguleiki að nota sérstakt app í venjulegum snjallsíma sem mælitæki fyrir flugkviku.

3.3 Mælitækni

Hröðunarnemar hafa lengi verið tengdir flugi, bæði í tregðuleiðsögukerfum og í titringsmælingum vegna mats á álagi á burðarvirki flugvélar. Flugritar skrá tugi mælinga sem framkvæmdar eru mörgum sinnum á sekúndu, þar á meðal hröðun vélanna eftir þremur ásum. Hröðunarnemar hafa þróast mjög í gegnum tíðina, og er nú svo komið að þeir nema þrívíða hröðun, eru örsmáir (MEMS) og það ódýrir að þeim er t.d. komið fyrir í nánast öllum snjallsímum nútímans og eru nýttir þar til að meta stöðu og stefnu símanna. Hröðunarnema, sem fyrir örfáum áratugum kostuðu hundruð þúsundir króna, má fá í dag fyrir nokkur hundruð krónur. Og í tengslum við örgjörfa má því fá í dag gagnasöfnunarkerfi (*e. data acquisition system*) fyrir nokkra tugi þúsunda.

Undirbúningstilaunir fyrir þetta verkefni voru m.a. gerðar með nemendum í HR (undir stjórn Joe Foley) sem settu saman haustið 2019, hröðunar-, hraðamæli ásamt GPS móttökutæki, allt tengt við Raspberry Pi tölvu.

Þá var í fyrstu flugmælingarnar (2019) notaður búnaður frá Aaronia í Þýskalandi sem gaf m.a. þrívíða hröðun, GPS staðsetningu og fleira með allt að 30 Hz tíðni. Aaronia tækið kostaði um 60 þús. kr. Gögnin frá því voru flutt með minnisflögu inn á tölvu þar sem frekari vinnsla gagna fór fram.

Eftir tilraunaflug með Aaronia (9 Hz söfnunartíðni) var ljóst að í mælingunum var mikið af truflunum frá aflvél flugvélarinnar auk loftskrófunnar, þannig að ferveik af mældri lóðréttri hröðun var ekki nema að litlu leiti vegna flugkviku. Vélarndur (á hærri tíðni en 9 Hz) kom því inn í mælda hröðun vegna speglunar (*e. aliasing*), með ófyrirséðum afleiðingum fyrir ferveik hröðunar. Til að draga úr áhrifum umhverfisþátta var lagt upp með að velja mælinum stað í flugvélinni þar sem vélarndur væri í lágmarki, og að auki verja mælinn fyrir ytri truflunum með mottum og dempurum. Dreigið var úr áhrifum vélarndar um 80 – 90%, en engu að síður voru áhrifin af „suði“ umhverfisins á loftkvikumælingar töluverðar. Þessu er lýst frekar í viðauka 8.4.

Því var farin sú leið að mæla hröðun með drónatölvum sem gætu mælt á hærri tíðnum. Fengin var að láni (Cube Orange) drónatölva með allt að 5 kHz söfnunartíðni og stefnt að því að einangra flugkvikuna með stafrænni síun. Eftir nokkrar rannsóknir varð úr að 200 kHz söfnunartíðni væri nægileg til að hreinsa allan vélarnd frá hröðunarmælingunum með stafrænni bandhleypisíun. Þessu eru gerð frekari skil í viðauka 8.4.

Staðsetning, hæð mælistaðar og jarðhraði eru fengin með GPS (stutt með loftþrýstingsmælingu) og flughraði (*e. true airspeed*) er fengið með Pitot mæli (þrýstimunur á breytilega og föstum þrýstingi loftsins). Þetta er allt tekið saman í gagnasöfnunarkerfi (*e. Data Acquisition System*) sem byggir á Pixhawk 4 drónastýritölvu. Gögnin eru síðan greind nánar eftir að flugi líkur.

3.4 Drónastýritölva

Í seinni tíð hefur framleiðsla á drónum aukist mikið og eru þeir verðlagðir þannig að almenningur getur eignast eintök sem nota má til leikja og til að taka myndir. Í drónunum eru stýringar sem byggja á t.d. GPS og hröðunarnemum, snúðvísi (*e. gyroscope*) og Kalman síum. Þessar stýringar eru smáar en öflugar, og hin mikla útbreiðsla (með opnum hugbúnaði) hefur valdið því að mjög aflmiklar stýringar má fá gegn vægu gjaldi. Við höfum prófað t.d. Cube Orange með Ardupilot, og Pixhawk 4 mini með PX4 hugbúnaði. Drónastýringu er náttúrulega ætlað að skynja staðsetningu, hraða, hröðun og stefnu drónans til að stjórna áframhaldandi ferðalagi hans. Hér erum við alls ekki að nota stýrieiginleika drónatölvunnar, eingöngu staðsetningu og hröðun. Við völdum að fara leið PX4, en hún á rætur sínar að rekja til ETH Zuerich (Computer Vision and Geometry Lab), og er rekið í opnum kerfum (*e. open Source*). Studningur við PX4 kemur frá ýmsum aðilum bæði með vélbúnaði og hugbúnaði. Pixhawk 4 mini stýritölvan sem við notum byggir á örgjörva (32 Bit Arm Cortex-M7, 216MHz, 2MB memory, 512KB RAM) og fjölda nema t.d. hröðunar- og snúðmælinga. Við hana er tengdur GPS nemi. Stýrikerfið er NuttX sem keyrir PX4 hugbúnað sem er forritið sem sér um mælingar ofl, og samskipti við tölvuna fara yfir QGroundControl hugbúnaðinn.

Á flugi er geymd skrá með helstu mæliupplýsingum hún hefur skráar endinguna `.ulg`, sem er það sem PX4 hugbúnaðurinn skilar frá sér. Í þessari skrá er geymt það sem við sækjumst eftir, og er því okkar gagnasöfnunarkerfi. Nánari upplýsingar um Pixhawk 4 mini má fá hér:[3]. PX4 umhverfið býður líka upp á forrita umhverfi í Python sem nota má til að skoða gögn úr flugum. Við höfum unnið enn frekar úr gögnunum með Python m.a. til að sannreyna áreiðanleika mælinga, en einnig til að reikna EDR og setja fram niðurstöður á myndrænu formi.

Hugbúnaðurinn í tölvunum til þess að eiga samskipti við Pixhawk4 mini heitir QGroundControl. Hann er notaður t.d. til þess að breyta föstum, kvarða tölvuna (*e. calibrate*) o.fl. Einnig er þar hægt að sjá gögn í rauntíma þ.m.t. gröf. Þetta er einkar gagnlegt ef aukamaður er með í flugvél til þess að fylgjast með þessum upplýsingum. Þetta var þó aðallega til þess að breyta ákveðnum föstum fyrir flug, til þess kvarða tölvuna (*e. calibrate*) og sækja `.ulg`-skrárnar til frekari vinnslu.

3.5 Mælingar með snjallsíum

Snjallsímar eru búnir fjölda skynjara sem má m.a. nota til mælingar flugkviku. Snjallsímar hafa innbyggða hröðunarnema sem mæla lárétta og lóðrétta hröðun en einnig GNSS búnað sem mælir staðsetningu og hraða. Þó að snjallsími sé í flugvél nær hann í mörgum tilvikum sambandi við nægilega mörg gervitungl staðsetningarkerfa sem gerir honum kleift að finna bæði stað og hraða. Það þarf að koma símanum fyrir á láréttu yfirborði og getur hann þá mælt lóðrétta hröðun en út frá henni er hægt að reikna EDR. Hægt er að nýta síma með Android og IOS stýrikerfum til þessara mælinga en Android símar hafa hærri sýnatökutíðni og eru þar með hentugri. Nýsköpunarsjóður námsmanna styrkti verkfræðinema, Ragnheiði Erlu Garðarsdóttur til þess að vinna að verkefni sem nefnt var „Lýðvistun mælinga á ókyrrð í flugi“ [4]. Hún vann verkefnið í Háskóla Íslands undir leiðsögn Sæmundar E. Þorsteinssonar lektors. Markmið verkefnisins var að skoða hve vel snjallsímar henta fyrir mælingar flugkviku, prófa söfnun á mælingum og forrita síma til þess að senda mæliniðurstöður inn á gagnagrunn. Með þessu gætu flugmenn á Íslandi byggt upp gagnagrunn um flugkviku á þeim leiðum sem flognar eru. Slíkar upplýsingar geta orðið verðmætar með tímanum, bæði við undirbúning nýrra flugvalla en ekki síður við val á flugleiðum við misjafnar veðuráðstæður. Þetta stuðlar að bættu flugöryggi og þægindum farþega og áhafna.

Verkefnið sýndi fram á að unnt er að nýta snjallsíma á þennan hátt, jafnvel þann síma af Samsung gerð sem notaður var í verkefninu en við mælingar kom í ljós að hann er búinn síðri hröðunarnemum en sími af Apple gerð sem einnig var mældur og Pixhawk 4 tölvan sem höfð var til viðmiðunar. Með forritun símans var hægt að láta hann safna mæligildum, sía þau, reikna og birta EDR. Umfang þessa verkþáttar reyndist nægja þessu verkefni og ekki vannst tími til að ljúka fjarskiptahluta þess. Í framhaldsverkefni þarf að ljúka við fjarskiptahlutann, byggja upp gagnagrunninn sem geymir mælingarnar og vinna úr gögnunum.

3.6 Prófun og kvörðun í tilraunastofu

Prófað var að keyra drónatölvu í kyrru umhverfi í eina klukkustund. Niðurstöður voru skrifaðar í minnisblað sem er að finna í viðauka 8.4. Þar kom í ljós að innra suð mælis er aðeins brot af 1 m/s^2 eða nákvæmar 0.04 m/s^2 yfir allar tíðnir en aðeins 0.005 m/s^2 eftir síum. Þannig ekki þarf að hafa áhyggjur af því þegar á mælingum stendur.

Einnig var prófað að setja tölvuna á titringsborð. Það virkar sambærilegum stórum hátalara sem lyftir yfirborði á tíðni sem er stillt á tækinu. Einnig er hægt að breyta útslagi. Tölvan var lögð á yfirborðið og prufað að keyra titring af stað. Tölvan var svo tekin í eftirvinnslu og kom í ljós að merkið skoðað á tíðnirófinu skilaði mjög hreinum og snörpum topp á réttri tíðni. Hér mátti því sjá að tölvan skilaði mjög hreinu merki og áreiðanlegu. Ekki komu neinar innri yfirtíðni eða undirtíðnir. Þetta var framkvæmt af Sæmundi og Ragnheiði í skýrslu þeirra um notkunar farsíma við mælingar á EDR [4].

3.7 Ísetning mælibúnaðar í flugvél

PX4 mini tengdur við GPS móttakara og stundum Pitot-pípu, fór eftir tölvu. Í uppsetningu er gætt að fastbúnaður (*e. firmware*) sé réttur, og stuðlar (*e. parameters*) stilltir til samræmingar milli Pixhawk4 tölvanna. Aflgjafi er rafhláða sem tengd er með USB. Nokkrar uppstillingar eru notaðar:

- Pitot úti á væng, en Pixhawk4 og GPS á mælaborðshillu flugvélarinnar
- Pitot, Pixhawk4 og GPS saman úti á vængstífu flugvélarinnar (aðferð lögð niður, sjá viðauka 8.4)
- Pixhawk4 og GPS á mælaborðshillu flugvélarinnar

Það kom í ljós að staðsetning hröðunarnema verulega utan miðju flugvélar (t.d. á vængstífu) veldur skekkju því þar er auk lóðréttrar hreyfingar (*e. plunge*) hröðun vegna hallabreytinga (*e. roll*) flugvélarinnar. Þó hægt væri að eyða þessari viðbót í eftirvinnslu (því nemarnir mæla líka hverfiþunga með snúðum (*e. gyroscope*) t.d. vegna veltu), er miklu einfaldara að staðsetja hröðunarnemana við miðju flugvélarinnar til að mæla hreina lóðrétta hröðun. Þar sem ekki er endilega þörf á pitot-röri var þessi aðferð lögð niður. Ekki er nauðsynlegt að hröðunarneminn snúi þannig að þyngdarhröðun jarðar liggi nákvæmlega eftir z -ási nemans, því að eftir að honum er komið fyrir er flugvélin sett í lárétta stöðu og neminn núllstilltur svo hann viti hvað snýr upp og hvað niður. Á mynd 1 má sjá tölvurnar á mælaborði flugvélarinnar. Í miðjunni undir teygjunetinu er tölva 1, sem hefur mælt hvað mest í þessu forverkefni. Hún situr á álplötu með GPS tækinu. Hvíta snúra sem er tengd við hana er snúran sem er tengd við pitot-rörið fast á vængnum sem má sjá á mynd 2.

Hinar tölvurnar tvær má líka sjá á mynd 1, hægra megin og svo vinstra megin. GPS tækin eru svo fremst við gluggann. Þessi tæki er fest niður með frönskum rennilás sem læsist í dúkinn á mælaborðinu. Mynd af tölvunni sem er út á væng má sjá í viðauka 8.4.



Mynd 1: Hér má sjá þrjár Pixhawk tölvur. Tölva 1 er fyrir miðju á álplötu. Í hana er hvít snúra sem er tengingin við Pitot-rörið út á vængnum. Stór rafhlöðupakki er við hliðina á henni sem annars væri tengt við hana í flugi. Tölvunni er haldið niðri með teygjunni sem sést á myndinni. Á mælaborðinu sjáftu er dúkur og á hinar tvær tölvurnar var settur franskur rennilás og var það notað til þess að halda þeim niðri ásamt rafhlöðupökkunum tengt við þær.



Mynd 2: Á þessari mynd sést pitot-rörið sem er tengt við tölvuna inn í stjórnklefa. Móttökutækið sem sendir gögnin til Pixhawk 4 er klætt með plasti til að verja fyrir veðri og vindum. Límbandið náði ekki yfir tölvuna svo hægt væri að sjá ljós sem er á tækinu.

3.8 Truflanir frá umhverfi

Að ofan hefur komið fram að suð frá mótór og spaða er fjarlægt úr hröðunargögnunum með stafrænni síun (bandhleypi 0.1 – 2 Hz eða 0.1 – 5 Hz), en lægsta tíðni mótórtruflana er við 20 Hz eða svo í mæliflugi. Mótórtruflunum er því auðveldlega eytt með þessari aðferðafræði.

Annað sem truflað getur hröðunarmælingar er inngríp flugmanns í stjórnun flugvélarinnar. Beygjur auka mælda lóðrétta hröðun og því er flogið í sem lengstum beinum leggjum. Þá er einnig flogið með það í huga að eyða sem mest velti (e. *pitch*) breytingum sem geta orðið vegna áhrifa kvikunnar. Þ.e. flugmaður reynir að halda láréttri nefstefnu (e. *attitude*) fastri á mæliflugslaggjunum, sem styður líkanið sem unnið er með sem gerir ráð fyrir hreinni lóðréttri hreyfingu flugvélarinnar.

3.9 Prófanir á búnaði í flugvél

Til flugmælinganna er fyrst og fremst notuð TF-SRO, flugvél sem er íslensk heimasníði með ICP Savannah smíðaeiningum (kit, sjá ennfremur á www.icpaviazione.it). Hana má sjá á mynd 3. Savannah er tveggja sæta STOL (e. *short takeoff and landing*) flugvél með hámarks flugtaksþyngd 600 kg. Flugvél af þessari gerð bregst mjög hatt við lóðrétum vindbreytingum og hentar því vel í þessar mælingar. Heimavöllur vélarinnar er á Hólmsheiði (athafnasvæði Físfélags Reykjavíkur), en einnig hefur verið farið í flugmæliferðir frá Reykjavíkurlugvelli. Mælingar hafa einnig verið framkvæmdar í öðrum flugvélum af svipaðri gerð.



Mynd 3: ICP Savannah flugvélin, TF-SRO, sem hefur fyrst og fremst verið notuð til mælinga.

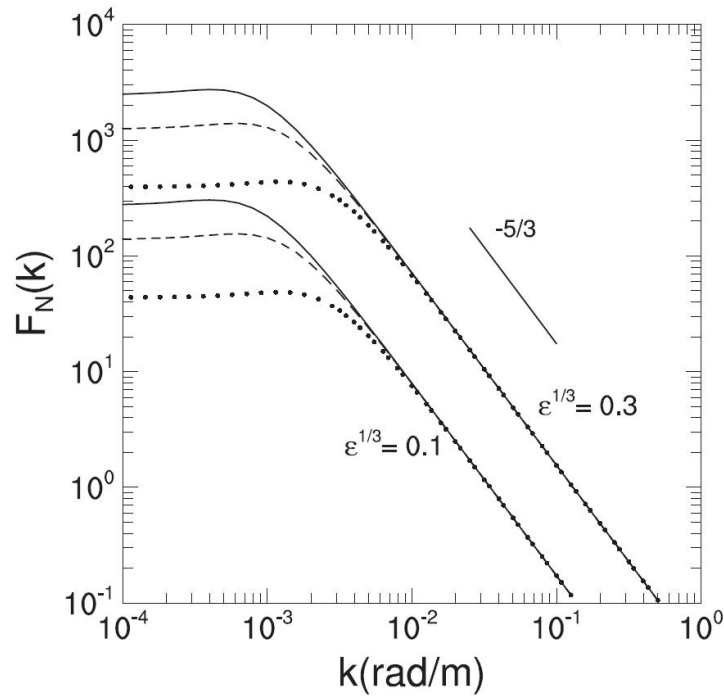
Fyrstu hröðunarmælingarnar voru framkvæmdar með Aaronia mælinum í desember 2019, og í Hvassahrauni (TF-VTR, ICP Ventura) í mars 2020. Þar kom strax í ljós að þegar flugmenn urðu varir við flugkviku, þá mældist líka hækkað staðalfrávik í lóðréttri hröðun eins og undirbúningur hafði gert ráð fyrir. En fljótlega kom í ljós að suðhlutfallið (*e. Signal-to-Noise ratio*) var óheppilegt og nákvæmni mælinga því lítil, sérstaklega í lítilli kviku. Fjöldi ferða var farin til að prófa aðferðir (staðsetning, dempun, ofl) til að bæta þetta hlutfall, með töluverðum árangri en ekki nægilegum. Í nóvember 2020 var fyrsta ferðin farin með mælitölvu úr dróna (Cube Orange), sem gat mælt hröðun með allt að 5000 Hz. Fljótlega kom í ljós að með hárrí söfnunartíðni varð mögulegt að nota stafrænar bandhleypisúr til að fjarlægja umhverfistitring og halda eftir eiginlegri dýfu hröðun (*e. plunge acceleration*). Þá var valið að fjárfesta í nokkrum Pixhawk 4 Mini drónastýritölvum með GPS tengingum, sem nú eru notaðar til flugmælinga. Margar mæliferðir hafa verið farnar til að kanna eiginleika Pixhawk 4 Mini og er árangur jákvæður. Í ágúst 2021 var flogið samtímis með þrjár Pixhawk 4 Mini drónatölvur með mismunandi staðsetningu og tengibúnað og gáfu þær nánast einróma niðurstöður því fylgistuðlar (*e. correlation coefficients*) fyrir tímaraðir (10 Hz) staðalfráviks hröðunar voru um 0.98 fyrir um hálf tíma flug. Það má lesa nánar um þessar tilraunir í viðauka 8.4.

4 Svörun flugvélar við loftkviku

Loftkvika verður til vegna margvíslegra óreglulegra strauma, þar sem hringiður myndast og hraði í hverjum punkti breytist í sífellu að stefnu og stærð. Straumlínur eru margvíslegar og hlykkjöttar. Vindhreyfingum í kviku verður því almennt ekki lýst nema með líkönum, sem gera kleift að lýsa tölfræðilegum eiginleikum lofthreyfinganna, sem valda þeim kröftum, sem virka á loftför og geta í besta falli verið óþægilegar fyrir farþega og áhöfn en geta í versta falli torvelað að halda flugvélinni á réttum flugferli og jafnvel verið varasamir vegna flugöryggis þ.e. hættulegar. Viðbrögð flugvéla við hvers konar loftkröftum hafa verið ítarlega rannsökuð til þess að tryggja að þær uppfylli öryggiskröfur og til að gera kleift að herma eftir þessum viðbrögðum jafnvel löngu áður en flugvélin hefur verið smíðuð og prófuð. Þetta er að stórum hluta gert með því að beita línulegum hreyfilíkönunum, sem lýsa frávikum á flugferli frá stöðugu ástandi og ekki hvað síst hröðun, sem er áhrifamesta birtingarmynd loftkviku á flugi. Öllu erfðara er þó að lýsa eiginleikum vindsins, sem veldur kvikunni, þar sem um er að ræða mjög flókin fyrirbæri, sem erfitt er að henda reiður á þar sem óreglulegar lofthreyfingar, landslag og flókið samspil veðurs og vinda koma saman. Með tíð og tíma hefur þó tekist að setja saman staðlaðar aðferðir og þróa mælibúnað til að fást við þetta viðfangsefni, þ.e. að lýsa með meginlegum hætti hver áhrif loftkvikunnar eru á hverjum tíma og jafnvel spá fyrir um hver þau muni að líkindum verða við tilgreind veðurskilyrði.

4.1 Líkan lóðréttrar loftkviku

Í sem stystu máli byggjast þessar aðferðir fyrst og fremst á matsaðferðum, sem mælt er með af Alþjóðaflugmálastofnuninni (ICAO) og Alþjóðaveðurstofunni (WMO) og eru því ígildi staðla ásamt reikniadferðum, sem hefur verið lýst af vísindamönnum og verkfræðingum í ritrýndum greinum og bókum. Samkvæmt þessum fræðum er megináhersla á að mæla og spá fyrir um afl loftkvikunnar, sem er mælt í EDR og er óháð eiginleikum flugvélarinnar. Lýsing á dreifingu orkunnar í lofti er gjarnan lýst með aflrófi, sem kennt er við straumfræðinginn Theodor von Karman og sjá má á mynd 4. Þar sem afl lóðréttrar vindkviku er sýnt sem fall af bylgjulengd eða bylgjutölu eftir beinum ferli flugvélar í láréttu plani. Þessi kvika birtist sem tímaháð breytistærð um borð í flugvélinni, sem flogið er með föstum hraða eftir þessum ferli. Því meiri sem styrkleikinn er þeim mun hærra verður gildi EDR, sem hliðrar aflrófinu upp á við. Eins og fram kom í kafla 1.4 (tafla 1), er ágæt samsvörun milli hámarkshröðunar og skynjunar áhafnar og farþega á því hve mikil ókyrrð telst vera í lofti. Gallinn við þetta mat er sá, að það er mjög háð hvaða gerð flugvélar er um að ræða. Sú aðferð, sem lýst er í þessari skýrslu byggist hins vegar á að aðskilja eiginleika loftkvikunnar og hreyfieiginleika flugvélarinnar, sem notuð er til að gera þær mælingar, sem hér er lýst og byggjast á að reikna EDR, sem er eingöngu háð vindhraða kvikunnar. Nánar er fjallað um þetta atriði í Viðauka 3.1.



Mynd 4: Afróf Von Karman og Kolmogorov sem fall af bylgjunúmerinu k fyrir tvenn gildi á $\varepsilon^{1/3}$ og þrenn gildi á lengdarskalanum L (óbrotnar línur = 1500 m, strikalínur = 1000 m og punktalínur = 500 m). Til samanburðar er sýnt gildi á $F_N(k) = k^{-5/3}$. Mynd fengin frá [5].

Framangreint líkan von Karman, sem lýsir lóðréttum hraða loftkvikunnar, skilgreinir með afrófinu hve mikið afl sé til staðar á hverju bylgjulengdarbili. Forsenda Taylor gerir ráð fyrir að þegar flogið er eftir beinum ferli í gegnum rúmið breytist ailið í tímamerki á þann hátt að $\omega = k \cdot V_a$, þar sem V_a táknar raunhraða flugvélarinnar (TAS) gegnum loftið. ω hefur þá einunguna rad/sek og afrófið er fall af tíðni fremur en bylgjulengd eða bylgjutölu. Viðbrögð loftfara við loftkviku, sem einkum felast í hröðun, hraða og staðsetningu loftfarsins eru skilgreind sem föll af tíma og tíðni og sama gildir um mælingar teknar á flugi. Af þessari ástæðu er nauðsynlegt í hverju tilviki að flytja afróf von Karman yfir í tímarúmið þegar fyrir liggur hver flughraði viðkomandi lofars er. Í þessu sambandi er mikilvægt að hafa í huga að:

$$F_N(k) \cdot dk = S_w(\omega) \cdot d\omega \quad (3)$$

sem tryggir að heildarafl merkisins sé hið sama hvort sem afrófið er fall af k eða ω . Því er $S_w(\omega) = \frac{1}{V_a} \cdot F_N(k)$

4.2 Líkön flugvéla

EDR mælikvarði, sem táknar styrkleika eða „ákefð“ kvikunnar, er í þessu verkefni metinn með úrvinnslu á hröðunarmælingum, sem gerðar eru um borð í flugvélinni. Hröðun flugvélar er háð afli kvikunnar en er einnig komin undir tregðueiginleikum viðkomandi flugvélar. Því er mikilvægt að hægt sé að skilja í sundur eiginleika kvikunnar annars vegar og áhrif flugvélarinnar hins vegar. Í þessu skyni má nota líkan af hreyfueiginleikum mæliflugvélarinnar, t.d. í formi yfirfærslufalls, sem tengir lóðréttan hraða kvikunnar við hröðun flugvélarinnar, sem er hin mælda breytistærð. Einfaldast er að nota svonefnt dýfulíkan (*e. plunge model*) í þessum tilgangi eins og áður er lýst. Þá eru allir kraftar, sem virka á flugvélinna eftir lóðréttum ás tengdir saman í massamiðju vélarinnar og hröðun reiknuð út. Niðurstaðan er sett fram í formi yfirfærslufalls, sem tengir saman lóðréttu hröðun flugvélarinnar \ddot{z} (útmerki) og lóðréttan kvikuhraða w_g (innmerki), sem má skrifa á forminu:

$$\ddot{Z}(s) = \left[\frac{G \cdot H_K(s) \cdot s}{1 + G \cdot H_W(s) \cdot s} \right] \cdot W_g(s) \quad (4)$$

þar sem G er fasti sem er fyrst og fremst háður eiginleikum flugvélarinnar svo sem næmni lyftikrafts vængsins, vænghleðslu og flughraða. $H_K(s)$ er yfirfærslufall svonefndra Küssner hrifa, og $H_W(s)$ er yfirfærslufall Wagner hrifa. Küssner og Wagner hrifin lýsa smávægilegum seinkunum, sem verða á myndun lyftikraftsins annars vegar vegna kvikugustsins, w_g , og hins vegar vegna lóðréttu hraða flugvélarinnar, \dot{z} . Þetta líkan er notað ásamt afrófi

kvikunnar til þess að reikna kvikusvarstuðulinn I sem er fall af heildunarstærðinni I^* sem kemur fram í jöfnu (1). Eins og þar kemur fram er EDR stærðin í réttu hlutfalli við staðalfráviki hröðunarinnar, en nefnarinn felur í sér leiðréttingu fyrir eðlisáhrifum mælingarflugvélarinnar. Nánari skýringar á hvernig þetta líkan er byggt upp og notað er að finna í viðauka 3.2.

4.3 Dýfulíkan flugvélar

Áhrif loftkviku á flugvélar eru af þeim toga að þau valda hröðun, sem flytja flugvélinu úr því hreyfiástandi, sem æskilegast er, þ.e. gera það að verkum að flugvélin hreyfist á óreglubundinn hátt frá fágudum og hnökralausum ferli. Um er að ræða krafta, sem virka eftir öllum þremur ásum vélarinnar vegna kvikustrauma í lofti og valda óreglulegri hreyfingu um þessa þrjá ása. Langmikilvægastur í þessu sambandi er lóðrétti krafturinn, sem virkar í sömu stefnu og lyftikraftur vængsins. Þessi kraftur veldur þeirri hreyfingu, sem er stærst og hefur mest áhrif á menn og búnað um borð í flugvélinni. Því er í mælingum á loftkviku lögð mest áhersla á að mæla áhrif lóðrétta kraftsins, sem stafar fyrst og fremst af ytri breytingum á lóðréttum vindhraða (þ.e. upp- og niðurstreymi) á vænginn. Sú spurning vaknar því hvernig best sé að gera mælingar á þessum áhrifum kviku eða sviptivinda á flugvélinu og kemur þar ýmislegt til greina. Af mælitæknilegum ástæðum er einfaldast og liggur beinast við að mæla hröðun, en slíkir mælar hafa verið til lengi og eru nú fáanlegir á ódýrum og örsmáum MEMS rásum. Auk þess að mæla hröðun eftir þremur ásum mæla þeir einnig hornhraða um sömu ása með nákvæmni, sem er meira en fullnægjandi til að meta áhrif loftkvikunnar.

Hröðun er jafnframt sú stærð, sem hefur mest áhrif á þá, sem eru um borð í flugvélinni og er því góður mælikvarði á óþægindi viðkomandi. Hinsvegar er hröðunin sem slík ekki einhlít að svo miklu leyti sem hún er bæði háð eiginleikum og styrk loftkvikunnar en jafnframt er hún mismunandi eftir eðlisfræðilegum eiginleikum viðkomandi flugvélar. Því er nauðsynlegt að reikna út og leiðrétta fyrir eiginleikum flugvélarinnar þannig að góð mæling fái af styrk loftkvikunnar, sem er orsakavaldurinn. Mjög mikil þekking er fyrir hendi til að reikna út hreyfingar flugvéla í hvers konar umhverfi og eru flughermar, sem eru notaðir til þjálfunar flugmanna, gott dæmi um slíkt. Hér verður farin sú leið að nýta tiltölulega einfalt líkan til að lýsa viðbrögðum flugvélar við lóðréttum vindgusti, sem vélin verður fyrir í láréttu flugi, þegar hún lendir í loftkviku. Um er að ræða einfalt kraftalíkan eftir lóðrétta ásnun, sem lýsir hreyfingu flugvélarinnar eins og massa, sem stjórnast af jákvæðum og neikvæðum lyftikröftum, í samræmi við stefnu vindgustsins. Þetta er gjarnan nefnt dýfulíkan (*e. plunge model*), sem helgast af því að lóðréttar hreyfingar í kviku geta verið snöggar og óvæntar og líkast því að falla í vatn. Líkanið er einfalt en nær að tengja saman áhrif vindgusts á hröðun og hraða flugvélarinnar í lóðrétta stefnu og er því gjarnan notað við mælingar á styrk loftkviku í flugi.

Diffurjafnan sem líkanið byggist á er eftirfarandi:

$$M\ddot{z} = -\frac{\rho}{2}V^2SC_{L\alpha}\frac{\dot{z}}{V} + \frac{\rho}{2}V^2SC_{L\alpha}\frac{w(t)}{V} \quad (5)$$

Þar sem M er massi flugvélarinnar, ρ er eðlismassi loftsins, V er hraði flugvélarinnar, S er flatarmál vængsins, $C_{L\alpha}$ er stigull lyftikraftsins með áfallshorni, $w(t)$ er lóðréttur vindhraði og z er lóðrétt færsla flugvélarinnar. Út frá þessum breytum er hægt að skilgreina stærðina G sem

$$G = \frac{\rho}{2M}VSC_{L\alpha} \quad (6)$$

Þetta tengir saman jöfnur (4) og (5), má sjá ítarlegra í viðauka ATH.

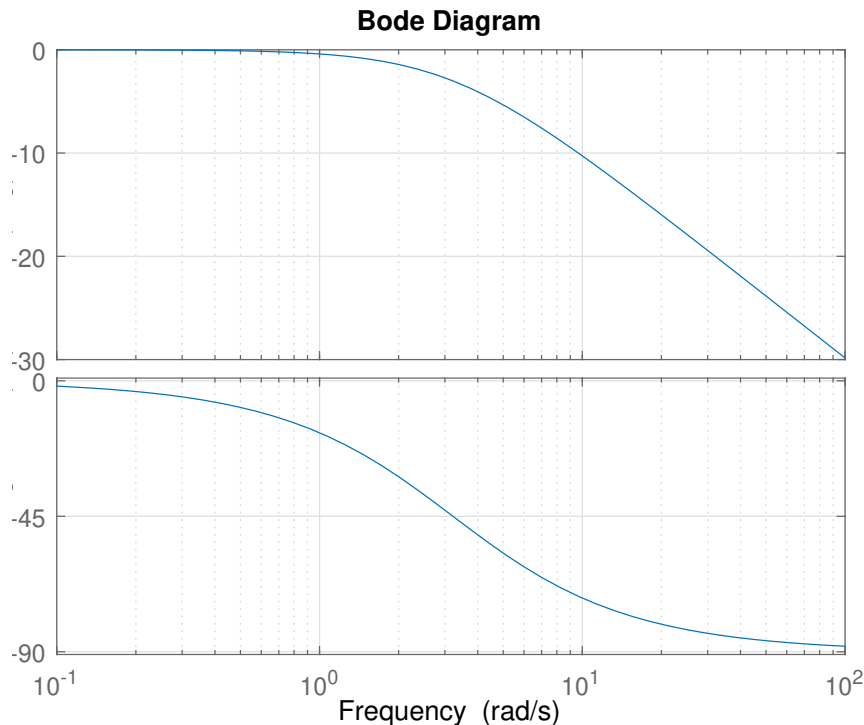
Gildi þeirra stuðla og stika, sem eiga við Savannah flugvélinu, sem er mest notuð til mælingaflugs, eru gefin í meðfylgjandi töflu:

Tafla 2: Gildin á breytunum sem koma fram í jöfnu (5) og (6).

Stuðull	Gildi	Mælieining
ρ	1.225	kg/m ³
V_T	40	m/s
S	12.9	m ²
$C_{L\alpha}$	4.584	1/rad
M	450	kg
G	3.2195	rad/s

Jafnframt fylgir með í töflunni það gildi á G sem er notað og reiknast vera 3.2 rad/sek. Þetta gildi skilgreinir í reynd bandviddina í svörum flugvélarinnar við lóðréttum kvikuvindi eins og sjá má af mynd 5, sem sýnir tíðnisvörum

Savannah flugvélarinnar. Af henni má sjá að hraði Savannah flugvélarinnar fylgir nánast að fullu kvikuvindinum upp að 3.2 rad/sek, sem er um 0.5 Hz. Síðan dregur úr þessari fylgni og við 12 rad/sek (2 Hz) er hraðahlutfallið orðið 0.25 eða 25%.



Mynd 5: Tíðnisvörðun Savannah flugvélar á milli hraða vélarinnar og hraða kvikunnar. Efri myndin sýnir útslag í dB og neðri myndin sýnir fasa í gráðum.

4.4 Útreikningar á kvikusvarstuðlinum

Ljóst er að loftkvikan uppfyllir ekki þá kröfu að tölfræðilegir eiginleikar hennar séu óháðir tíma, enda þekkja flugmenn vel hvernig styrkleiki ókyrrðarinnar getur tekið miklum breytingum á jafnvel litlu svæði eins og t.d. innan stjórnsvæðis flugvallar. Því er við því að búast að mælingar á kvikuhróðun séu sífellt að taka breytingum, sem t.d. birtast í reiknuðu staðalfráviki, þegar flognir eru nokkrir kílómetrar eftir beinni línu í lítilli hæð (t.d. 1000-2000 fetum) yfir breytilegu landslagi. Ef línustubbur er nægilega stuttur til að ekki verði verulegar breytingar á slembieiginleikum ferlisins, en þó nægilega langur til að gefa viðunandi fjölda mæligilda, má líta svo á að ferlið sé ergodískt, þ.e. að tímameðalgildi og safngildi séu hin sömu eða sambærileg. Algengt er að þetta tímabil sé valið 10 – 20 sekúndna langt, sem með 40 m/sek er 400 – 800 metrar. Hér er hins vegar valið að reikna staðalfrávikið yfir 30 sek tímabil. Bylgjulengdin er þá um 1200 metrar en einnig er reiknað staðalfrávik á hverri sekúndu til að ná snöggum breytingum í styrkleika kvikunnar.

Þar sem I er háð ýmsum stærðum var ákveðið að búa til einfalda jöfnu sem lýsti I sem falli af massa og lofthraða flugvélarinnar til að gera einfalt að taka tillit til breytinga á þessum stærðum við útreikning á I tegrinu. Þessu atriði er nánar lýst í viðauka 8.4.

4.5 Staðfesting á líkani flugvélarinnar

Hreyfilíkan flugvélarinnar byggist á hönnunarstikum, sem hafa verið áætlaðir og mældir með ýmsum hætti og lýsa kröftum, sem loftkvikan veldur á vængi og bol flugvélarinnar. Æskilegt er að staðfesta líkanið með mælingum á svörum flugvélarinnar á flugi við breytingum á innmerkinu, sem felst í breyttu áfallshorni og leiðir til þess að staðfesta megi að líkanið lýsi raunverulegum viðbrögðum og hugsanlega að endurbæta gildi stikanna sem skilgreina eiginleika líkansins. Þetta er fyrst og fremst gert með því að beita hæðarstýrinu til þess að breyta áfallshorninu frá jafnvægisgildi á þann hátt að bera megi saman svörum líkansins og mældrar svörunar. Áhersla er lögð á að prófa

Þessa eiginleika á tíðnisviði loftkvikunnar þar sem líkaninu er beitt til að meta EDR gildi mælinganna. Nánar er fjallað um útreikning á EDR í Viðauka 3.1.

Í útreikningi á líkani flugvélarinnar skiptir meginmáli að G , sem inniheldur stærsta hlutann af eiginleikum mælingarflugvélarinnar, sé eins réttur og kostur er. Þessi stuðull er vel þekktur fyrir Savannah flugvélargerðina, þar sem fyrir liggja mjög áreiðanlegar mælingar á lyftieiginleikum vængsins fyrir þessarar gerð flugvéla. Sama gildir um Ventura vélina. Küssner og Wagner hrifin hafa hinsvegar stutta tímakonstanta og ekki mikil áhrif svörun flugvélarinnar á lægri tíðnum. Þau hafa því verið fundin út frá almennum líkani, sem hefur ekki enn verið staðfest með prófunum í flugi, þar sem til þess hefur ekki unnist tími. Þessi hrif hafa hverfandi áhrif á EDR reikningana vegna þess að þau eru almennt yfir tíðnisviði kvikunnar skv líkani von Karman. Þessu viðfangsefni verður fylgt eftir sem áhugaverðu rannsóknarviðfangsefni eins og getið verður um í kafla 7.

4.6 Hermunarprófanir á reiknilíkunum

Nota má reiknilíkönin, sem notuð eru til að lýsa hreyfieiginleikum kvikunnar annars vegar og svörun flugvélarinnar hinsvegar, til að framleiða mæligögn og prófa aðferðir til að vinna úr þeim í því skyni að reikna EDR gildi kvikunnar. Auk reiknilíkans fyrir flugvélinu, sem tengir saman áfallshornið á vænginn og hreyfingar flugvélarinnar, sem kvikan veldur eins og lýst er í undirkafla 4.1, er notað sérstakt líkan til að búa til slembiferli, sem hefur nokkurn veginn sömu tölfraðilegu eiginleika og von Karman líkanið. Þetta er gert með líkani sem byggist á yfirfærslufalli línulegs kerfis en hefur aflróf, sem er mjög áþekkt aflrófi von Karman líkansins. Þessi leið er yfirleitt farin til þess að einfalda stærðfræðilega útreikninga við hermunina án þess að miklu muni hvað tölfraðilega nákvæmni varðar. Þessu til viðbótar má svo bæta við líkani af skekkjum hröðunarmælinganna, sem gerir ráð fyrir að þeim megi lýsa sem hvítu suði, þ.e. mæliskekkjurnar séu jafndreifðar yfir tíðnirófið og hafi litla sjálffylgni. Nánar er fjallað um þessi og fleiri atriði við að raungera slíka hermun í Viðauka C.

Helsta markmiðið er að staðreyna og prófa úrvinnsluáferðirnar og staðfesta nákvæmni þeirra og takmarkanir að svo miklu leyti sem slíkt er hægt með hermun. Helstu prófanir af þessu tagi eru:

- Ganga úr skugga um að útreiknuð tölfraði skili sér, þ.e. að samræmi sé á milli líkansins og þeirra niðurstaðna sem fást með því að reikna út frá hermdum mæligildum.
- Reikna út EDR út frá hröðun flugvélarinnar og kvikuhraðanum og bera saman.
- Móta styrkleika kvikunnar, t.d. með lágtíðni sínusbylgju, til að kanna hve vel útreiknað EDR fylgir eftir slíkum breytingum.
- Kanna viðbrögð flugvéla af mismunandi gerðum til að segja fyrir um hegðun þeirra í kviku samkvæmt hermilíkönunum eða með því að nota mæligögn til að meta áætluð viðbrögð slíkra flugvéla við tiltekin skilyrði ef og þegar þau verða fánleg.

Fyrsta prófunin er fyrst og fremst til þess fallin að staðfesta eiginleika líkansins, þ.e. að ferveik ástandsstaerða, sem eru fengin með númerískum útreikningum á tímaröð, séu af sömu stærð og fæst með því að reikna safnstærðir. Til dæmis er mikilvægt að staðfesta að styrkur hvíta suðsins, sem drífur kvikulíkanið, hafi rétt gildi. Útreikningar á EDR með því að nota annars vegar gögn um lóðréttan kvikuhraða og hins vegar gögn um hröðun flugvélarinnar eru til þess fallnir að kanna eiginleika reikniáferðarinnar, sem hér er beitt. Hér má einnig bæta inn mæliskekkjum fyrir hröðunarmælingarnar til þess að kanna hver áhrifin eru á metið EDR gildi fyrir mismunandi langan reiknitíma. Að lokum má móta kvikuhraðann með lágtíðni til að mynda óstaðnað ferli og kanna betur hve vel EDR matsgildin endurspeglar styrkleika kvikunnar á afmörkuðum svæðum. Jafnframt verður afar gagnlegt að geta metið svörun við aðstæðum á mælingardegi með því að nota annaðhvort mældan kvikuhraða eða með því að framleiða slík gögn með því að nota EDR gögn til að framleiða slík gögn með hermun. Enn er þörf á að gera frekari rannsóknir í þessu skyni.

5 Skipulag mæliferða með tilliti til veðurskilyrða, flugferla og flugtækni-legra þátta

5.1 Mælisvæði

Við áætlum miðpunkt fyrir Hvassahraunsflugvöll 64.01N, -22.11W, og teljum eðlilegt að mælisvið kvikumælinga liggi í meginatriðum innan við 10 km frá þeim punkti en þar ættu fráflug og aðflug sér stað. Hæð ætti að vera frá jörðu (amk ef mælt er nálægt miðpunkti flugvallar) og upp í 2500 ft. Innan 10 km radíus nær land hæst í um 300 m (1000 ft) í Keili, en einnig eru fjallstoppar í suðausturhluta svæðisins upp í 270 m. Vallarstæðið sjálft er í 40 – 50 m hæð; síðan hækkar land smásaman til suðausturs. Ætla má að flug með áherslu á fjórar megin flughæðir (lágt, 800 ft, 1600 ft og 2400 ft ASL) dugi vel til að spanna svæðið. Flugmanni er ætlað að halda láréttri nefstefnu (*e. attitude*) sem jafnastri og styðja þannig við dýfulíkanið (*e. the plunge model*). Ef hann hrekst mikið úr valdri hæð má hann taka góðan tíma (utan lægra gildis bandhleypi síunnar, 0.1 Hz) til að leiðrétta hæðina. Æskilegt er að fljúga þéttast í útjaðri svæðisins, strjálri ferla innan svæðisins; svo má spanna meira með brúun (*e. interpolation*) í eftirvinnslu. Best er að flogið sé eftir sem lengstum beinum leggjum og forðast þannig hugsanlegar skekkjur sem gætu komið vegna beygja, en lóðrétt hröðun hækkar í kröppum beygjum. Eftirvinnslu gagna er þannig háttad að ekki er nauðsynlegt að flugmaður haldi jöfnu bila milli ferla, en samt er æskilegt að spanna sem mest af svæðinu í hverri mæliferð.

Veðurfar hefur ráðið því að á suðvestur horni Íslands er algengt að ein brautarstefnan sé 13 til 15, og ekki er ólíklegt að það verði einnig í Hvassahrauni ef þar verður byggður flugvöllur. Ef miðað er við kannanir á aðstæðum í kringum Kapelluhraun (1970) má gera ráð fyrir að uppsprettu flugkviku í austan til sunnanáttum sé að finna í fjöllumunum sunnan og austan við flugvallarstæðið og mun það móta mælingasvæðin amk í upphafi. Áherslur í mælingum munu taka mið af þessu.

Hvassahraun er að mestu innan flugsvæðis (Miðsvæði) sem flugturn í Reykjavík getur takmarkað umferð um. Því er nauðsynlegt að mæliflug fari fram í samráði við flugstjórn.

5.2 Æskileg veðurskilyrði á mælingardegi

Til að mæla aukna flugkviku (þ.e. að búast megi við hækkun á EDR) er miðað við að meðalvindur á jörðu (t.d. á Reykjavíkurflogvelli) nálgist 10 m/s þegar farið er til mælinga. Þann 23. ágúst 2021 var mælt (meðalvindur í mastri 7.5 – 12.5 m/s hækkandi með hæð), og þá mældist EDR í svæðinu allt að $0.38 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ sem er nærri hámarki þess sem mæliflugvélin (eða flugmaðurinn) þola með góðu móti. Þar sem flogið er sjónflug er að auki nauðsynlegt að skyggni sé gott í svæðinu. Þá er einnig nauðsynlegt að á brottfarar- og komuflogvelli mæliflugvélarinnar sé veðurlag þannig að fyllsta flugöryggis sé gætt.

6 Söfnun og úrvinnsla gagna

6.1 Gagnasafn úr mæliflugferðum

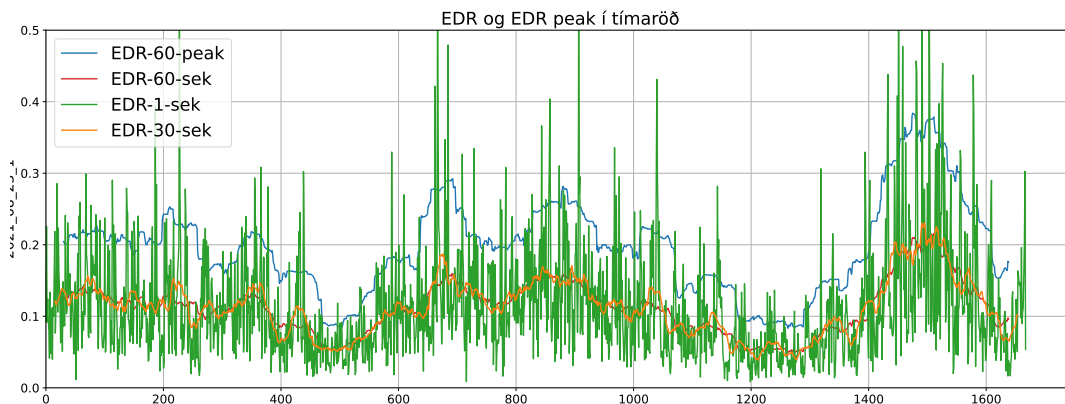
Að ofan er lýst aðferðafræði við að safna mæligögnum. Mæligögnin (oft yfir 100 MB) eru geymd á minnskorti mælitölvunnar og færð yfir í Python umhverfi á annarri tölvu til frekari vinnslu, eins og lýst er í kafla 2 að ofan. Eins og fram hefur komið er megin tilgangur mælinganna að fá staðbundið staðalfrávik í lóðréttri hröðun mæliflugvélarinnar sem síðan er notað til að reikna EDR samkvæmt jöfnu (1). Þar sem fjöldi mæliferða hefur verið farinn sem bæði hafa heppnast vel og illa, er komin töluverð reynsla á hvað getur farið úrskeiðis í mælingum, og þá hvaða greiningatól (í forritum og myndrænni framsetningu) geta dregið fram slíka galla. Núverandi reynsla og bættur undirbúningur tryggir oftast að niðurstöður séu áreiðanlegar, og fljótlega eftir mæliferð er ljóst hvort vel eða illa hefur tekist til. Lokapunktur í því er að fá álit flugmannsins á því hvort niðurstöður séu í samræmi við hans upplifun í fluginu. Þegar þessu er lokið liggur fyrir útreiknað EDR.

6.2 Mat á nákvæmni á meðalgildi EDR fyrir eina sekúndu

Nákvæmni er metin eftir jöfnu (1). Þar koma inn mældu stærðirnar; staðalfrávik lóðréttrar hröðunar og flughraði, auk I sem er útreiknaður stuðull frá líkani, en byggir á þyngd flugvélarinnar og flughraða hennar. Þyngd er metin með nákvæmni uppá 10 kg (af 500 kg í heild). Ef flughraði er ekki mældur beint má gera ráð fyrir að hann sé með nákvæmni 2 m/s (af 40 m/s), en nákvæmari (um 0.5 m/s) ef pitot flughraðamælir er notaður. Staðalfrávikkið er metið frá 200 mælingum (1 sek) af síuðum gögnum og er því mjög nákvæmt. Ráðandi verður matið á nákvæmni flughraðans sem er um 2/40 eða 0.05. Samantekið bendir þetta til að skekkja í sekúndu gildi EDR sé innan við 5%. Í niðurstöðum eru sett fram ýmis meðalgildi af metnu EDR (3 s, 30 s, 60 s og 60 s „peak“), þeirra nákvæmni er betri en af einstöku 1 sek EDR gildi. Staðsetningar í svæðinu koma frá GPS mælingum sem eru nákvæmar upp á nokkra metra, en þar sem niðurstöður eru settar fram í sekúndu takti, og flugvélin færir um 40 m á einni sekúndu, er þessi nákvæmni nægileg.

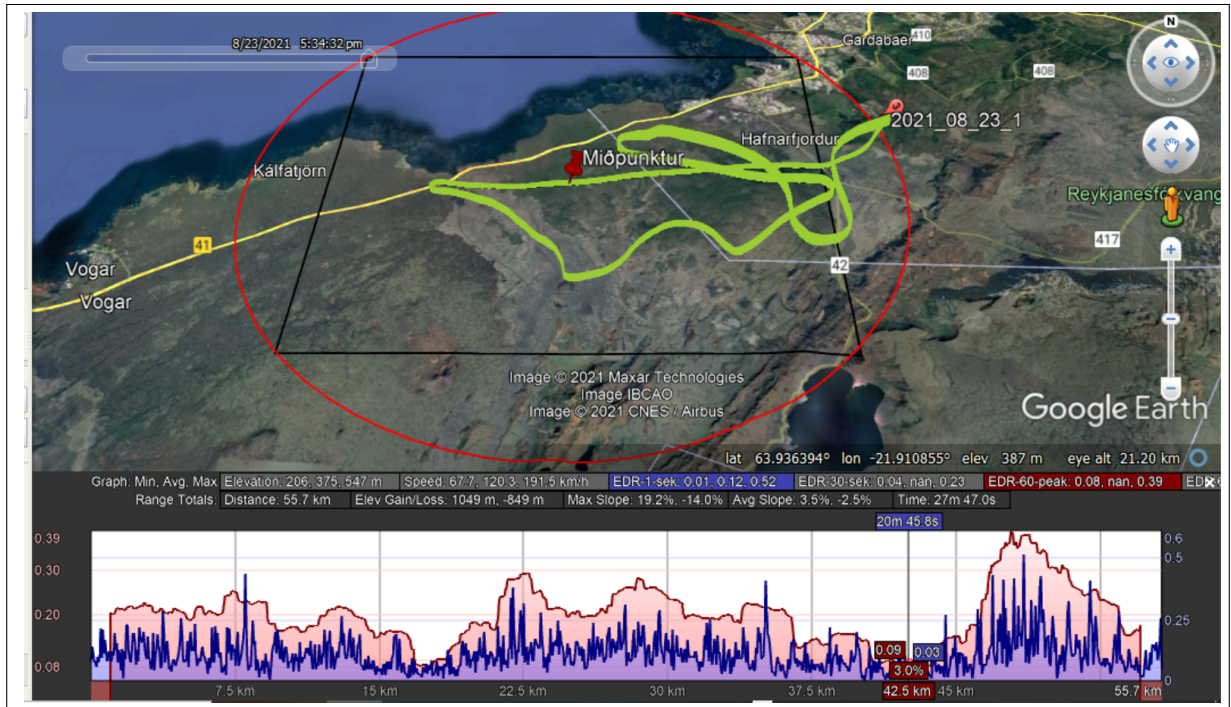
6.3 Framsetning EDR niðurstaðna

Staðalfrávik lóðréttrar hröðunar er reiknað á sekúndu fresti frá 200 gildum yfir 1 sekúndu, og sett í takt við GPS mælingarnar sem einnig eru á sekúndu fresti. Nú er EDR reiknað með jöfnu (1), einnig á sekúndu fresti og er því tengjanlegt við stað (lengd, breidd og hæð) og stund með GPS merkinu. I er þá reiknað með staðgöngu fallinu sem er útskýrður í viðauka 8.4. Í [1] er EDR „peak“ skilgreint sem gildið sem einungis 10 prósent líkur eru á að augnabliks gildi fari yfir. Ef gefið er að EDR sekúndu gildi sé normaldreift yfir mínútuna er þetta gildi meðaltal EDR + staðalfrávik EDR sinnum 1.29 eða $\mu_{EDR} + 1.29\sigma_{EDR}$. Í framhaldi af þessu liggur beint við að setja fram tímaröð með EDR, meðaltal EDR yfir 30 s, meðaltal EDR yfir 60 s og peak EDR yfir 60 s. Á 60 s flýgur mælivélin yfir 2 km, og því er 60 s meðaltal nokkuð gróft fyrir svona tiltölulega lítið svæði. T.d. 20 s meðaltal og peak gefur meiri upplausn. Þetta verður skoðað áfram. En hér er sem dæmi, graf frá 23. ágúst 2021. Á mynd 6 má sjá dæmi um öll þessi mismunandi EDR gildi.



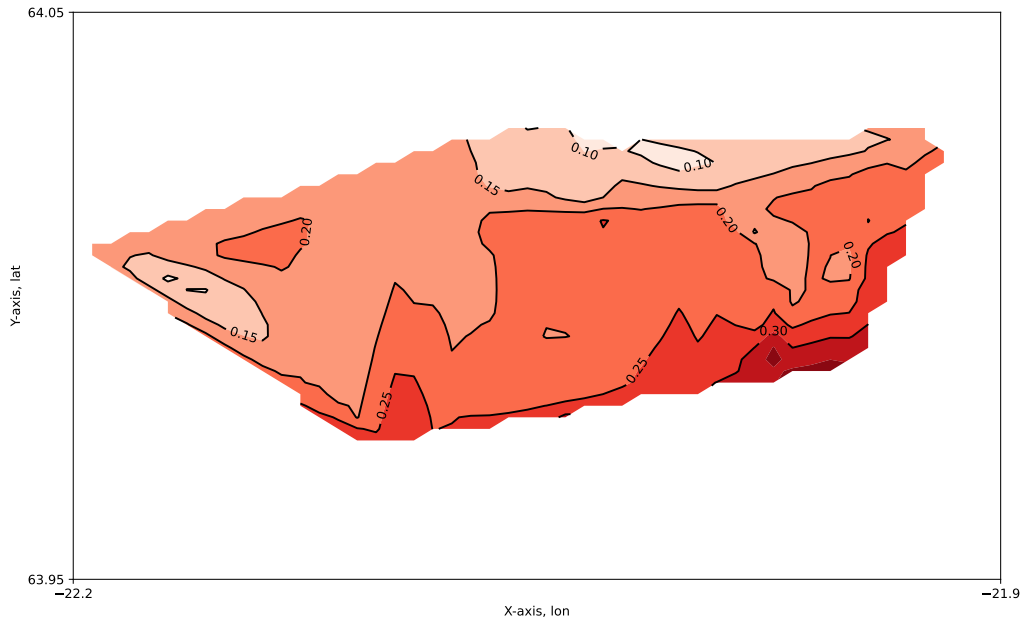
Mynd 6: Hér má sjá mismunandi EDR reikninga.

Ein leið til að staðsetja EDR niðurstöðurnar landfræðilega er með aðstoð Google Earth. Með því að velja flípann „Edit/Show Elevation Profile“ má skoða gögnin og tengsl þeirra við staðsetningu mjög auðveldlega. Á mynd 7 má sjá dæmi um slíka mynd í Google Earth.



Mynd 7: Hér má sjá skjáskot úr Google Earth sem sýnir grænan flugferil sem sýnir staðsetningu í rúmi og tíma. Áætluð flugvallarmiðja er merkt inn ásamt 10 km hring þar utan um. Neðst á myndinni má svo sjá tvö gröf af gögnum sem fylgja staðsetningarhnitunum. Þarna má sjá 60 s peak meðaltal (rautt) ásamt 1 s meðaltal (blátt). Þetta er frá flugi þann 23. ágúst 2021.

EDR í svæðinu má reikna yfir í EDR hæðarlínur og teikna upp. Á mynd 8 má sjá hæðarlínurit byggt á peak EDR sem dæmi. Hægt væri að framkalla sambærilegar myndir eftir hvert flug. Jafnvel gera sambærilega mynd nema með hæð á t.d. y -ásnum til þess að sýna tengingu EDR við hæð.



Mynd 8: Hæðarlínurit á staðsetningargrafi sem sýnir EDR gildi sem hæðarlínur. Þetta er frá flugi þann 23. ágúst 2021.

6.4 Samanburður við mælingar með öðrum búnaði á svæðinu

Á mælisvæðinu er mastrið sem hefur við minnst á áður ásamt Lidar sem verður beitt á nokkrum stöðum í svæðinu og hægt er að beina í ýmsar áttir. Eftir því sem mælingum fleytir fram má skoða samræmi á milli þessara þriggja leiða til mælinga. Sem dæmi um samanburð má nefna mælingar 25.05.21 þegar flug gaf EDR [$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$] hámeðalgildi og toppgildi (peak) sem 0.25 og 0.45. Á sama tíma gaf mastrið (30 m hæð) samsvarandi 0.30 og 0.45. Aftur var mælt 23.08.21 og gaf flug 0.25 og 0.38 en mastrið 0.28 og 0.32. Þannig má sjá að EDR flugs og masturs eru af sömu stærðargráðu. Æskilegt væri að finna fylgnisamband milli símælinga mastursins og EDR sem Lidar eða flugvél mæla um svæðið. En einnig er mögulegt að nota þurfi nákvæmt (með þetta reiknimöskva) veðurlíkan sem kvarðað væri með EDR mælingunum, og gæti þannig nýtt mælingar í mastri til að spá fyrir um EDR í svæðinu.

7 Rannsóknarverkefni

Loftkvikumælingar, sem fjallað er um í þessari skýrslu, gefa tilefni til margvíslegra rannsóknarverkefna, sem beinast að því að nýta betur þá möguleika, sem hin nýja mælitækni veitir til að mæla áhrif kvikunnar á loftför. Framfarir á sviði hreyfingarmælinga með örsmáum skynjurum tengdum öflugum örtölvubúnaði og GPS staðsetningarkerfinu, gera kleift að mæla nánast allar hreyfingar í lofti eða af mikilli nákvæmni og hárrí bandvídd. Hér verður minnst á nokkur rannsóknarefni, sem koma til greina í þessu sambandi.

7.1 Nýjar aðferðir til að mæla eiginleika loftkvikunnar í lofti

Allar aðferðir, sem beitt er til að lýsa loftkviku á meginlegan hátt byggjast á því að nota viðurkennd slembilíkön til að lýsa eiginleikum kvikunnar, þ.e. breytingum í vindhraða, sem valda því að óreglubundnir kraftar verka á loftför. Þessi reiknilíkön, sem notuð hafa verið notuð um langt skeið til þess að mæla og túlka áhrif loftkviku hafa verið þaulprófuð og nýtt við hönnun flugvéla. Af mælitæknilegum ástæðum hefur áhersla verið lögð á hröðunarmælingar, sem er tiltölulega auðvelt að framkvæma en kallar á að svörun viðkomandi flugvélar sé vel þekkt. Með ahlíða mælingum á hreyfiástandi loftfara er hugsanlegt að reikna eiginleika kvikunnar með mun meiri nákvæmni en unnt hefur verið til þessa. Próa þarf frekar þær reikniáðferðir, sem nota mætti í þessu skyni, t.d. svonefnda Kalaman síun og aðrar tölfræðilegar aðferðir.

7.2 Notkun ómannaðra flugvéla og dróna

Drónar, með og án vængja, eru afar áhugaverð faratæki til að gera hvers konar mælingar á flugi. Þetta á ekki hvað síst við þegar um er að ræða kviku. Pixhawk 4 Mini mælibúnaðurinn er sérhannaður fyrir til þess að stjórna þryludrónum og getur því verið hluti af grunnkerfi slíkra loftfara jafnframt því að gegna hlutverki mælikerfis fyrir hreyfiástand drónans. Jafnvel þótt aðskilinn mælibúnaður sé hluti af arðhleðslu drónans veldur slíkt engum vandkvæðum vegna þess að massi og rúmtak þessa búnaðar er hverfandi. Spurningin er hvernig hægt sé að mæla þætti kvikuvindsins t.d. með því að mæla þá krafta, sem þarf að beita til þess að halda drónanum kyrrstæðum eða í þekktu hreyfiástandi þrátt fyrir loftkvikuna. Aðrar leiðir til að draga fram eiginleika kvikunnar kunna að vera til staðar hafandi í huga að til að reikna og meta EDR er verið að sækjast eftir tölfræðilegum styrkleika kvikunnar en ekki eftir kvikuhraðanum sem slíkem. Drónar með föstum vængjum eru hins vegar í meginatriðum eins og flugvélar og því eðlilegt að beita þeim aðferðum, sem hafa verið þróaðar fyrir slíkar vélar.

7.3 Notkun snjallsíma við mælingar

Eins og fram kemur í kafla 2 hefur þegar verið þróað app fyrir snjallsíma, sem byggist á innbyggðum MEMS nemum símans til að mæla hröðun og hornhraða þess farartækis, sem síminn er staddur í hverju sinni. Þetta opnar möguleika á viðtækri gagnasöfnun um ókyrrð í flugi aðila, sem fljúga á eigin vegum flugvélum og jafnvel flugfarþegum, sem vildu taka þátt í slíkri gagnasöfnun. Skipulagning og prófun á slíkri gagnasöfnun væri verðugt rannsóknarverkefni, þar sem kannaðir yrði hvaða gagn mætti hafa af slíkum mælingum, þar sem almennt væri ekki endilega unnt að reikna út EDR mælikvarða. Hinsvegar kynni að vera mögulegt að fá gögn frá svæðum, þar sem ekki væri hægt um vik að senda mælingarflugvél á vettvang. Í þessu sambandi væri vafalaust mikilvægt að gera sér grein fyrir hvernig gögnum yrði safnað í heildar gagnagrunn til að fá meginlega mynd af loftkviku sem víðast á landinu t.d. með því að beita frmsetningu af þeim toga, sem þróuð hefur verið vegna Hvassahraunsverkefnisins.

7.4 Tenging kvikumælinga og spálkana

Ljóst er að loftkvika er oft staðbundin, einkum þegar um er að ræða kviku í lægri flughæðum. Þetta er augljóslega eitt af þeim atriðum, sem skiptir máli, þegar verið er að mæla loftkvikuna yfir flugvallarsvæði, þar sem fjallendi er á næsta leiti við flugvöllinn og vindátt og vindhraði geta haft mikil áhrif á kvikustigið. Við slíkar kringumstæður, þar sem verið er að mæla kvikuna annars vegar með flugvél í misminandi flughæðum og hins vegar með mælum á föstum stöðum á grundinni skiptir miklu máli að hægt sé að tengja saman mælingar, sem teknar eru með mismunandi aðferðum og möguleikum til mælinga bæði í tíma og rúmi. Þá er ljóst að spár, sem gerðar eru með tölvustraumlíkönum, geta verið afar mikilvægur þáttur í að segja fyrir um og skýra fyrirbrigði, sem geta skipt máli vegna flugöryggis. Staðfesting á getu og hæfni spálkana skipta miklu máli og geta mælingar í lofti, með mælimöstrum og með lidarbúnaði skipt miklu máli til að sannreyna getu slíkra reiknilíkana. Rannsóknarverkefni, sem hefði að meginmarkmiði að tengja saman mælingarnar yfir og í Hvassahrauni við spálíkön væri verðugt innlegg í að skilja betur loftkvikueiginleika á flugvöllum landsins og til þess fallið að safna saman á skipulegan hátt upplýsingum þar

að lútandi með vísindalegum aðferðum. Hér gæti því vel verið um að ræða að efna til doktorsverkefnis í loftdeðlisfræði eða veðurfræði.

8 Niðurstöður

8.1 Mælibúnaður á grunni PX4 drónastýrikerfis hefur verið þróaður og prófaður

Skynjarar PX4 gagnasöfnunarkerfisins byggja á Micro Electro-Mechanical System (MEMS) tækni og skila hröðun eftir þremur ásum auk hornhraða mælisins um þessa þrjá ása. GPS búnaður, sem tengist PX4 tryggir að nákvæm staðsetning og alheimstími (UTC) er til staðar fyrir hverja mælingu og er skráð með hröðunarmæligildunum. Prófanir á Pixhawk 4 mini búnaðinum, með tilheyrandi aðlögun að kvikumælingarverkefninu, hafa verið gerðar bæði á tilraunastofu og í flugi með góðum árangri, sem hafi staðfest nákvæmni og áreiðanleika búnaðarins.

PX4 uppsetningar eru ódýrar og öruggar, og hefur verkefnið komið sér upp fjórum mælum sem má, ef þurfa þykir, fljúga með samtímis í fjórum flugvélum í svæðinu.

8.2 Frumniðurstöður lofa góðu

Nokkrar mæliferðir hafa verið farnar sem skila útreiknuðu EDR og hafa niðurstöður verið í samræmi við bæði upplifun flugmanna og mælingar annarra í svæðinu. Unnið er úr gögnum eftir flug í opnu Python umhverfi þar sem aðgengi er gott að forritabútum sem taka má saman til að fullvinna gögnin. Eftir flug liggja fyrir EDR upplýsingar (meðaltöl og hágildi) vítt og breitt um mælisvæðið. Settar hafa verið fram EDR tímaraðir, Google Earth gröf sem gefa kost á gagnvirkri skoðun gagna, svo og EDR hæðarlínurit fyrir svæðið. Niðurstöðurnar sem hafa verið settar fram á nýjan, myndrænan hátt, lofa góðu um að hægt verði að mynda heildarsýn af loftkvikueiginleikum Hvassahraunssvæðisins úr skipulögðum mælingalotum á komandi misserum.

8.3 Fræðilegur grunnur fyrir úrvinnslu flugmælinga á loftkviku

Fyrir liggur að mat á styrkleika loftkviku vegna flugöryggis byggist á traustum grunni með áherslu á svonefndan EDR matsstika í samræmi við skilgreiningu Alþjóða veðurstofnunarinnar (IMO) og Alþjóða flugmálastofnunarinnar (ICAO).

Hröðunarmælingar eftir lóðréttum ás byggja á mikilli reynslu á slíkum mælingum í öðrum löndum þar sem slíkar rannsóknir hafa verið gerðar lengi á flugi gegnum loftkviku. Niðurstöður viðurkenndra rannsóknaraðila hafa verið lagðar til grundvallar í vali á mælingaraðferðum, sem gera kleift að aðskilja eignileika loftkvikunnar og viðbragðseiginleika mælingarflugvélar.

Auk aðferðar til úrvinnslu mælinganna hafa verið skilgreindar aðferðir til að meta áhrif loftkvikunnar á mismunandi gerðir flugvéla. Í þessu skyni hafa verið þróuð og aðlöguð reiknilíkön, sem lýsa eiginleikum kvikunnar annars vegar og mæliflugvélarinnar hins vegar.

Lögð hefur verið áhersla á að geta spáð fyrir um hvernig mismunandi gerðir flugvéla bregðast við samskonar loftkviku.

Tekist hefur að fara yfir og grannskoða þær aðferðir og rannsóknir, sem beitt hefur verið við flugmælingar og mat á loftkviku á undanförunum áratugum. Staðgóð yfirsýn liggur því fyrir á þessu sviði, sem vænst er að komi skýrt fram í efni þessarar skýrslu um forverkefnið.

8.4 Lokaorð

Lokaniðurstaðan er sú að ekkert sé því til fyrirstöðu, hvorki frá tæknilegu eða fræðilegu sjónarmiði, að hefja reglubundnar flugmælingar og rannsóknir á loftkviku yfir Hvassahrauni, eins og fram kemur í rammasamningi aðila frá 31. desember 2020.

Heimildir

- [1] *Guide to Instruments and Methods of Observation*. Bd. III. World Meteorological Organization (WMO), 2018. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9872.
- [2] *Aviation Turbulence*. Springer, 2016. ISBN: 978-3-319-23630-8. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
- [3] Pixhawk. *The power of Pixhawk 4 in a compact form*. Ágú. 2018. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/d/3/7/4/3/pixhawk4mini_technical_data_sheet.pdf.
- [4] Ragnheiður E. Garðarsdóttir og Sæmundur E. Þorsteinsson. „Lýðvistun mælinga á ókyrrð í flugi“. Í: (2021). Gefin út af: Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Skýrsla nr. 10. ISSN: 2772-1078:100. Reykjavík.
- [5] R.D. Sharman o.fl. „Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence“. Í: *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY* 53 (2014). Gefin út af: American Meteorological Society, bls. 1416–1432. DOI: DOI:10.1175/JAMC-D-13-0329.1.

Heimildir úr viðaukum

- [6] A.C. de Bruin og H. Haverdings. „Proposal for a method to compute Eddy Dissipation Rate from Flight Data Recorder data“. Í: (apr. 2007). NLR-CR-2007-137. (ATH. innsláttarvilla í jöfnu (19).)
- [7] A.C. de Bruin og H. Haverdings. „Validation of an Eddy Dissipation Rate calculation method, based on Flight Data Recording data“. Í: (des. 2007). NLR-CR-2007-540.
- [8] Hoblit F. *Gust loads on Aircraft: Concept and Applications*. American Institute of Aeronautics og Astronautics. Washington D.C., 1988.
- [9] Zaide A. og Raveh D. „Numerical Simulation and Reduced-Order Modeling of Airfoil Gust Response“. Í: *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 44 (2006).

Viðaukar



Evaluation of EDR Based on Acceleration Measurements

Introduction

The model of air turbulence, commonly used in aviation circles, is the von Karman model which defines the power spectrum of air turbulence. This is expressed as:

$$F_N(k) = \frac{18}{100} \alpha \varepsilon^{2/3} L^{5/3} \frac{[1 + (8/3)L^2 k^2]}{(1 + L^2 k^2)^{11/6}}$$

defined in terms of the wave number k as well as a length scale L , $\alpha = 1.6$ and the square of the Eddy Dissipation Rate, $\varepsilon^{2/3}$. This spectrum, which is one-sided, is depicted for two values of the EDR ($\varepsilon^{1/3}$) in Figure 1, obtained from the reference by Sharman 2014 et al¹, also showing the effect of choosing three different values of the length scale L , i.e. for 500, 1000 and 1500 m. This provides the distribution of the power in spatial terms, i.e. as a function of wave number which has the units of rad/m. This is converted to the frequency domain by application of the Taylor frozen field hypothesis which assumes that an aircraft flying at constant true airspeed along a straight flightpath experiences a time dependent version of this process, which is obtained as a function of frequency by substituting $k = \omega/V$ where V is the true airspeed of the aircraft. The Taylor assumption is based on the premise that temporal changes in the nature of the turbulence take a long time compared with the time taken by the aircraft to traverse the longest wavelength.

¹ R.D. Sharman, L.B. Cornman, T. Farrar et al; **Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence; Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Volume 53, 2014

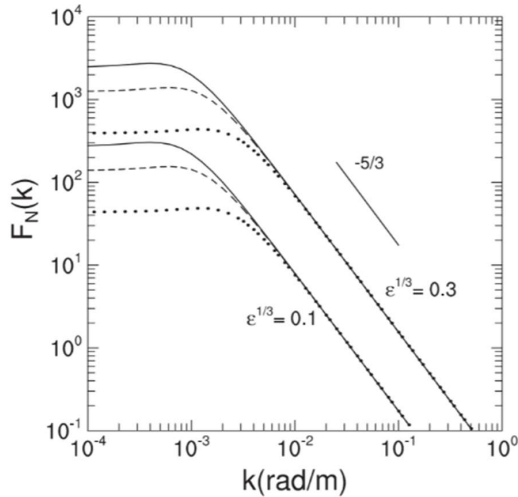


Figure 1. Von Karman power spectrum as a function of wave number for two values of $\epsilon^{1/3}$ og and three values of the length scale L (continuous lines = 1500 m, broken lines = 1000 m and point lines = 500 m). Figure obtained from Sharman reference² .

Although well suited for analytical purposes the von Karman model is not easily used for numerical simulations of the process due to the fact that the power spectral density is irrational. Thus it cannot be used for numerically generating an output signal from a linear shaping filter with white noise input which can be used to drive other system modules or processes. For this reason, rational linear time-invariant system models, approximating the von Karman power spectrum, have been developed. With white noise input these models can be used in a straightforward manner to generate output signals with statistical properties that are very close to those of the von Karman process.

This model is frequently implemented by using the following transfer function:

$$G_{W_g}(s) = \frac{\sigma_w \sqrt{\frac{2L_w}{\pi V}} \left(1 + 2.7478 \frac{2L_w}{V} s + 0.3398 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^2 \right)}{1 + 2.9958 \frac{2L_w}{V} s + 1.9754 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^2 + 0.1539 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^3}$$

Where the output, $w_g(t)$, is the turbulence vertical speed, the input $u(t)$ is unit variance white noise, σ_w is the standard deviation of w_g and V is the true airspeed. L_w can be selected consistent with the value used in the von Karman model. This model will be used for simulation purposes only.

² R.D. Sharman, L.B. Cornman, T. Farrar et al; **Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence; Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Volume 53, 2014

2. Definition of EDR

The most common metric for expressing the intensity of vertical turbulence is the Eddy Dissipation Rate – EDR – which has been defined as *de facto* standard by ICAO and IMO³ for this purpose. This can be computed in general from the vertical acceleration measurements by using the equation:

$$\hat{\sigma}_z^2 = \int_0^{\infty} \Phi_z(f) df = \int_0^{\infty} |H_w^z(f)|^2 \Phi_w(f) df = \epsilon^{2/3} \int_0^{\infty} |H_w^z(f)|^2 \Psi_w(f) df \quad \text{Eq. (1)}$$

where f is frequency in terms of Hz with $\omega = 2\pi \cdot f$ in rad/s

$\hat{\sigma}_z^2 =$ variance of aircraft vertical acceleration

$\epsilon^{2/3} =$ (EDR)²

$|H_w^z(f)|^2 =$ modulus square of the aircraft transfer function in the frequency domain, as a function of frequency f (in Hz), with vertical wind, $w(t)$ being the input and aircraft acceleration, d^2z/dt^2 , the output variable

$\Phi_w(k) = \epsilon^{2/3} \Psi_w(k) =$ vertical wind power spectrum which is originally defined in terms of the wave-number k , a spacial variable, which has the units of rad/m. By applying Taylor's theorem, whereby $k \cdot V = 2\pi f = \omega$, V being the true airspeed of an aircraft, the power spectrum is subsequently converted to that of a frequency spectrum in terms of f or ω .

Thus EDR can be computed by using the expression:

$$\hat{\epsilon}^{1/3} = I^{-1/2} \hat{\sigma}_z \quad \text{Eq. (2)}$$

The assumption is made that a single-sided power spectrum of the wind gust is used which means that only integration over positive frequencies is required.

³ WMO; Guide to Instruments and Methods of Observation_2018

3. Effects of Aircraft Dynamics

The effect of the aircraft dynamics on the measurements is expressed by the integral in Eq. (1) whereby the shape of the turbulence power spectrum is modulated by the transfer function of the aircraft:

$$I = \int_0^{\infty} |H_w^z(\omega)|^2 \Psi_w(\omega) d\omega \quad \text{Eq. (3)}$$

The integral, I , contains the response characteristics of the aircraft in the form of the modulus square of its transfer function with vertical wind gust as the input and aircraft acceleration as the output. This includes all frequencies. The integral can also be interpreted as the variance of the aircraft acceleration for a vertical wind gust for a unit value of EDR, i.e. when $\varepsilon = 1$. However, only a part of the frequency range is being investigated, namely the interval where the power of air turbulence is most prominent. The chosen interval of the frequency spectrum is selected by using a band-pass filter with the appropriate range of frequencies. This is done to exclude the low-frequency responses of the aircraft to inputs other than those caused by air turbulence. Thus, accelerations due to the maneuvering of the aircraft caused by pilot control actions will be minimized as well as the short period phugoid mode of aircraft dynamics. It also excludes high-frequency disturbances due to mechanical vibrations caused by engines and propellers and other sources of error unrelated to wind gusts. When this filter is introduced the variance of the measured acceleration can be expressed as:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_z^2 &= \int_0^{\infty} |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 \varphi_z(\omega) d\omega \\ &= \int_0^{\infty} |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \varphi_w(\omega) d\omega \end{aligned} \quad \text{Eq. (4)}$$

where H_{bp} represents the transfer function of the band-pass filter. This leads to the definition of an integral which includes the transfer function of the band-pass filter:

$$I_{bp} = \int_0^{\infty} |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \Psi_w(\omega) d\omega \quad \text{Eq. (5)}$$

According to NLR⁴ (reference⁵) the following expression, based on the von Karman/Kolmogorov turbulence spectral models of isotropic turbulence, can be used for the inertial sub-range where the bulk of the energy due to air turbulence is contained:

$$\varphi_w(\mathbf{k}_x) = 0.7\varepsilon^{2/3}k_x^{-5/3} \Rightarrow \boxed{\varphi_w(\omega) = 0.7V^{2/3}\varepsilon^{2/3}\omega^{-5/3}} \quad \text{Eq. (6)}$$

Where V is the true air speed (TAS) of the aircraft which is assumed to be constant over the time period of interest and $\mathbf{k}_x = \omega/V$.

Thus:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_z^2 &= \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 \varphi_z(\omega) d\omega = \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \varphi_w(\omega) d\omega \\ &= 0.7V^{2/3}\varepsilon^{2/3} \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \omega^{-5/3} d\omega \\ &= 0.7V^{2/3}\varepsilon^{2/3} I(\omega_1, \omega_2) \end{aligned} \quad \text{Eq. (7)}$$

resulting in the following expression:

$$\text{EDR} = \varepsilon^{1/3} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_z^2}{0.7V^{2/3}I}} \quad \text{Eq. (8)}$$

By using this form of the spectrum, i.e. the high-frequency asymptote, the following expression can also be derived for EDR in terms of the standard deviation of the vertical disturbance wind (gust) as expressed in ⁶:

$$\varepsilon^{1/3} = \frac{\hat{\sigma}_w}{\sqrt{1.05V_a^{2/3}(\omega_1^{-2/3} - \omega_2^{-2/3})}} \quad \text{Eq. (9)}$$

Where V is the true airspeed (TAS) and ω_1 and ω_2 represent the lower and upper frequencies respectively of the band-pass data filter for the accelerometer data used for the calculation of the

⁴ A.C. de Bruin and H. Haverdings, **Proposal for a Method to Compute Eddy Dissipation Rate from FDR Data**; NLR_CR_2007-137

⁵ R.D. Sharman, L.B. Cornman, T. Farrar et al; **Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence**; *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 53, 2014

⁶ A.C. de Bruin and H. Haverdings, **Validation of an Eddy Dissipation Rate calculation method, based on Flight Data Recording data**; NLR_CR_2007-540

EDR metric. A lower limit of 0.1 Hz and an upper limit of 2.0 Hz are considered to be acceptable values for this purpose for a light aircraft.

4. Methods of data processing

The primary data collected by the measurement system comprises the acceleration components along the three body axes of the aircraft as well as the angular rates of the aircraft about these axes as provided by the Inertial Measurement Unit (IMU). This provides data at a rate of 200 Hz for all inertial sensors. The measurement system also contains a GPS receiver, in addition to the core IMU sensors, which provides accurate position and time fixes at a rate of 5 Hz. The inertial data will be collected at the rate of 10 Hz in order to ensure that the Nyquist criterion for an acceleration data rate of 5 Hz is satisfied.

Computation of EDR

Computing the EDR value boils down to using Eq. (8) to compute this important metric of turbulence intensity. The influence of the aircraft dynamics is taken into account by evaluation of the I integral which represents the effect of the aircraft on a standard gust process defined by its power spectral density. Eq. (2) does not specify which model of the turbulence gust velocity should be used, i.e. it does not assume any specific power spectral density function. In fact either the von Karman or the Kolmogorov models can be used for the purpose of evaluating the integral for the EDR calculation. Eq. (8), which is based on the asymptotic part of the turbulence spectrum, is used to evaluate the intensity of the turbulence in terms of EDR. However, the von Karman model provides a full frequency spectrum which can be used to evaluate the total effect on the aircraft once the EDR is known. .

The expression of EDR as defined by Eq. (9) involves the direct estimation of the vertical wind component's standard deviation σ_w . This means that the difficulties in the derivation of a transfer function model for the aircraft are alleviated by using a two-dimensional model of its longitudinal dynamics. or by direct measurements of the vertical wind component. This approach involves making measurements of angle-of-attack or dynamic air pressure based on multiple pitot sensors or variometers. The use of a Kalman filter to process this data may also be useful for producing accurate estimates of the vertical wind velocity as well as its standard deviation as required by Eq. (9). A number of other measurements could also potentially be used to augment and improve the performance of the basic Kalman filter. These include the vertical velocity and displacement of the aircraft from the nominal profile which could be obtained from the GPS receiver. Thus, an optimal estimate of the vertical wind component, $w_g(t)$, as well as a running estimate of its standard deviation would be provided by the KF for the estimate of the EDR as expressed by Eq. (9).

Measurement Frequency Range

The variance of the accelerations experienced by an aircraft in response to the vertical turbulence is expressed in terms of the integral of the power spectrum of vertical accelerations. This includes the entire range of relevant frequencies, i.e. frequencies that the aircraft can be expected to respond to. For a light aircraft such as the Savannah this can be expected to be on the order of 30 rad/sek or about 5 Hz. Experience gained in this project has shown that for a small aircraft most mechanical vibrations, including engine and propeller induced disturbances, occur at higher frequencies that can be eliminated by digital filtering of signals above 10-20 Hz. For larger aircraft the response to air turbulence will be at significantly lower frequency, in many instances less than 1 Hz. At the lower end of the spectrum all aircraft can be expected to more or less follow the vertical motion of the air mass whatever its origin, be it due to large scale up- or downdrafts, accelerations introduced by aircraft maneuvers or due to natural short-period response modes (phugoid oscillations) of the aircraft. In most instances the lower bound will be chosen above the phugoid mode of oscillations in the 0.1 – 0.2 Hz interval. Thus, the range of measurements of air turbulence can be expected to be within the interval of 0.1 – 5.0 Hz.

The question arises as to what frequency range should be selected for sampling acceleration data for the purpose of estimating the EDR value, i.e. the intensity of the air turbulence at any given time. An important issue in this context is to choose the range of frequencies that is least “contaminated” by accelerations that are not caused by turbulence. Thus, the focus is on a clean part of the spectrum where most of the energy due to the turbulence is contained. This can be seen from Figure 1 below that show the power spectrum of the acceleration of the Savannah measurement aircraft as a function of frequency in terms of rad/s for turbulence intensity of $\epsilon = 1$. Figure 1 a) shows the value of the integral as being $43.7 \text{ m}^2/\text{s}^4$ when the interval from 0.1-2.0 Hz is chosen whereas b) shows this value as being $47.9 \text{ m}^2/\text{s}^4$ if the upper frequency is chosen as 5.0 Hz. Thus, the increase in upper limit of the frequency interval from 2.0 to 5.0 Hz only contributes 10% increase in signal strength. On the other hand, if the noise in the measurement data is evenly distributed over the frequency interval its power would possibly be increased by over 100%. For this reason, it was decided to use 2.0 Hz as the upper frequency of the measurement interval. Considering the fact, that little signal energy is contained at the lower end of the spectrum this is not contributing much to the estimate. It is also clear from experience that the effect of maneuvers must be eliminated from the data, probably mostly by selecting the measurement data taken on straight and level flight paths that do not involve changes of this type. As the choice of the lower frequency appears not to be critical 0.1 Hz will be used. This is also consistent with the remaining part of the high-frequency asymptote of the von Karman spectral model which does not include any of the effects of the reference wavelengths that shape the low frequency spectrum.

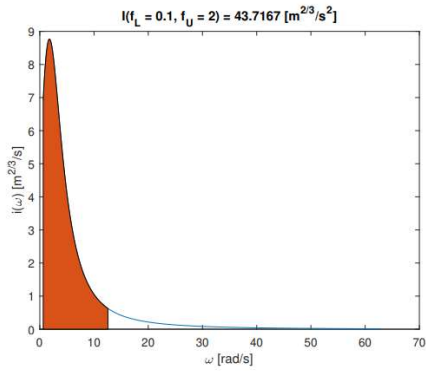


Fig. 2. Integral expression, $[0.7 * V^{2/3} * I(\omega_1, \omega_2)]$, for the frequency interval [0.1-2] Hz.

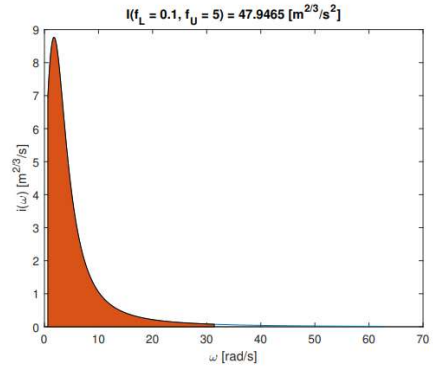


Fig. 3. Integral expression, $[0.7 * V^{2/3} * I(\omega_1, \omega_2)]$, for the frequency interval [0.1-5] Hz.



Aircraft Response to Vertical Air Turbulence

This appendix describes how a single-degree of freedom model can be used for describing the vertical motion of an aircraft used for collecting acceleration measurements in turbulent air. This is required for carrying out the computations described in Appendix A for processing the measurement data in order to determine the value of the EDR and other measures of the air turbulence that generate the accelerations. Models of this type are also essential for understanding the response characteristics of aircraft of different types to the aerodynamic forces created by the wind disturbances which is the manifestation of air turbulence. Dynamic models of aircraft response are also essential for simulating the behavior of the aircraft subjected to either simulated or measured turbulence conditions. This will be used for validating and further development of the measurement process and methodology.

System Concept

The equation governing the vertical motion of a rigid aircraft can be written as:

$$M (d^2z/dt^2) = - (\rho/2)V^2SC_{L\alpha} (dz/dt)/V + (\rho/2)V^2SC_{L\alpha} w_g(t)/V \quad \text{Eq.(1)}$$

where

M = mass of airplane

ρ = density of ambient air

$V(t)$ = forward speed (true airspeed)

S = wing area

$w_g(t)$ = vertical gust velocity as a function of time

$z(t)$ = vertical displacement of the airplane

$C_{L\alpha}$ = slope of lift coefficient with angle-of-attack

The first term on the right-hand side of Eq.(1) is the lift force due to the change in angle-of-attack caused by the vertical motion of the aircraft due to turbulence. The second one is the main driving term, i.e. the effect of the vertical wind component of the turbulence, which causes a

primary build-up of lift or reduction thereof on the wing depending on the direction of the wind gust component.

Eq.(1) can now be written as:

$$M(d^2z/dt^2) = - (\rho/2)VSC_{L\alpha} (dz/dt) + (\rho/2)VSC_{L\alpha} w_g(t) \quad \text{Eq.(2)}$$

This result is based on the assumption that the change of the lift force due to a change in angle-of-attack is instantaneous when the aircraft enters a sharp up- or down-draft. However this is not realistic as the wing enters the gust area over a period of time consistent with the airspeed of the aircraft and the chord length of the wing. In addition there is a lag in the change of the circulation of the airflow in the vicinity of the wing profile. These unsteady effects are discussed in ref. (1)¹ which describes how this build-up can be modelled for the two force terms by using the functions of the type shown in Fig 1 a) and b) to modify the lift coefficient upon encountering the gust:

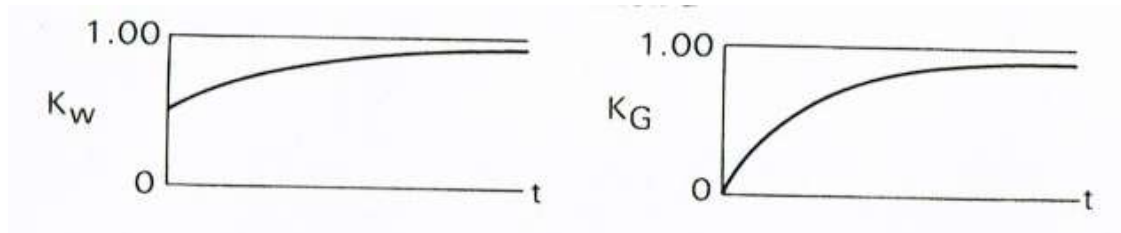


Fig. 1. Lift-growth functions provided by Hoblit (ref. 1) for modifying the build-up of the lift coefficient upon gust encounter

The two lift-growth functions, identified as the Wagner and Küssner functions respectively, describe the build-up of the unsteady aerodynamic lift forces when a sharp gust is encountered. These can be incorporated into the step response of the aircraft for the angle-of-attack changes created by the vertical speed of the aircraft and any wind gust input function due to turbulence. The result is shown in Fig. 4 which provides a transfer function model of the differential equations including the effects of the lift growth dynamics. In this case a first order model is provided for the Küssner and Wagner effects which captures the major impact.

The first of these has been found to build up exponentially with time as shown in Figure 1 b) which depicts the response of a first order system. The other component is the force, shown in Fig. 1 a) is due to own motion of the aircraft. This in turn is made up of two parts, one being an

¹ Hoblit F.; **Gust Loads on Aircraft: Concepts and Applications**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C. 1988.

instantaneous build-up component and the other growing exponentially as shown in Figure 1 a). The parameter α is the ratio between those two components, i.e.:

$$0 < \alpha < 1$$

The value of this parameter is typically chosen as $\alpha = 0.5$.

A robust derivation of the Küssner and Wagner effects are provided in ref.2². These result in second order models that are shown in Fig. 3. two time constants are required for each of these effects which can be computed on the basis of aircraft parameters as provided in Table 1 for two types of aircraft, i.e. the Savannah measurement aircraft and a jet transport of the Boeing 757 type here identified as the \approx B 757.

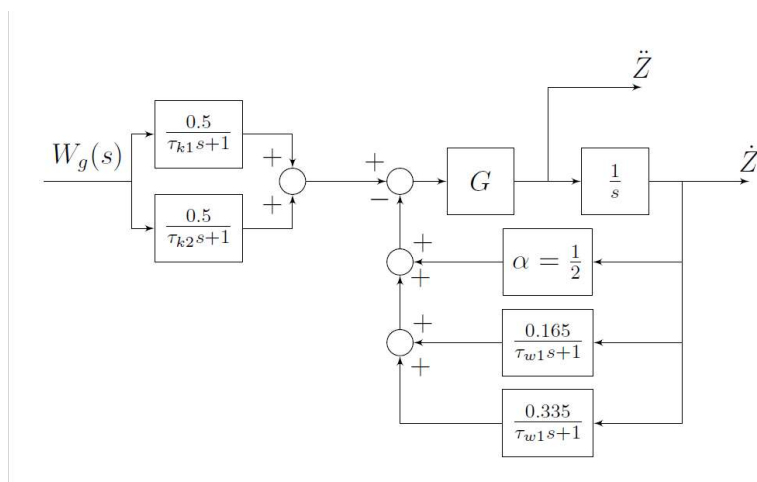


Figure 3. Aircraft model with second order Küssner and Wagner models.

Parameter	Savannah	\approx B 757
Chord Length	1.40 m	5.64 m
τ_{k1}	0.13 s	0.18 s
τ_{k2}	0.02 s	0.02 s
τ_{w1}	0.38 s	0.51 s
τ_{w2}	0.06 s	0.08 s

² Zaide A. and Raveh D.; **Numerical Simulation and Reduced-Order Modeling of Airfoil Gust Response**, AIAA Journal, Vol 44, No. 8, August 2006

Table 1. Time constants of Küssner and Wagner models for Savannah and \approx B 757

An easy way to integrate these properties into the model is to transform the equation of motion by applying the Laplace transformation:

$$s^2 Z(s) + G H_W(s) s Z(s) = G H_K(s) W_g(s) \quad \text{Eq.(3)}$$

where

$$G = (\rho/2) V S C_{L\alpha}/M = (\rho/2) V C_{L\alpha} / (M/S) \quad \text{Eq.(4)}$$

This is a key parameter for describing the characteristics of the aircraft being considered. As it turns out G has the units of (rad/s), i.e. frequency in radians pr. second, which defines the bandwidth of the aircraft in terms of its response to vertical gust winds as defined by the output and input in Fig.(3). This refers to the characteristic of the aircraft to follow the vertical wind gust, to which it is exposed, as will be discussed later. Generally this capability increases with airspeed, V , and goes down with wing loading, M/S , other conditions being equal. Thus, an aircraft with a high wing loading will generally be less responsive to turbulence than a light aircraft with a relatively large wing and consequently low wing loading.

$H_K(s)$ and $H_W(s)$ in Eq.(3) include the Küssner and Wagner effects, respectively which may be of first or second order. This gives:

$$\ddot{Z}(s) = \left[\frac{G \cdot H_K(s) \cdot s}{1 + G \cdot H_W(s) \cdot s} \right] \cdot W_g(s) \quad \text{Eq. (5)}$$

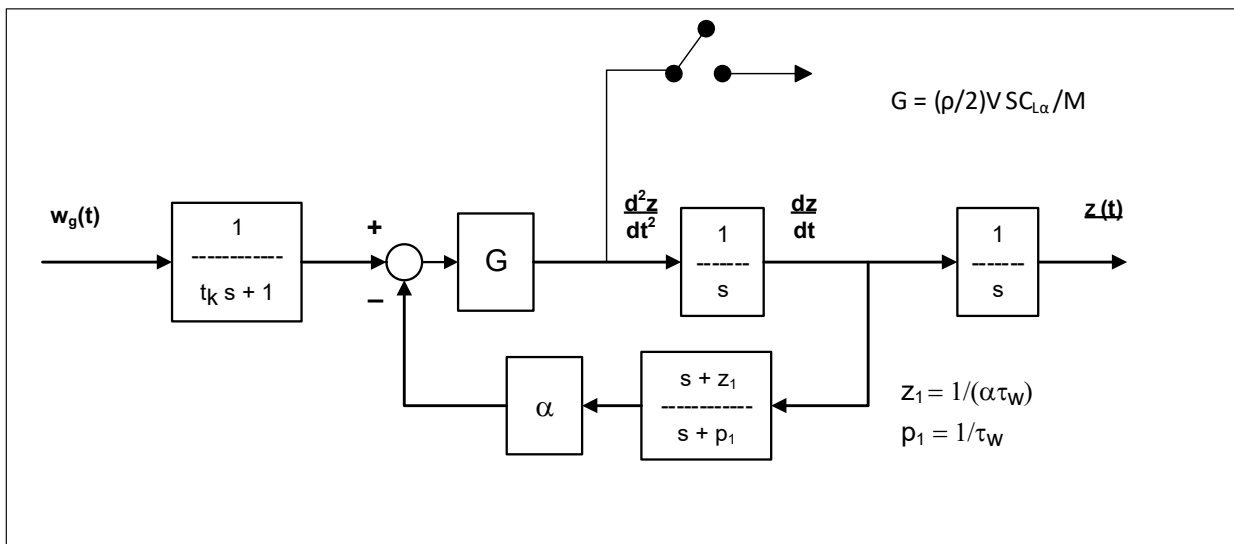


Fig. 4. Block Diagram of Aircraft Response to vertical gusts with first order Küssner and Wagner models.

A full model of the aircraft and the turbulent vertical gust wind driving the aircraft motion is obtained by using the output of the Dryden or approximate von Karman models as inputs to the aircraft model.

The stochastic properties of the vertical wind component, $w_g(t)$, can be approximated by the linear Dryden model which is commonly used for this purpose. The resulting process model, driven by white noise $w(t)$, is shown in Fig. 5.

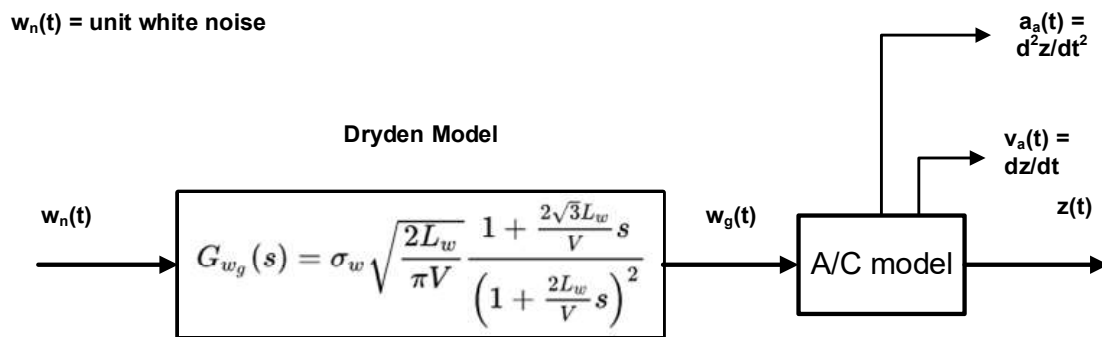


Fig. 5. Dryden Process Model driven by white noise generating input to the aircraft model with scale length L_w and aircraft true airspeed V .

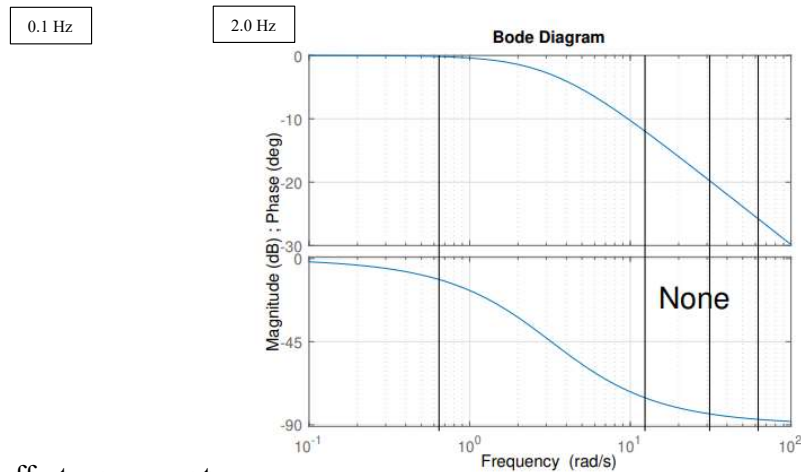
The approximate von Karman model, which is rational and of third degree, is obtained by replacing the transfer function $\tilde{G}_{W_g}(s)$ in Fig. 3 by:

$$G_{W_g}(s) = \frac{\sigma_w \sqrt{\frac{2L_W}{\pi V}} \left(1 + 2.7478 \frac{2L_W}{V} s + 0.3398 \left(\frac{2L_W}{V} s \right)^2 \right)}{1 + 2.9958 \frac{2L_W}{V} s + 1.9754 \left(\frac{2L_W}{V} s \right)^2 + 0.1539 \left(\frac{2L_W}{V} s \right)^3} \quad \text{Eq. (6)}$$

The von Karman model model is preferred in this project as it is most commonly used by the international civil aviation community.

Characteristics of the vertical axis aircraft model

The response of aircraft along the vertical axis as a function of frequency is well defined by the Bode plot of the transfer function relating the vertical velocity of the aircraft to sinusoidal vertical wind speed of the turbulence $w_{5.0 \text{ Hz}}$ results in the deviations of the aircraft profile. Magnitude and phase plots for this transfer function are shown in Fig. 6 where neither Küssner



or Wagner effects are present.

Figure 6. Bode diagrams for transfer function $V(s)/W_g(s)$ of the Savannah aircraft without Küssner and Wagner effects

This plot provides a clear picture of how well the aircraft “follows” the up and down- drafts of the turbulence in terms of speed. Of particular interest is the frequency range from 0.1 – 2.0 Hz where the turbulence energy is likely to be concentrated. Very little turbulence is expected

above 5 Hz according to the von Karman model. The bandwidth frequency of the Savannah is about 3.2 rad/sek which equals about 0.5 Hz where the magnitude of the gain curve drops from the low frequency by about -3 dB. This means that the measurement aircraft “follows” the wind gusts up to a frequency of 0.5 Hz with very little difference in speed or displacement.

By 2.0 Hz the magnitude has dropped to about -12 dB. This corresponds to a gain of about 25%, i.e. a sinusoidal turbulence velocity at this frequency will be attenuated by 75%. In view of the fact that the turbulence intensity goes down fast with higher frequencies it is likely that little is gained by processing data above 2 Hz.

The Küssner effect, which has a delaying effect on the primary build-up of the gust angle-of-attack has a small effect on the bandwidth of the aircraft response as can be seen from Figure 5 where this part of the model is added to the basic model.

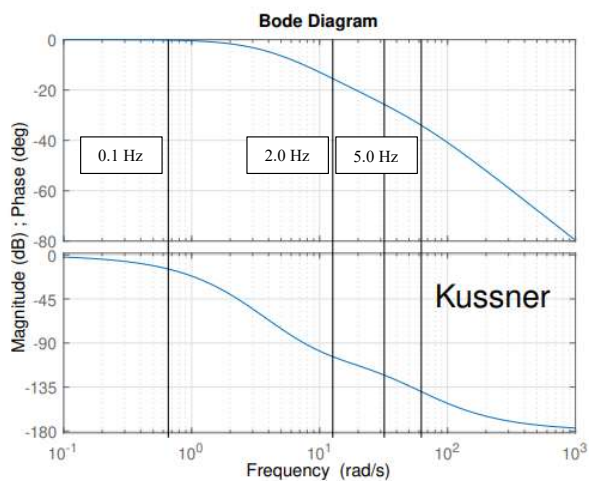


Figure 7. Bode plot for Savannah including the Küssner effect

As can be seen from the magnitude curve of Fig. 7 the gain is reduced slightly by the introduction of the Küssner effect by about -3dB. The basic bandwidth is hardly affected

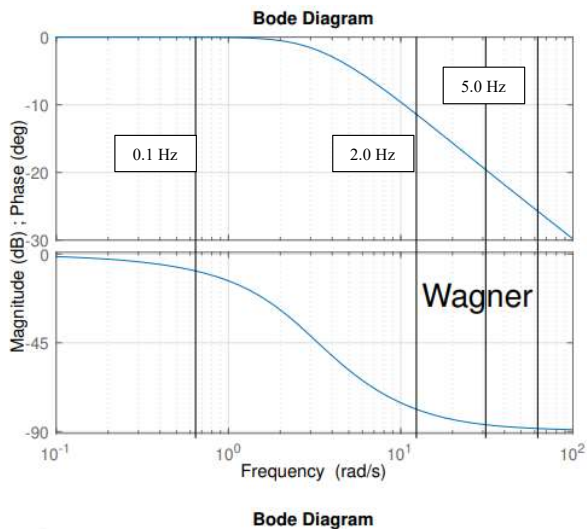


Figure 8. Bode plot for Savannah including the Wagner effect

It is concluded that only the Küssner effect is expected to have some significant effect on the measurements that is collected by the Savannah or for that matter any light aircraft with a low wing loading. Thus it is appropriate to include this effect in the assessment of the measurement aircraft response even if it is small. The K&W effects should also be fully included when evaluating the total impact of air turbulence on any given aircraft. In this case the whole turbulence spectrum is included well beyond the 2 Hz limit..

Response to typical cosine shaped up-draft

An updraft wind gust in the shape of a cosine is often used for determining the response of an aircraft to vertical wind gusts. The vertical wind speed is defined as:

$$w_g(t) = 1 - W_o * \cos(2\pi f * t) \quad \text{Eq. (7)}$$

where W_o is the amplitude in m/s. Figure 8 a) and b) show an example of the response of the Savannah aircraft in terms of vertical speed caused by a 2 m/s wind gust of this type. In Fig 8) the disturbance lasts for

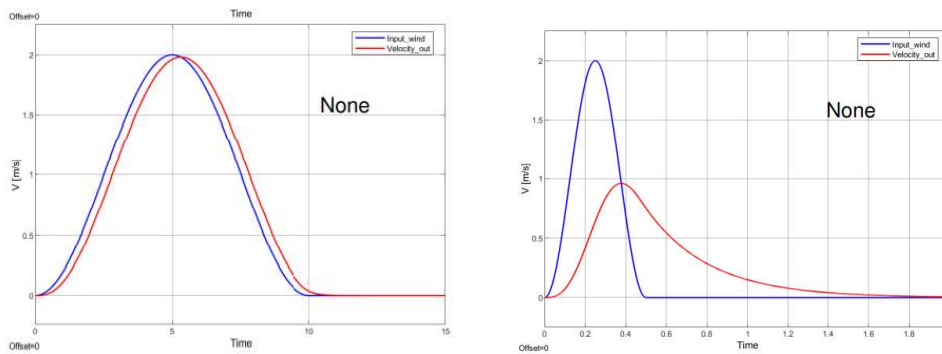


Fig. 8 . Response of Savannah aircraft (40 m/s airspeed) to cosine wind gust;
 a) $f = 0.1$ Hz or 10 sec time period b) $f = 2.0$ Hz or 0.5 sec time period.
 The gust is shown in blue and the aircraft speed response in red.

Clearly the response at the low frequency is almost identical to the gust input whereas the response to the short-term gust input is only about half the amplitude of the input as well as the peak response being delayed by about 60%.

Aircraft response to air turbulence

As discussed in Appendix A there is a need to calculate the effect of the turbulence in the frequency range of acceleration measurements as expressed by the equation:

$$\text{EDR} = \varepsilon^{1/3} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_z^2}{0.7V^{2/3}I}} \quad \text{Eq. (8)}$$

For this purpose it is necessary to numerically calculate the integral defined by the following expression when the value of $\varepsilon = 1$, i.e for a fixed EDR of unity value. It is assumed that the band-pass filter, $H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)$ cuts off perfectly at the upper and lower frequencies.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_z^2 &= \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 \varphi_z(\omega) d\omega = \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \varphi_w(\omega) d\omega \\ &= 0.7 V^{2/3} \varepsilon^{2/3} \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_{zw}(\omega)|^2 \omega^{-5/3} d\omega \\ &= 0.7 V^{2/3} \varepsilon^{2/3} I(\omega_1, \omega_2) \end{aligned}$$

This calculation has been carried out for the Savannah and the \approx B 757 type aircraft resulting in the following values for the quantity $0.7 * V^{2/3} * I(\omega_1, \omega_2)$ as shown in Table 1:

Table 1. Evaluation of expression $[0.7 * V^{2/3} * I(\omega_1, \omega_2)]$

Aircraft type	Frequency interval (Hz)	Value $[m^{2/3}/s^2]$
Savannah	0.1-1.0 Hz	35.2
	0.1-2.0 Hz	43.7
	0.1-5.0 Hz	47.9
	0 -10 Hz	52.1
\approx B 757	0.1-1.0 Hz	14.6
	0.1-2.0 Hz	16.1
	0.1-5.0 Hz	16.8
	0 -10 Hz	21.9

This is graphically shown for frequency interval [0.1-2.0 Hz] in Fig. 9 where the power spectrum is plotted for $\varepsilon = 1$ in linear scales with the integral identified by the red areas. The extension of the upper limit to 5 Hz simply adds to the integrated area as reflected by the small increase in the values shown in Table 1. Similarly, a reduction to 1.0 Hz reduces the values of the integral.

The appropriate value of Table 1 can now be used to calculate the estimated EDR along with the calculated value if the standard deviation of the acceleration measurements by use of Eq. (7).

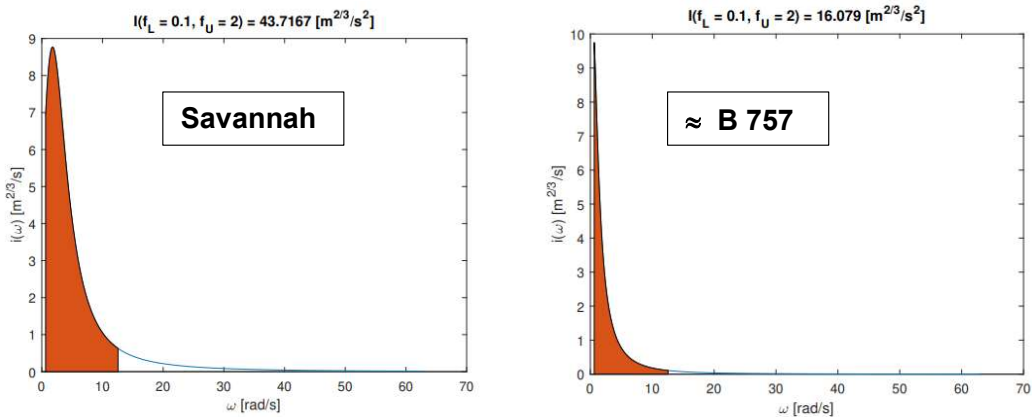


Fig. 9. Integral expression for the Savannah aircraft and a B 757 type aircraft for the frequency interval [0.1 Hz to 2.0 Hz.]

These results are obtained based on the parameters for the two types of aircraft shown in Table 2.

Table 2 Aircraft Model Parameters

A/C Parameter	IPC Savannah	≈ B 757	Units
ρ	1.225	1.225	kg/m ³
V	40	120	m/s
S	12.9	185	m ²
$C_{L\alpha}$	4.6	4.8	1/rad
M	450	75,000	kg
G	3.2	0.87	rad/s

Comparison of two types of aircraft

The question arises as to how the comparison can be made between the two types of aircraft, i.e. the Savannah measurement aircraft on the one hand and the B 757 type of aircraft on the other hand. In order to calculate the total turbulence response of any aircraft, given the power spectrum of the wind gust component, it is necessary to integrate the power spectrum of the output acceleration for the same EDR level which means that the two aircraft are being rated under the same turbulence conditions. The model used for this purpose is linear so that the total response of the system can be determined by superposition of all inputs. Moreover it is linear w.r.t. EDR or $\epsilon^{1/3}$. Thus, for purely comparative purposes, the value of EDR is irrelevant and the basic question becomes what the relative levels of acceleration are experienced by the two aircraft types under the specified conditions.

Figure 10 provides the results of the total energy of the response of the Savannah aircraft and the B 757 type for $\epsilon = 1$ and the frequency range from [0.1 – 10 Hz] as defined by the red colored area and tabulated in Table 1.

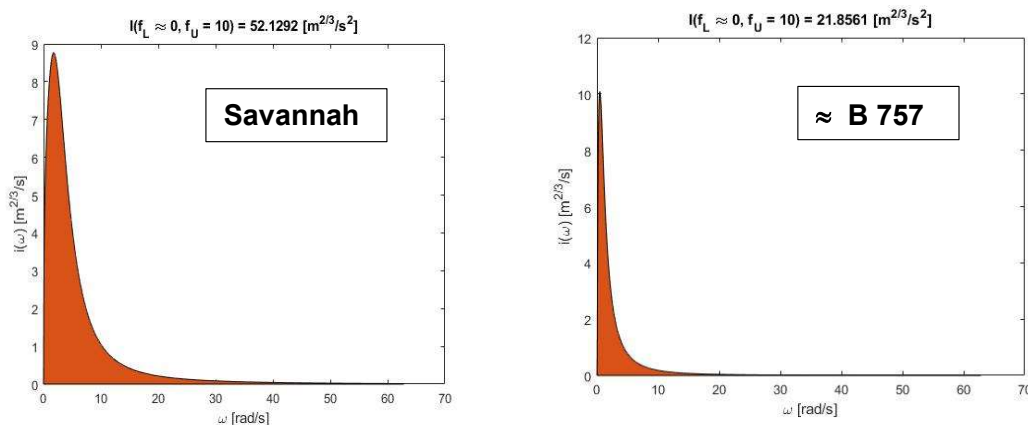


Fig. 10. Integral expression for the Savannah aircraft and a B 757 type aircraft for the full turbulence spectrum; frequency interval [0 - 10 Hz.]

These numbers represent the estimated variance of the acceleration for the two types of aircraft in accordance with the von Karman model with unity EDR. The standard deviations are then obtained as:

$$\sigma_z = 7.2 \text{ m/s}^2 \text{ for the Savannah aircraft}$$

$$\sigma_z = 4.7 \text{ m/s}^2 \text{ for the } \approx \text{ B 757 aircraft}$$

This shows that the load on the small aircraft, measured in terms of vertical acceleration, is over 50% more intensive for the light aircraft. This ratio, computed here for unity EDR ($\epsilon^{1/3} = 1$), applies for all EDR values. For a normally distributed process this means that the small aircraft could be expected to exceed 14 m/s^2 5 % of the time which corresponds to almost 1.5 g. This is obviously very heavy turbulence considering that a “peak” EDR value of 0.35 defines the entry into the heavy turbulence regime for the Savannah aircraft as described in section 1.4 of this report. The standard deviations corresponding to the 0.35 EDR value would be 2.5 m/s^2 and 1.6 m/s^2 respectively for the two types of aircraft. This indicates that the small aircraft is a much more sensitive platform for making in-situ measurements than the heavy aircraft keeping in mind that it may not be able to tolerate as much heavy turbulence and is not suitable for flight under instrument flight conditions (IFR).

In comparing the turbulence reponse of the aircraft of interest the following steps need to be taken:

1. The power spectrum is established for the true airspeed at which the aircraft in question is operating as well as the EDR level being considered. This is done by converting the spatial von Karman model, defined in terms of the wave number k as defined by Eq. (1), to a temporal model specified in terms of rad/second as per equation Eq. (3) of section 3.1. The outcome for the Savannah and the \approx B 757 aircraft are shown in Fig. 11
2. The transfer functions of the aircraft in question, taking into account all aircraft specific parameters (as per Table 2) are established. This is used in conjunction with the appropriate form of the power spectrum, with the specified EDR level, to compute the strength of the vertical acceleration in terms of its standard deviation.
3. Comparison can then be made between different types of aircraft by considering the relative strength of their responses to the same turbulence environment. The result for the two aircraft types considered here is shown in Fig. 13 which provides the power spectrum of the vertical acceleration on a linear scale for unit EDR. This is in fact the same information as contained in Fig. 10 in two separate graphs.

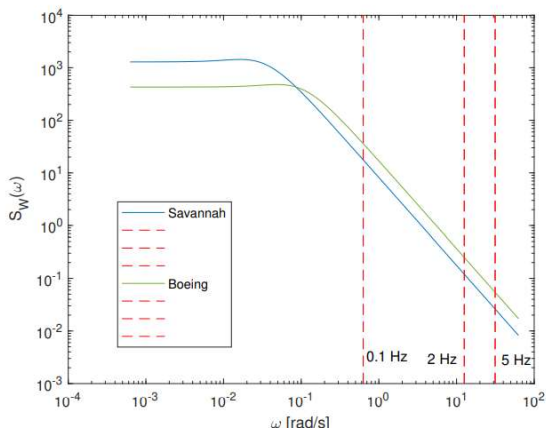


Fig. 11. Temporal von Karman power spectrum for the Savannah and B 757 aircraft ($\epsilon^{1/3}=1$)

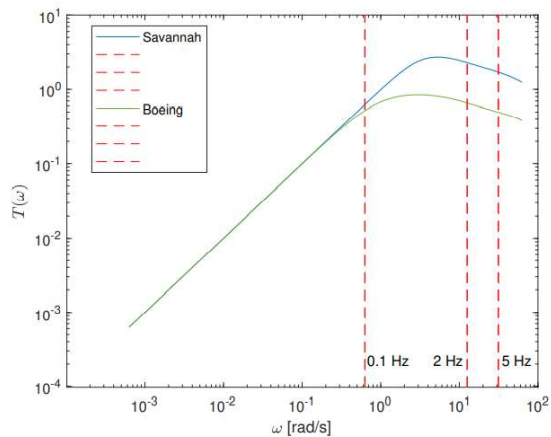


Fig. 12. Transfer functions, $T(s) = \ddot{Z}(s)/W_g(s)$, of the Savannah and \approx B 757 aircraft ($\epsilon^{1/3} = 1$)

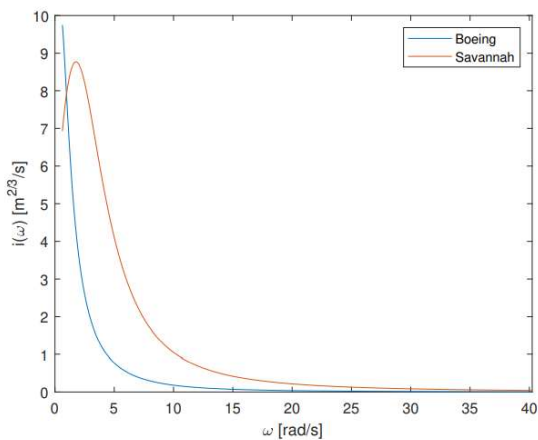


Fig. 13. Power spectrum of the acceleration for the two aircraft types ($\epsilon^{1/3} = 1$)

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Hermun með Von Karman kvikulíkani

Skrifað af:

Orra Steini Guðfinnssyni

Í þessum viðauka verður skoðað hvernig flugvéarlíkanið bregst við vindi sem er byggður á Von Karman kvikulíkaninu. Von Karman kvikulíkanið er í formi línulegs yfirfærslufalls og er gefið með jöfnunni

$$G_{W_g}(s) = \frac{\sigma_w \sqrt{\frac{2L_w}{\pi V}} \left(1 + 2.7478 \frac{2L_w}{V} s + 0.3398 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^2 \right)}{1 + 2.9958 \frac{2L_w}{V} s + 1.9754 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^2 + 0.1539 \left(\frac{2L_w}{V} s \right)^3} \quad (1)$$

þar sem $L_w = 1500m$, V er hraði flugvélarinnar og σ_w er staðalfrávik vindsins sem hægt er að breyta eftir því hvernig vindi óskað er eftir úr líkaninu. Athuga skal að kvikulíkanið sett fram í jöfnu 1 er fyrir lóðréttan vind.

Ef hvítt suð með einingarferviki er sett inn í Von Karman kvikulíkanið, þá fæst út óreglulegur vindur sem hefur nær að sama afhróf og sá vindur sem maður myndi upplifa í flugvél. Með því að breyta styrk hvíta suðsins er jafngilt því að breyta staðalfrávik vindsins, σ_w , og því er kvikulíkaninu stjórnað á þann hátt.

Hér fyrir neðan eru myndir af lóðréttu kvikuvindinum sem kemur út úr Von Karman kvikulíkaninu ásamt svörun flugvélarinnar við þeim vindi.

Hermun með Von Karman kvikulíkani

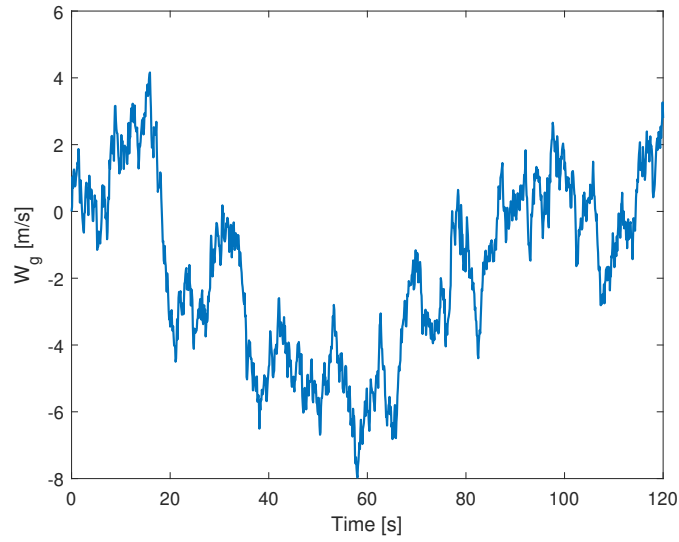


Figure 1: Útmerkið, W_G , sem kemur út úr Von Karman kvikulíkani.

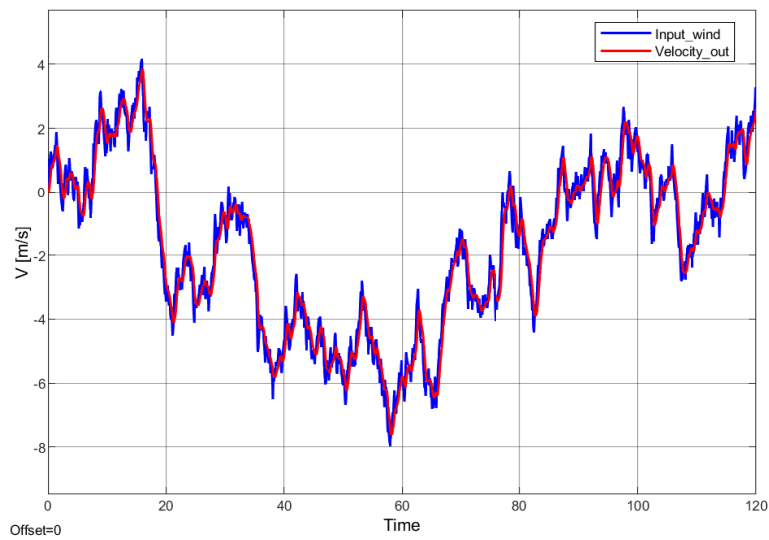


Figure 2: Innmerki flugvélarlíkansins, W_G , (sýnt með bláum lit) og hraðasvörun fyrir Savannah flugvél (sýnt með rauðum lit).

Hermun með Von Karman kvikulíkani

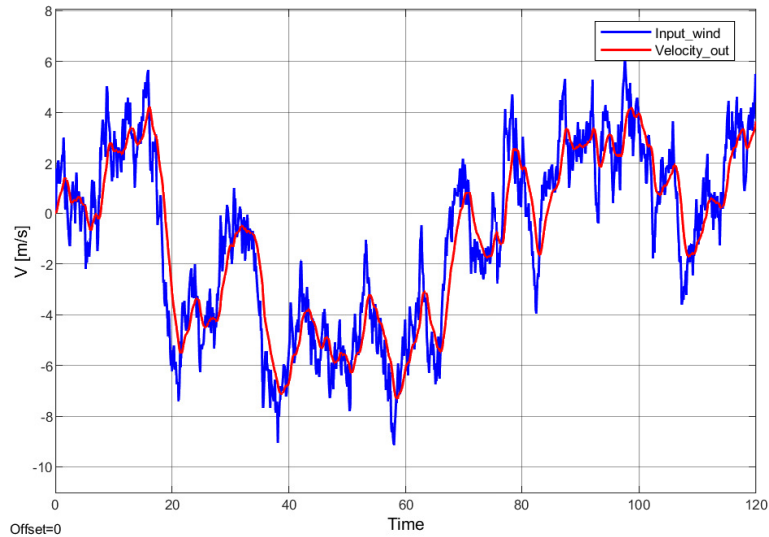


Figure 3: Inmerki flugvélarlíkansins, W_G , (sýnt með bláum lit) og hraðasvörunin fyrir tveggja hreyfla flutningapötu, Boeing 757 (sýnt með rauðum lit).

Eins og má sjá á mynd 2, þá fylgir hraði lítillar vélar (Savannah) kvikuvindinum heldur vel, en þó með smávægilegri seinkun. Eins og sést á myndinni þá fylgir hraði flugvélarinnar kvikuvindi af lágrí tíðni betur en hátíðnikvikuvindi. Þetta er í samræmi við Bode gröfin sem sýnd eru í Viðauka B. Á mynd 3 má sjá að stærri flugvél (Boeing 757) hefur nánast enga hraðasvörun við hátíðnivind og því samanstendur hreyfing hennar mest af svörun við kvikuvindi af lágrí tíðni. Einnig má sjá að seinkunin á milli vindsins og hraða flugvélarinnar er mun meiri fyrir Boeing 757 vél, en það er að hluta til vegna þess að Küssner og Wagner tímafastarnir eru lægri fyrir þá vél borið saman við Savannah.

Ef hermunin er keyrð aðeins lengur en 120 sek þá sést minna hvað er að gerast, en við það fást betri gögn til þess að reikna staðalfrávikid og þaðan EDR. Ef hermunin er keyrð í 300 sek með styrk hvíta suðsins = 70 rad/s, þá fæst út:

Hermun með Von Karman kvikulíkani

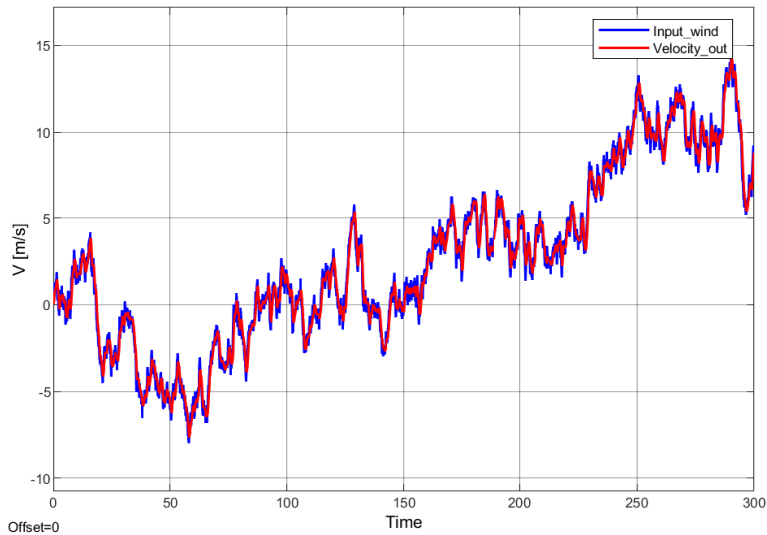
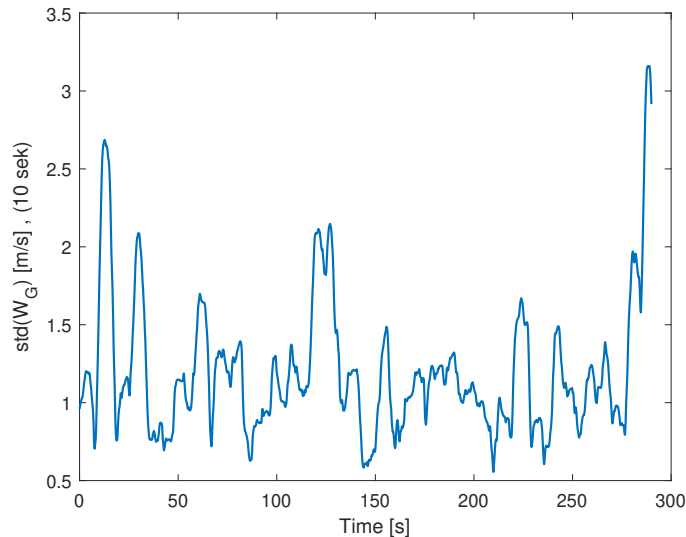


Figure 4: Innmerki flugvélarlíkansins, W_G , og svörunin fyrir Savannah ef forritið er keyrt í 300 sek.

Ef tekið er staðalfrávik innmerkisins, W_G (Input_wind) sem er sýnt á mynd 4, þá fæst að það er $5m/s$ þegar styrkur hvíta suðsins er $70 rad/s$.

Ef söfnunartíðnin á innmerkinu (W_G) er svo lækkuð (*Downsampled*) um 100 stök og svo reiknað 10 sek staðalfrávik af því merki, þá fáum við graf sem sést á mynd 5.

Hermun með Von Karman kvikulíkanu

Figure 5: 10 sekúndna staðalfrávik innmerkisins, W_G .

Samkvæmt NLR 137 skýrslunni (Proposal for a method to compute Eddy Dissipation Rate from Flight Data Recorder data) þá er hægt að reikna EDR ú frá staðalfrávikni vindsins þar sem EDR er gefið með:

$$EDR = \epsilon^{1/3} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_W^2}{0.7V^{2/3} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^{-5/3} d\omega}} = \frac{\hat{\sigma}_w}{\sqrt{1.05V^{2/3}(\omega_1^{-2/3} - \omega_2^{-2/3})}} \quad (2)$$

Ef við notum gildin $V = 40m/s$, $\omega_1 = 2\pi \cdot 0.1rad/s$ og $\omega_2 = 2\pi \cdot 2rad/s$, þá fæst að gildið á nefnaranum í jöfnu 2:

$$I_{wind} = \sqrt{1.05V^{2/3}(\omega_1^{-2/3} - \omega_2^{-2/3})} = \sqrt{1.05 \cdot 40^{2/3}(0.628^{-2/3} - 12.566^{-2/3})} = 3.80 m^{1/3} \quad (3)$$

Ef útreiknað I_{wind} er notað til að reikna EDR út frá jöfnu 2 og það teiknað upp fyrir þessa hermum þá fæst graf sem sést á mynd 6.

Hermun með Von Karman kvikulíkani

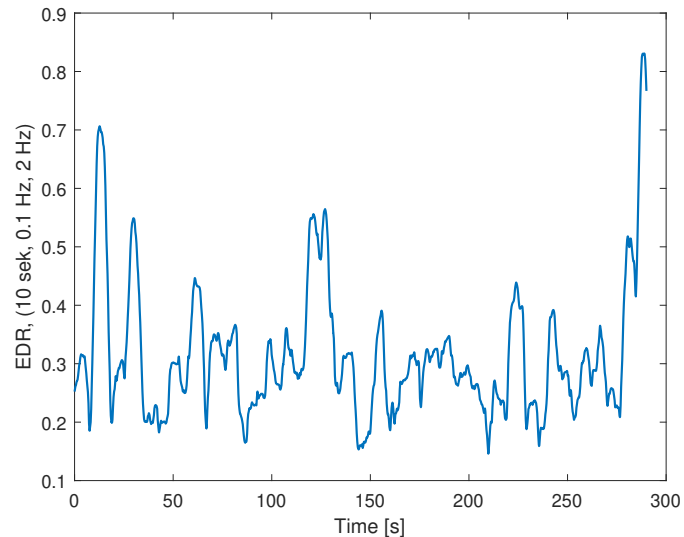


Figure 6: Útreiknað Eddy Dissipation Rate (EDR) út frá hermuninni.

Ef mynd 6 er borin saman við hráu gögnin úr hermuninni sem sést á mynd 4, þá er auðséð að ef innmerkið er með litlar breytingar yfir tímabilið, þá skilar það sér í lágu EDR gildi, en ef það eru miklar breytingar í innmerkinu, þá fæst út hátt EDR. Ef borið er saman EDR gildin frá mynd 6 við þau EDR gildi sem reiknuð eru út frá mældri hröðun flugvélarinnar, þá er bæði meðal EDR gildið hærra og topparnir hærri fyrir hermunina (þó svo að merkin líti svipuð út). Ástæðan fyrir þessu gæti verið vegna þess að innmerkið sem fæst út úr hermuninni var ekki síað með bandhleypisíun og því koma inn vindar sem hafa ekki tíðni á bilinu $[0.1, 2]$ Hz. Lágtíðnivindar sem hafa tíðni undir 0.1 Hz skila sér í mikilli svörun í hraða flugvélarinnar og með því hækkar staðalfrávik hraða flugvélarinnar og því út frá jöfnu 2 fengist hærra EDR, þó er aflið í þeim kvikuvindi óverulegur hluti af heildar aflinu. Ef þetta skyldi gerast í mæliflugi (til dæmis ef flugmaðurinn flýgur inn í uppstreymi), þá myndi sú tíðni vera filteruð út með einum eða öðrum hætti, til dæmis með því að stýra á móti uppstreyminu til þess að halda fastri hæð, eða þegar unnið er úr gögnunum í eftirvinnslnunni.

Hermun með Von Karman kvikulíkani

Til þess að geta borið saman hröðun flugvélarinnar úr hermuninni við hröðun sem fæst út frá mælingum, þá var sett inn sama innmerki (W_G) en lóðrétt hröðun valin sem útmerki, enda er þetta sú stærð sem er mæld í þessu verkefni. Mynd 7 sýnir hráu gögn hröðunar flugvélarinnar.

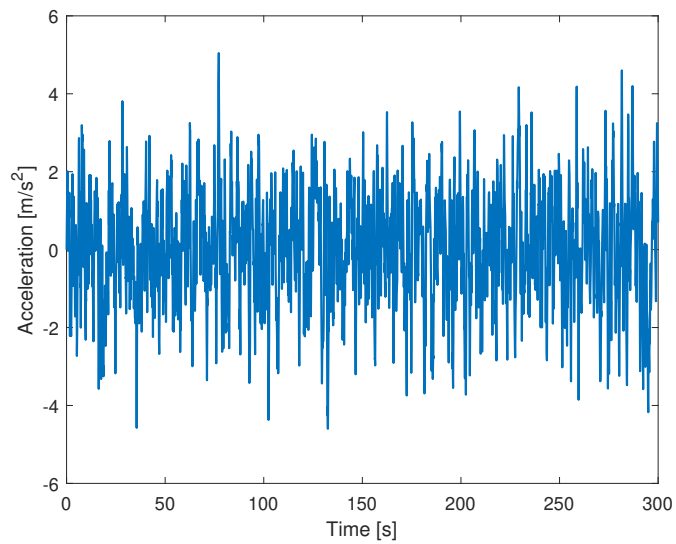


Figure 7: Hrá gögn hröðunar flugvélarinnar, a_A .

Þar sem unnið er úr staðalfrávik hröðunarinnar til að reikna EDR, en ekki hráu gögnunum, þá var ákveðið að taka 10 sek staðalfrávik hröðunarinnar, sem gefur graf sem sést á mynd 8.

Hermun með Von Karman kvikulíkani

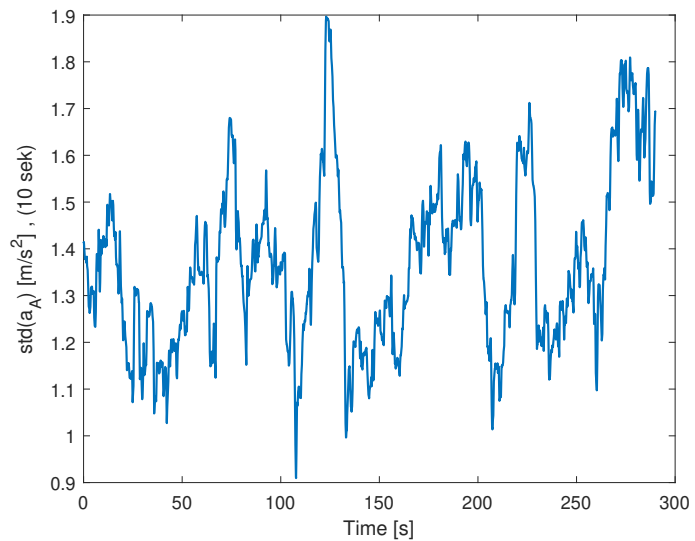


Figure 8: 10 sek staðalfrávik hröðunar flugvélarinnar, a_A .

Hermun með Von Karman kvikulíkani

Til þess að ganga úr skugga um að allir skammvinnir vindar séu horfnir úr innmerkinu, þá var ákveðið að keyra hermunina í 3000 sekúndur og skoða hvernig stöðugt ástand vindsins lítur út og bera það saman við vindinn þar sem skammvinnu vindarnir eru ekki horfnir.

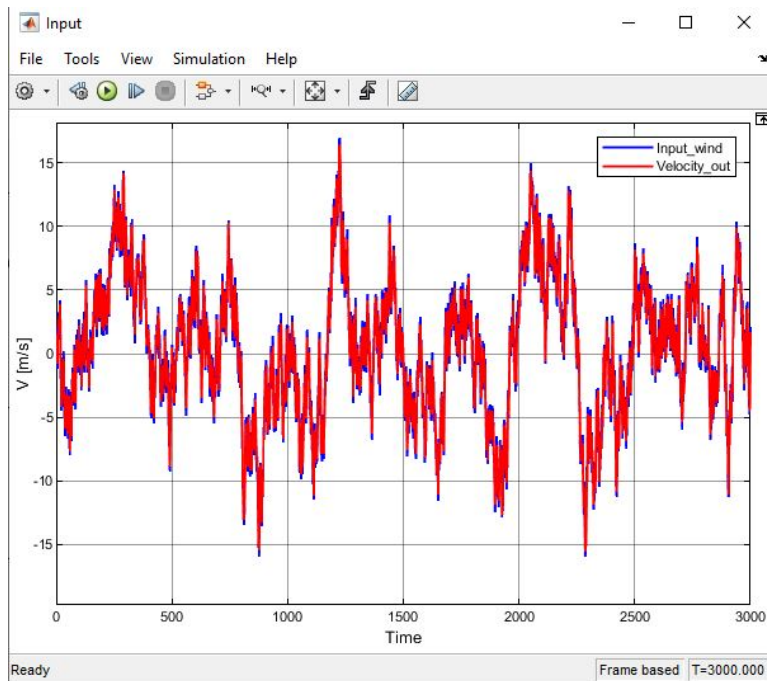


Figure 9: Innmerkið, W_G , og svörunin fyrir Savannah ef hermunin er keyrð í 3000 sek.

Með því að skoða núlla og póla kvikulíkansins þá er hægt að sjá hversu lengi þarf að keyra hermunina til þess að skammvinnir vindar séu horfnir úr merkinu. Samkvæmt mynd 10, þá má sjá að hermunin þarf að vera keyrð í að minnsta kosti 670 sekúndur til þess að kerfið sé komið í stöðugt ástand. Þetta má sjá vegna þess að póllinn í ca. -0.017 rad/sek er sá póll sem mestu ræður um lágtíðnisvörun kerfisins. Tímakonstantinn er þá um 67 sek þannig að 10 tímakonstantar eru 670 sek.

Hermun með Von Karman kvikulíkanu

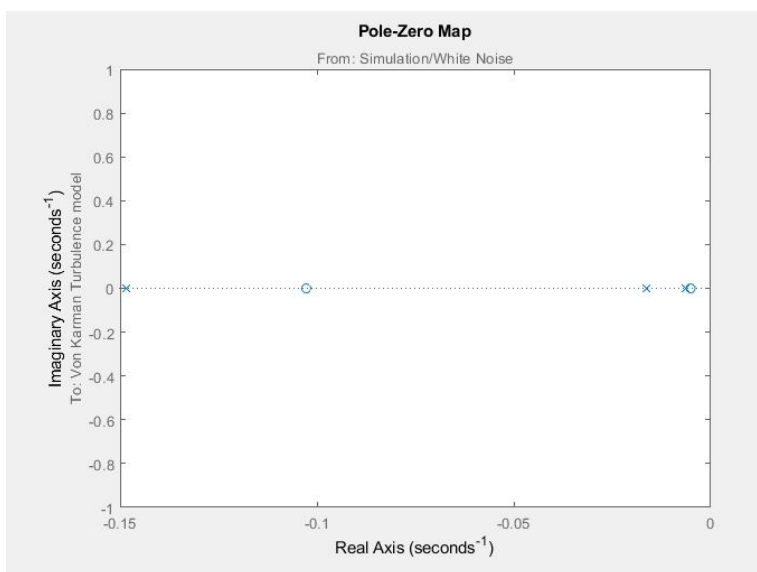


Figure 10: Pólar og núll fyrir Von Karman kvikulíkanu.

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Tölva á væng með Pitot-röri

Skrifað af:

Jóhannes Bergur Gunnarsson

16. september 2021

1 Inngangur

Mikið hefur verið skoðaður möguleikinn á því að notast við lofthraðanema tengda við tölvurnar. Hins vegar eru alltaf ákveðin vandamál sem fylgja því. Fyrsti neminn sem var keyptur var pitot-rör. Þetta er rör sem er tvöfalt, með innra rör og ytra rör. Innra rörið er með gat framan á en lokar svo með plasti ytra rörinu að framan. Þetta innra rör leiðir svo í enda sem er tengdur við plasttúpu. Ytra rörið er svo með gót á hliðunum og loftið getur svo streymt meðfram innra rörinu, en innan þess ytra. Svo leiðir það svo líka í aðra plasttúpu, en þær tengjast ekki. Þessar plasttúpur tengjast svo í mismuna mæli sem mælir mismuninn á þrýstingnu. Svo er notast við lögmál Bernoulli til að reikna lofthraðann.

2 Hömlur

Það er hins vegar þannig að tölvan sem tekur á móti þessum upplýsingum þarf að eiga samskipti við aðaltölvuna sem reiknar EDR. Samskiptin sem er venjulega notast við geta aðeins notast við stuttar snúrur á milli tölva, þessi samskiptamáti kallast I2C. Hér þarf því pitot-rörið og tölvan sem því fylgir að vera fremur nálægt aðaltölvunni því þessi samskiptamáti er notaður. Það var því hannað og smíðaður kassi sem hýsir tölvuna, GPS - móttökutækið, pitot - tölvuna, pitotrörið og rafhlöður þannig að hægt sé einfaldlega að kveikja með einföldum takka. Þessi kassi þyrfti svo að vera einhvers staðar utan þess sviðs og streymis sem kemur frá hreyfli. Honum var því fundinn staður út á vængstífu og hönnuð viðbót við kassann sem er þannig að kassinn fellur nokkuð vel að vængstífunni. Botnstykkið leiðréttir líka snúning sem er af völdum þess að vængstífan er ekki hornrétt á flugvélinu. Velta kassans er leiðrétt með hugbúnaði. Það er innbyggt í tölvurnar að leggja þær niður og velja „set horizon“. Kannað var svo hvort staðsetning skekkti niðurstöður nokkuð.

3 Mæliflug

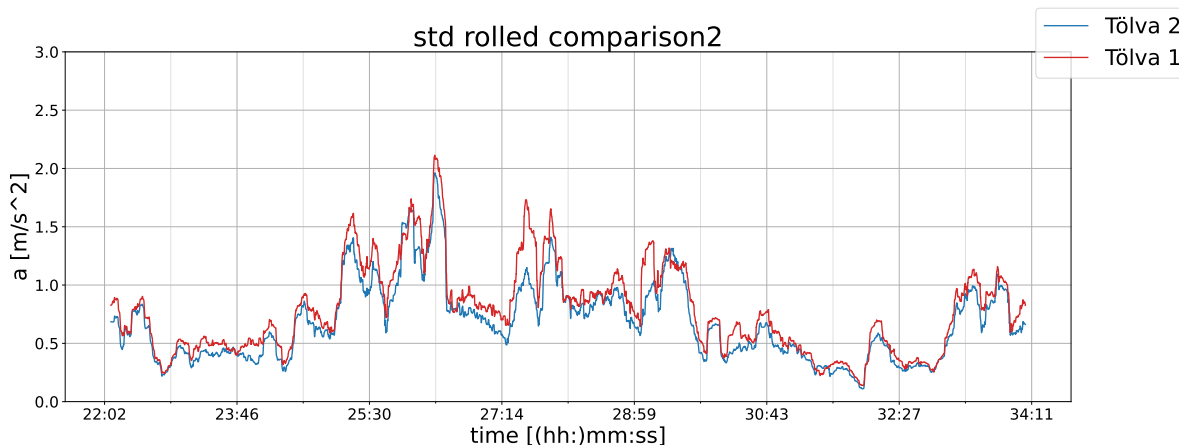
Til eru einhver mæliflug þar sem flogið er með amk tvo mæla, þennan út á væng og amk ein tölva inn í flugvél. Gerð voru gröf þar sem staðalfrávik var borið saman. Notaðar voru hefðbundnar aðferðir. Byrjað er á því að laga gögnin þannig að þar sem eru týndar söfnunarlínur, þas þar sem söfnun er ekki alveg í takti. Þar er bætt við týndum gildum til þess að síun sem gerist á tíðnisviðinu nái örugglega að meta tíðnirnar og tímamismun rétt, því síurnar gera ráð fyrir alveg taktföstum tækni.

Því næst er sið með fimmtu gráðu Butterworth bandhleypisú sem er innbyggð í `scipy` pakkann í Python. Notast er við bilið $f \in [0.1, 2]$ Hz. Því næst er tekið hlaupandi staðalfrávik með einnar sekúndu glugga (200 stök á 200 Hz). Staðalfrávikðið er svo borið saman þar sem EDR er í beinu hlutfalli við staðalfrávikðið.

Flogin voru tvö flug þann 23. apríl. Fyrra flugið þá voru þrjár tölvur að mæla hröðun og staðsetningu. Tvö innan í flugvélinni og eitt á vængstífunni eins og lýst var hér á undan. Tölvurnar innan í flugvélinni bar alveg saman og verður því ekki gert meira úr því í þessari smáskýrslu. Fyrra flugið var þannig að flogið var á loft og smá túr í kringum Hólmsheiði, aðeins norður að Hafravatni, snúið við og svo suður að hringveginum yfir hann og snúið við yfir Heiðmörk og flogið nokkurn veginn til baka á Hólmsheiðarflugvöll.



Mynd 1: Hér má sjá tölvuna á vængstífunni. Botnstykkið sem skrúfast við kassann sem inniheldur tölvuna hefur vængstífuprófilinn svo hún situr nokkuð stöðug, sem leiðrétti snúning svo hún snýr beint upp í vindinn. Veltan er svo leiðrétt með hugbúnaði. Kassinn er svo límduð niður fyrir flugtak.

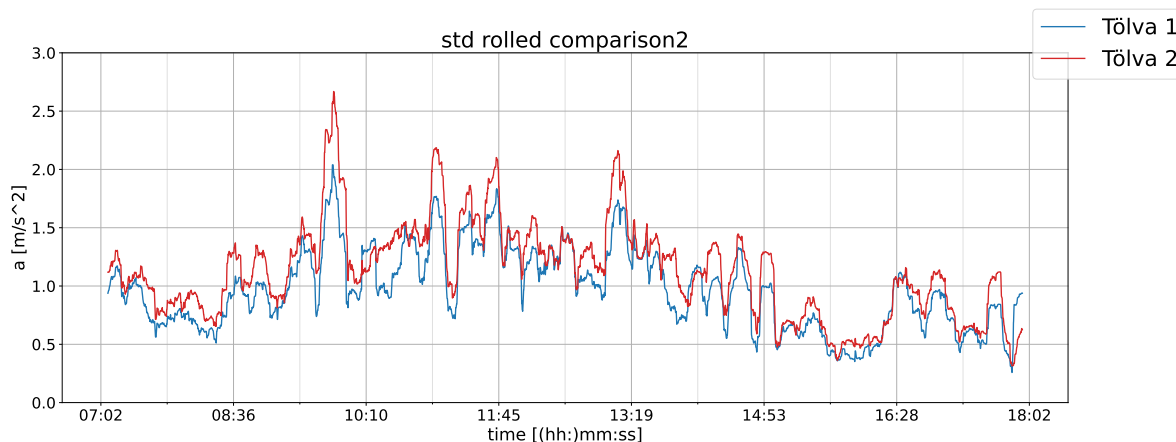


Mynd 2: Hér má sjá tímaröð ferveiks lóðréttrar hröðunar fyrir flug sem var flogið þann 23. apríl 2021. Tölva 2 er sú tölva sem situr á vængstífunni, tölva 1 er sú sem er innan í flugvélinni. Flugið er í heild í kringum 12 mín. Hér er búið að klippa af upphitun vélarinnar, flugtak, landingu ofl sem er talið skekkja niðurstöður.

Hér má sjá að samanburður á þessum mælum að fyrir tölvuna á vængnum þá er staðalfrávikkið alltaf aðeins meira, þetta er ekki stórlégt en töluvert á köflum. Hér er í raun margt sem getur verið. T.d. gæti verið að límbandið sem heldur kassanum geti gefið aðeins eftir og titri á einhvern handamáta sem nær á þessar tíðnir. Það þykir þó ekki mjög líklegt þar sem bandhleypisían ætti að eyða öllum slíkum titringi sem gerist á tíðnum tengdum vélinni.

Það sem þykir líklegra er að þar sem tölvan er út á væng að vélin getur snúist um snúnings ásinn sinn (*e. roll*) og þar með hreyfist vængurinn meira en flugvélin sjálf í ókyrrð.

Ef skoðað er seinna flugið þennan sama dag þá fæst eftirfarandi graf:



Mynd 3: Hér má sjá tímaröð ferveis lóðréttrar hröðunar fyrir flug sem var flogið þann 23. apríl 2021, seinna um daginn en það á fyrri myndinni. Tölva 2 er sú tölva sem situr á vængstífunni, tölva 1 er sú sem er innan í flugvélinni. Hér var flogið í u.þ.b. 11 mín. Hér er búið að klippa af upphitun vélarinnar, flugtak, landingu ofl sem er talið skekkja niðurstöður.

Hér má sjá að form eða mismunur grafana ber saman við grafið frá því fyrr um daginn. Einhver skekkja er þá að eiga sér stað.

Til er annars konar pitot-rör tölva sem talar með CANBUS í stað I2C og sá staðall má notast við lengri vegalengdir. Ef þörf er á pitot-röri þá skal það nýtast við það til þess að tölvan sé innan í flugstjórnarklefa en pitot-rörið út á væng tengt með snúru.

Ef ekki þarf yfir höfuð pitot-rör passar það vel við markmið verkefnisins að geta haft einfaldan nema sem má setja í hvaða flugvél sem er, og massamiðjan er yfirleitt aðgengileg.

4 Niðurstaða

Á þessu stigi málsins þykir óráðlegt að hafa mælitölvu skorðaða út á væng vegna mögulegrar aukinnar skekkju sem kemur fram vegna aukinnar hreyfingar vængs m.v. þungamiðju flugvélar.

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Dempun, síun og söfnunartíðni

Skrifað af:
 Gylfa Árnasyni
 Jóhannesi Berg Gunnarsyni
í september 2021 uppúr
glósum yfir tímabilið

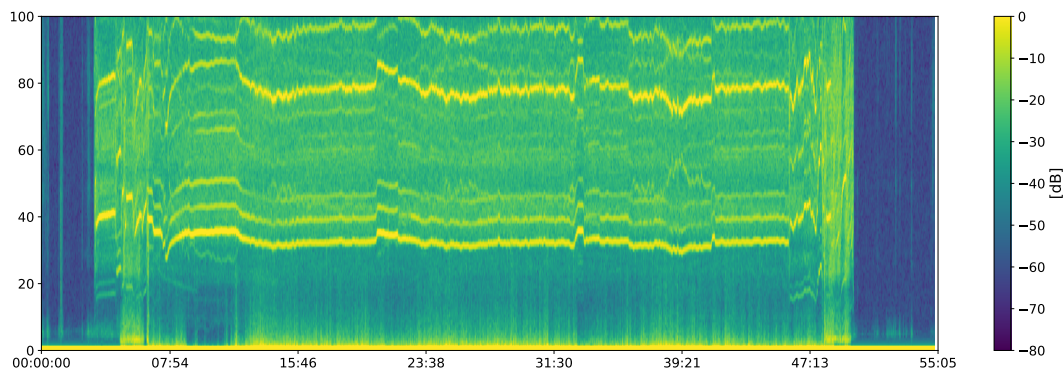
1 Inngangur

Pegar verkefnið hófst var gengið út frá því að áhrifamestu kvikutíðnir á flugvélina væru á bilinu 0.1 – 5.0 Hz og því dygði að mæla með söfnunartíðni í kringum 10 Hz. Byrjað var að kaupa nema frá Aaronia (Aaronia datalogger; <https://aaronia-shop.com/products/gps-logger-incl-compass-gyro-tilt-accelerometer>) með söfnunargetu upp í 30 Hz, en var stilltur á 9 Hz og erfitt að breyta. Fyrstu mæliferðir um áramótin 2019/2020 leiddu í ljós að mælt staðalfrávik lóðréttrar hröðunar var hátt þegar flugmaður taldi sig í ókyrrð, en í lítilli ókyrrð skilaði mælirinn tiltölulega háu staðalfráviki sem stafaði af hröðun vegna vélar og skrífu flugvélarinnar. Flugkvikan var hulin í truflunum umhverfisins (*e. low Signal-to-Noise ratio*) vegna speglunar (*e. aliasing*) birtist titringurinn á tíðnisviði flugkvikunnar. Hér var því ýmislegt sem þyrfti að skoða nánar.

Pegar kom í ljós að Aaronia mælirinn mældi tímaröð þar sem erfitt var að greina kviku frá vélarnið flugvélar var farið að skoða málið og drónatölvur komu upp eftir leit á netinu. Til að skoða þetta nánar var fenginn að láni drónatölva sem gat skilað allt að 5 kHz mælitíðni á lóðréttri hröðun (CubeOrange; <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecubeorange-overview.html>). Með henni var hægt að leiða í ljós að á venjulegum snúningshraða vélar flugvélarinnar (4500 RPM eða um 75 Hz) var töluvert titringsafl. Í framhaldi af þessum rannsóknum voru PX4 Mini drónastýritölvur teknar í notkun, með þeim er hægt að mæla hröðun með allt að 1 kHz tíðni.

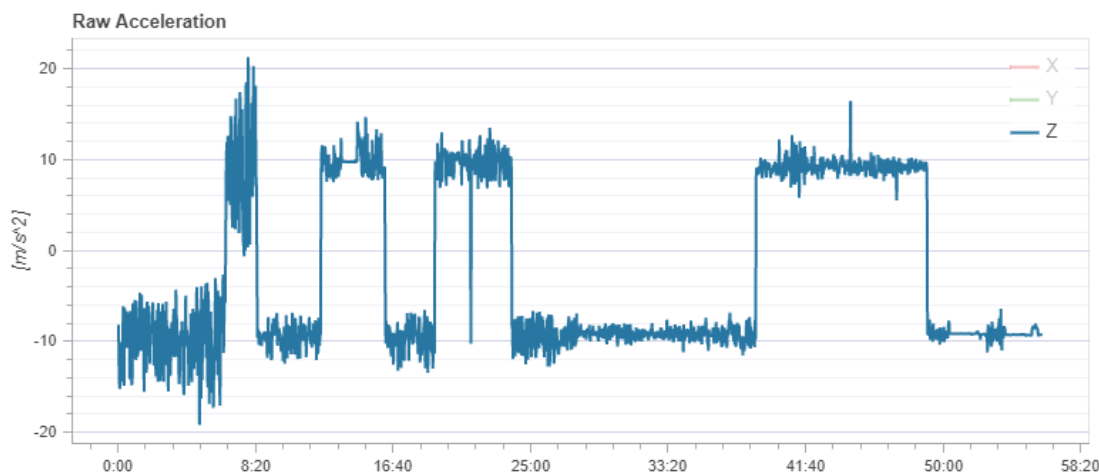
2 Dempun

Eftir að byrjað var að nota tölvurnar kom þessi mótör niður skýrt í ljós, töluvert var af titringsafl á öðrum tíðnum sem tengist eðli fjörgengisvélarinnar og gíruðu þriggja blaða flugvélaskrúfunni. Hér var því skýrt að þörf væri á dempun. Á mynd 1 má sjá dæmi um flug þar sem þessar tíðnir koma sterkt fram. Þær eru í kringum 35 Hz og svo 75 Hz



Mynd 1: Fossamynd frá flugi þann 23. ágúst. Hér má sjá sterkustu tíðnina í kringum 80 Hz, ásamt speglunum af þeirri tíðni af völdum gíra ofl.

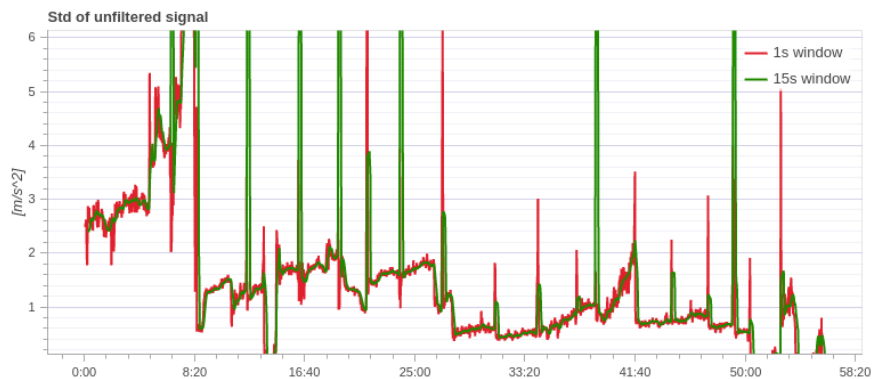
Frá myndum sambærilegum þessari var alveg ljóst að þörf væri á einhvers konar dempun. Þann 14. janúar voru gerðar mælingar á tölvu 1 með ýmsum mismunandi svömpum með það að markmiðið að prufa dempun. Flugvélin var ræst og kyrrsett úti á pláni. Setið var svo í flugvélinni og fylgst með og breytt um dempara á kerfisbundin hátt. Tölvan var á álplötu og með sérstökum depmarasvömpum sem fylgdu með tölvunni. Vert er að minnast á að álplatan ásamt þessum púðum er límt við tölvuna og því alltaf á. Hröðunarmerkið má sjá á meðfylgjandi mynd.



Mynd 2: Hrátt hröðunarmerki frá 14. janúar þar sem var verið að prófa mismunandi dempun.

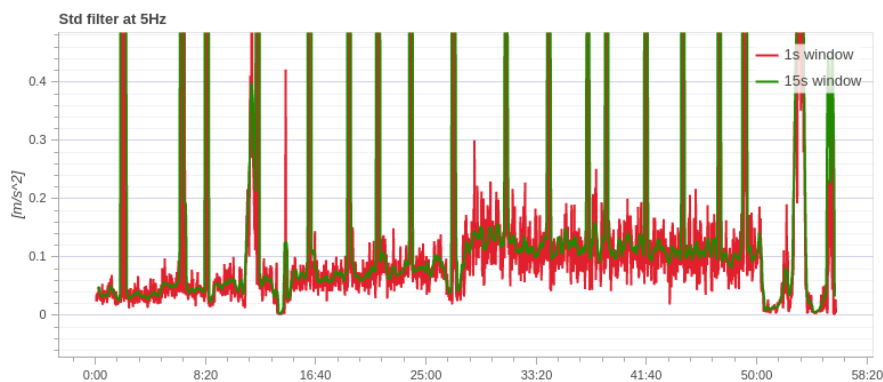
Þau gildi sem sýna jákvæða hröðun koma þegar tölvunni er snúið á hvolf til þess að skoða hvort það gæti borgað sig að sleppa álplötunni sem minnst var á ásamt púðunum. Tölvan var lögð á mælaborð til mælingar. Það sem er fyrstu 5 mín eða svo er álplatan beint niður, svo snúið við í 3 mín til eða frá. Það mælist mikið suð (staðalfrávik í lóðréttri hröðun) eins og má sjá. Svo er settir mismunandi svampar og m.a. steinullarmotta og fleira prófað. Á sirka mínútu 30 sést að suðið lækkar áberandi, en einnig staðbundið meðaltal. Þarna var tölvan færð aftur fyrir flugmann á hillu sem er því fjær vélinni. Meðaltalið lækkar vegna þess að hillan hallar aðeins. Þetta útskýrir aðeins hluta ástæðu fyrir minnkuðu útslagi. Eftir 50 mín er tilraunum lokið, en mælirinn gekk áfram.

Greinilegt er að töluverður árangur næst með dempun á nemanum, en mælikvarði á það er staðalfráviknið sem er reiknað og fékkst þá eftirfarandi graf. Takið eftir að nánast lóðréttar línur birtast á grafinu þegar nemanum er snúið á hvolf:



Mynd 3: Staðalfráviks hröðunar merkisins. Hér er staðalfráviksið hátt vegna vélarniðs, því engin flugkvika er fyrir hendi.

Hér var því merkið síað með rafrænni Butterworth lágleyphisú og staðalfráviksið svo skoðað. Vert er að minnst á að þetta var mjög snemma í ferlinu, og notast var við lágheyphisú við 5 Hz en það hefur ekki áhrif á niðurstöður þessa minnisblaðs.



Mynd 4: Merkið var síað með lágleyphisú við 5 Hz. Þetta er töluvert lægra en það sem er fyrir merkið ósíað.

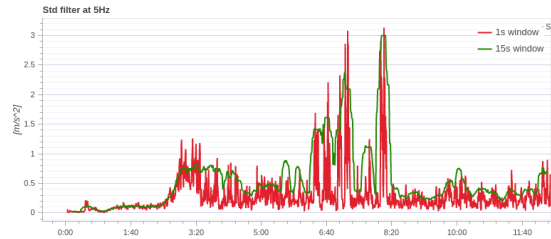
Hér má sjá að það sem gaf mestu staðalfráviksið, eða suðið nánar tiltekið, er þar sem það er lægst ef notast er við stafræna síun. Þetta er talið vera vegna þess að svamparnir trufla merkið og við það verði það óhreint. En hér virðist vera best að hafa tölvuna á mælaborðinu án allra svampa og leyfa eftirvinnslu að sía merkið stafrænt, þannig fæst stjórn á merkið sem annars er erfitt að fá með svömpum og „vélrænni“-dempun (*e. mechanical damping*).

Flogið var nokkrum dögum seinna eða 18. febrúar og þá voru tvær mælitölvur í flugvélinni. Önnur var sett beint á mælaborðið án alls. Hins vegar var hin tölva á álplötunni og á þessum sérstöku dempunarsvömpum.

Við samanburð á þessum myndum sést að augljóslega er neminn á mælaborðinu sem hefur enga dempun að nema mun meira merki og virðist myndin af hráu gögnunum vera jafnvel algjört bull. Hins vegar þegar borið eru saman myndirnar á síaða merkinu þá eru þær áþekkar, nánast upp á tíunda aukastaf. Þegar betur er að gáð má sjá að fyrir ódempuðu tölvuna er síaða merkið lægra en síaða merkið fyrir dempuðu tölvuna. Það þykir því frekar hentugt að mælitölvu má koma fyrir svo gott sem hvar sem er og með stafrænni síun, sé söfnunartíðni nægilega há, má hreinsa merkið alveg. Það sem gerir þetta líka mjög gott er að ef tölvuna þyrfti að hafa á hillu fyrir aftan flugmann er erfitt að sjá tölvuna til að fylgjast með hvort öll ljós séu í lagi og gott samband sé við gervihnetti. En það kom einnig í ljós í flugum að tölvan á bakvið flugmann missti oftast samband við gervihnetti. Þannig mikið af jákvæðum fréttum komu við þessar athuganir.

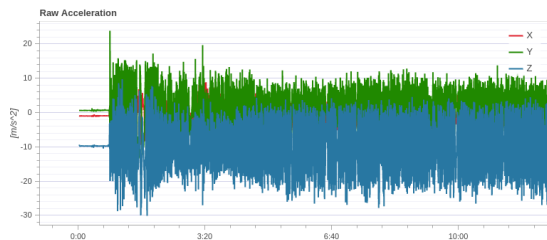


(a) Hrátt hröðunarmerki með dempun.

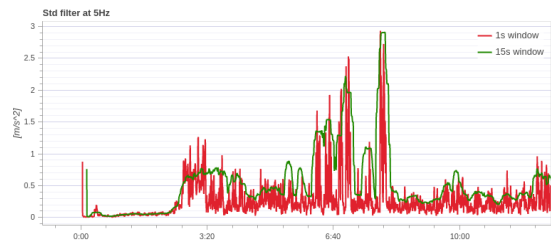


(b) Síaða merkið með dempun.

Mynd 5: Hér má sjá gögnin úr fluginu þann 18. febrúar. Þetta er hröðunarmerkið ósíað og síað fyrir tölvuna sem var fyrir aftan flugmanninn.



(a) Hrátt hröðunarmerki án dempunar.



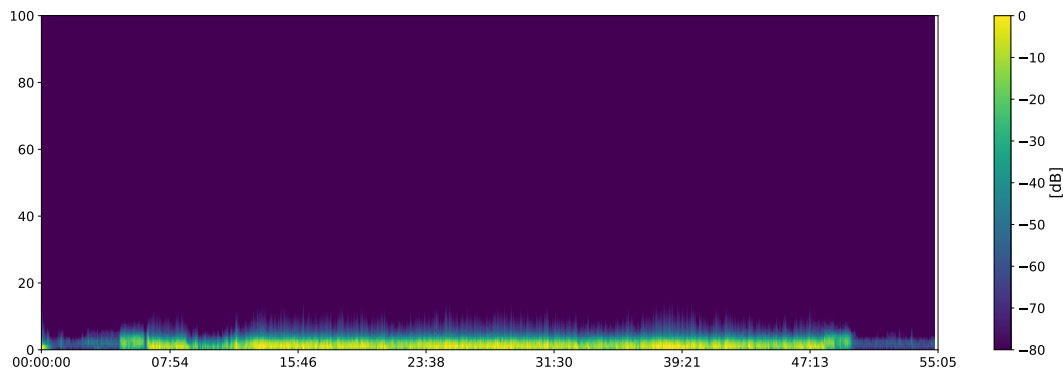
(b) Síaða merkið án dempunar.

Mynd 6: Þetta eru hins vegar gögnin úr sama flugin þann 18. febrúar. Hér má sjá mikið suð og mikinn vélarnið en eftir síun eru merkin áþekk og meira að segja er aðeins lægra fyrir síaða merkið ef dempunin er engin.

3 Söfnunartíðni

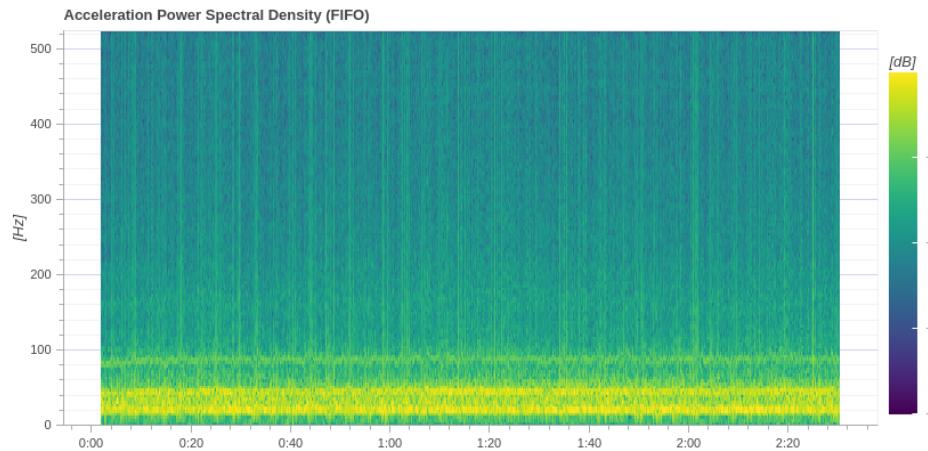
Í kjölfarið af því að skoða við hvaða tíðni þarf að safna merkinu á til þess að fullnægja því að hægt sé að sía merkið. Því ef tíðnir koma á hærrí tíðnum en söfnunartíðnin getur það haft það í för með sér að ekki er hægt að sía það með stafrænni síu.

Merkið sem er sýnt á mynd 1 var síað og þá fæst ansi hreint merki eins og má sjá á mynd 7.



Mynd 7: Sama merki og sést á mynd 1 nema þar sem búið er að sía merkið. Hér er sést því að merkið er ansi hreint.

En það að merkið virðist hreint er ekki nóg, því speglað gætu falist í kvikunni á tíðnunum. Það var því brugðið á það ráð að stilla tölvuna þannig að hún væri á að safna hröðunarmerki á 1000 Hz. Þar sem slík gagnasöfnun er talsvert plássferkari en hefðbundin gagnasöfnun þá var þetta stillt í miðju flugi og haft á í aðeins stutta stund. Hér var því markmið að safna í stuttan tíma en fá nýtsamleg gögn. Fossamyndina frá því flugi má sjá á mynd 8.



Mynd 8: Fossamynd þegar safnað var á 1000 Hz. Hér má sjá að ekki er mikið af orku á hærri tíðnum en 100 Hz.

Á síðustu fossamynd má sjá að vélarniður er ekki á hærri tíðnum en 100 Hz og því óhætt að segja að 200 Hz sé nægileg upplausn, þá er Nyquist tíðnin 100 Hz. Þá ættu ekki að vera neinar speglanir af tíðnum sem ekki næst að mæla. Sem er algengt vandamál ef söfnunartíðnin er lægri en tíðnir í merkinu. Þar með telst söfnunartíðnin negld niður.

Vert er að minnast á að gerð var ein tilraun til þess að safna á 50 Hz til þess að spara pláss, það var keyrt samhliða tölvu sem var á 200 Hz. Það skilaði sambærilegum niðurstöðum og Aaronia mælirinn gaf. Þ.e.a.s. að erfitt var að greina merkið frá suði, sér í lagi fyrir litla ókyrrð, lága hröðun. Sem staðfesti nánar fyrri athuganir.

4 Niðurstaða

Mikill vélarniður kom fram í hröðunarmælingunum. Byrjað var að nálgast vandamálið með vélrænni síun með því að notast við svampa. Það gekk ágætlega og náðist að minnka þær tíðnir sem ollu þessu töluvert. Hins vegar kom í ljós að stafræn síun var einföld í framkvæmd og skilaði sömu ef ekki betri niðurstöðu ef dempun væri engin. Auk einfaldleika og þæginda að nýta dempunarlausa staði og stafræna síun þá voru fleiri þættir sem voru mögulega að byrja að vera vandamál ef notast væri við vélræna síun.

Þessar tilraunir varðandi dempun leiddi einnig í ljós þörfina á hárrí söfnunartíðni til þess að hægt sé að sía með stafrænni síu. Of lág söfnunartíðni veldur speglun á tíðnunni niður í lægri tíðnir, þannig ekki er hægt að sía þær í burtu.

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Forrit og gagnamedferð

Skrifað af:

Gylfa Árnasyni

Jóhannesi Berg Gunnarsyni

í september 2021 uppúr

glósum yfir tímabilið

1 Inngangur

Í fyrstu þegar byrjað var að notast við drónatölvur af gerðinni Pixhawk 4 mini þá kom fljótt í ljós þægileg leið til þess að skoða niðurstöður. Þeir sem halda við hugbúnaðinum fyrir tölvuna halda einnig uppi vefsíðu, <https://review.px4.io>, sem má nota til þess að hlaða upp gagnaskráum úr þessum tölvum og fá tilbaka niðurstöður í myndformi. Til dæmis GPS gröf, hröðunar gröf, hraða gröf, fossamyndir, velta, snúningur og geig (*e. pitch, roll and yaw*), hornhraði og segulsvið svo fátt eitt sé nefnt. Þessi vefsíða var mikilvæg í fyrstu til þess að gefa fyrstu hugmyndir um hvernig tekist hefur til í mæliferðinni.

Forritasafnið sem notað er til greiningar gagnanna liggur fyrir (open source) í Python á https://github.com/PX4/flight_review. Leyfilegt er að nýta hluta hans eða hann allan. Með þessu móti var því hægt að minnka fjöldann af gröfum í það sem við höfðum beinan áhuga á. Einnig var þá hægt að bæta inn gröfum sem voru ekki fyrir en hentudu áhugasviði verkefnisins. Þetta voru gröf eins og síaða merkið og staðalfrávik og EDR útreikningar. Linux tölvur og Python voru aðstandendum verkefnisins að mestu framandi, en smám saman tókst að beita þessum verkfærum til að eiga við gögnin frá PX4, en frumgögnin eru oft um 100 Mbyte. Nú er svo komið að frumgögnin eru verkuð í gröf, og gagnamagn sem unnið er með áfram hefur verið dregið saman í undir 1 Mbyte. Open Source aðgengið tryggir að öll frumgögn eru aðgengileg notandanum, sem er ekki öruggt í "turnkey"kerfum sem gætu verið fánleg á markaði.

Stefnan var tekin á að einfalda kóðann og skrifa eitthvað frá grunni t.d. gröfin. Þetta opnaði einnig möguleikann að notast við Windows stýrikerfi sem hentaði betur. Hægt var að nýta kóðabúta, sér í lagi þá sem sneru að því að lesa inn gagnaskrána til að undirbúa gögn til meðhöndlunar. Hér var stjórnnin orðin meiri og umfangið orðið vinnulegra, því það sem kom frá PX4 var það stórt og umfangsmikið að það innhélt mörg þúsund línur af kóða og kóðinn dreifður á nokkur skjöl. Þarna varð til nokkurn veginn kóðinn sem er núverandi í notkun. Fyrir framhaldið er þó þörf á því að taka til í kóða og laga svo snyrtilegt sé. En mikil vinna hefur þegar farið í að fá hlutina til þess að virka rétt. Það sem kóðinn gerir í gröfum dráttum:

- **Klippa enda af gagnasafni:** Hröðun er önnur við flugtak og landingu, einnig í akstri eftir jörðu og í biðstöðu. Kóðinn eyðir því af gagnaröðinni sem er út fyrir ákveðna lengdargráðu. Þetta er stillt þannig að þessi mörk liggja á milli svæðisins í Hvassahrauni og Reykjavíkurrvallar, en þá lendir flugvöllurinn á Hólmsheiði með Reykjavíkurrvelli.
- **Meðaltalið dregið frá gögnum:** Meðaltal þyngdarhröðunar jarðar er dregið frá lóðréttu hröðunarröðinni (þyngdarhröðun jarðar $g \sim 9.82$) og mæligildið því orðið frávik frá 0.
- **Gloppur lagaðar í hröðunarkerki:** Við gagnasöfnun myndast gagnagloppur annað slagið. Á milli tveggja skráninga eru 5 ms eða gagnasöfnun á 200 Hz en það kemur fyrir að tvöfalt lengur líður á milli skráninga eða jafnvel lengur. Ástæða þess getur verið af margþátt. Hér er því stillt upp tímaröð þar sem ef gloppur verða

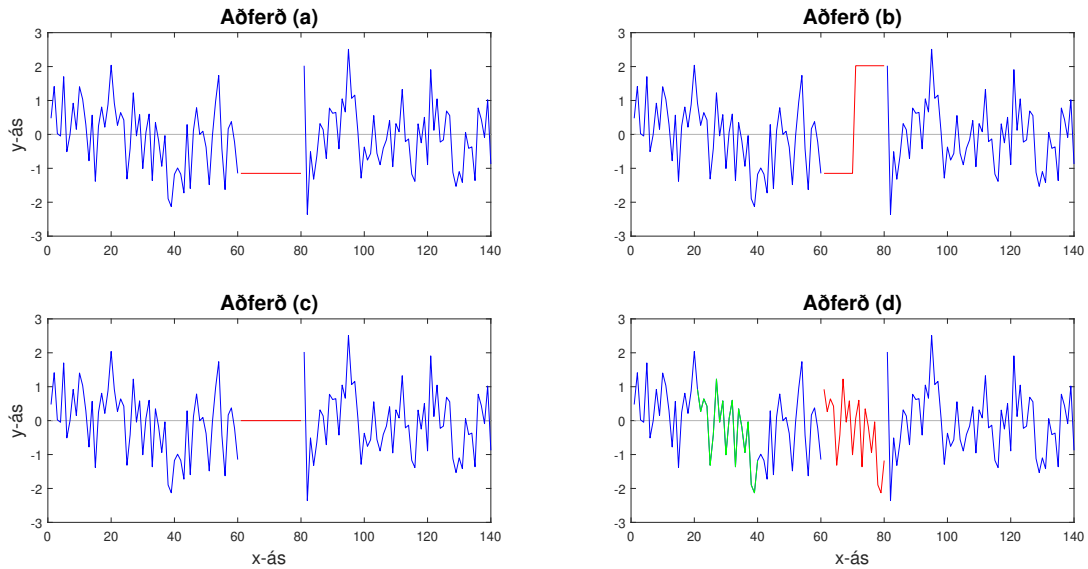
Þá er sótt gildi annars staðar úr tímaröðinni með kerfisbundinni aðferð. Þetta er umfjöllunarefni fær nánari upplýstun í sér kafla hérna neðar.

- **Gloppur í GPS:** Einnig kemur fyrir að það vanti gildi í GPS-tímaröðina, þar sem það er aðeins með söfnunartíðni upp á 1 Hz og því almennt mun minna sem vantar, en það þarf þó að fylla, en er hægt með einfaldari aðferðum.
- **Síun:** Hröðunarröðin er síuð með fimmsta-stigs Butterworth bandhleypisú með neðri og efri mörk sem 0.1 Hz og 2.0 Hz. Ástæðan fyrir þessu bili er lýst í öðru minnisblaði.
- **Niðursköpun (e. *downsampling*) hröðunarmerkis:** Eftir síun er síaða hröðunarmerkið niðurskalað á 10 Hz. Þessi tímaröð er svo vistuð til frekari vinnslu. Sjaldan er þörf á að sækja aftur frumgögnin, en þá þyrfti að fara í gegnum allt ferlið aftur. Þessi röð er notuð til afrófsgreiningar hröunarinnar bæði í fossamynd og greiningu með aðferð Welsh.
- **Staðalfrávik reiknað:** Hlaupandi staðalfrávik síaða hröðunarmerkisins án niðursköpunar er reiknað. Gluggastærðin er 1 s eða 200 stök m.v. 200 Hz söfnunartíðni. Staðalfrávikíð er vistað í miðgildið.
- **Niðursköpun staðalfráviks:** Síaða hröðunarmerkið og staðalfrávikíð eru svo niðursköluð á 1 Hz og vistuð með GPS-gögnum. Reiknað er með að þetta fylki sem hefur stöðugt tímamerki, staðsetningu, UTC-tíma, flughraða og hlaupandi hröðun og staðalfrávik í 1 s glugga.
- **EDR reiknað:** Ef grunnupplýsingar um mæliflugvélinu liggja fyrir (I , massi og flughraði) má reikna EDR á einnar sekúndu fresti sem fall af staðalfrávik. Taka má síðan meðaltal EDR yfir lengri tímabil, og t.d. reikna hæsta EDR í ákveðnum tímaglugga til að fá peak EDR.
- **Gröf og myndir:** Myndræn framsetning gagna er nauðsynleg til gögn geti verið skoðuð í smáatriðum og þannig reynt að tryggja að mælingarnar séu í lagi. Nokkrar myndir eru teiknaðar upp. T.d. fossamynd, Welch-graf og síað merki í tíma til að kanna tíðni hegðun. Eiginlegar niðurstöður í formi EDR upplýsinga eru teiknaðar sem fall af tíma, og oft með öðrum stærðum eins og flughæð eða flughraða. Með því að flytja EDR yfir í Google Earth má skoða EDR í landfræðilegu samhengi. Einnig hefur EDR verið sett í hæðarlínurit til skoðunar. \LaTeX .

2 Gloppur í gögnum

Óhjákvæmilega kemur það fyrir að mælingar truflast og skilur þá mælitölvan eftir tímabil (gloppu) án mælinga. Nauðsynlegt er að gera ráð fyrir þessu í eftirvinnslu gagna, og gera viðeigandi ráðstafanir til að gloppur valdi ekki skekkjum í niðurstöðum. Dæmigerð mæliferð byggir á röð sem er 654510 tímaskref, þar af 333759 í mælisvæðinu með 2639 gloppur (punktur sem vantar). Hingað til hefur lengsta samfellda gloppa verið um 100 mælingar eða 0.5 sekúnda. Nauðsynlegt er að bæta úr gloppunum til að tryggja að síun, tíðnigreiningar, meðaltöl og staðalfrávik verði rétt metin. Algengar úrbætur eru að:

- halda síðasta þekktu gildi þar til nýtt gildi kemur
- setja inn það gildi sem næst er og þekkt, en það virkar eins og a) þangað til styttra er í næsta mælda gildi, þá er það tekið
- setja inn fast gildi sem næst meðaltalinu sem er í okkar tilfelli 0
- setja inn gildi sem fylgja vel meðaltalinu og staðalfrávikí sem búast má við, og minnka þannig áhrif gloppanna á niðurstöður.



Mynd 1: Hér má sjá tilbúin dæmi þar sem aðferðunum er beitt. Í aðferð d) má sjá hvernig græna merkið er afritað þar sem gögn vantar, þau hafa því nokkurnvegin sambærileg gildi og vænta má yfir allt merkið, hvað meðaltal og staðalfrávik varðar.

Úrbætur á 200 Hz gögnunum er vandasöm því aðferðir a), b) og c) að ofan geta sett inn gildi sem virðast vera hröðunarmerki á lágrí tíðni sem ekki síast út í frekari vinnslu og geta því valdið skekkju í EDR mati. Eftir tölverða athugun og prófun virtist heppilegast að fara leið d) að ofan með því einfaldlega að sía gagnaröðina miðað við 200 Hz eins og hún kemur fyrir. Þegar síðan röðin er endursöfnuð á 10 Hz á fyrirfram ákveðna tíma (*e. downsampled*) er bætt úr gloppum með aðferð b) að ofan og gefur það góða raun og veldur ekki merkjanlegum skekkjum í niðurstöðum.

Staðsetningu (GPS) er safnað með 1 Hz tíðni og þó gloppur komu fyrir er leið b) að ofan nægilega góð til að fylla upp í þær gloppur.

3 Niðurstöður

Heildstæður og nýtsamlegur kóði er kominn til. Hann mætti þó aðeins snyrta og taka saman, en nokkrar skrár innihalda kóðann sem framkvæmir það sem leitast er eftir.

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Skoðun á innra suði mælis

Skrifað af:

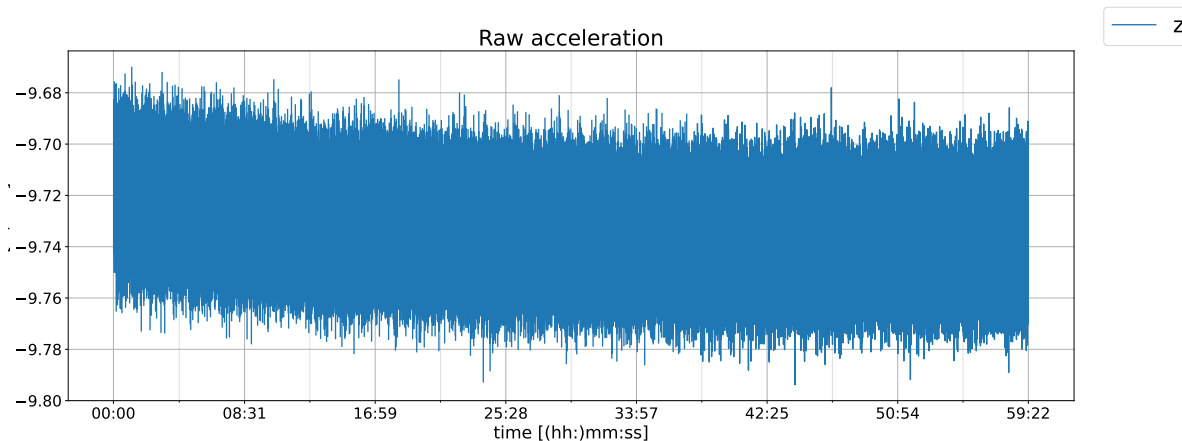
Jóhannes Bergur Gunnarsson

27. september 2021

1 Inngangur

Ákveðið var að skoða innra suð mælis og skoðað af hvaða stærðargráðu það gæti verið. Pixhawk 4 tölva var sett út á svalir og látið sitja í um það bil eina klst. Hér var markmið að fá nægilegt magn af gögnum til þess að sjá örugglega allt sem gæti leynst í gagnasafninu. Veður var með öllu kyrrt og því engir vindar að færa mælinn til, amk af þeirri stærðargráðu að mælirinn hreyfðist ekki af þeim völdum. Mælirinn var utandyra svo GPS-samband myndi nást. Til þess að það myndi ekki rugla í mælingum að vera án sambands.

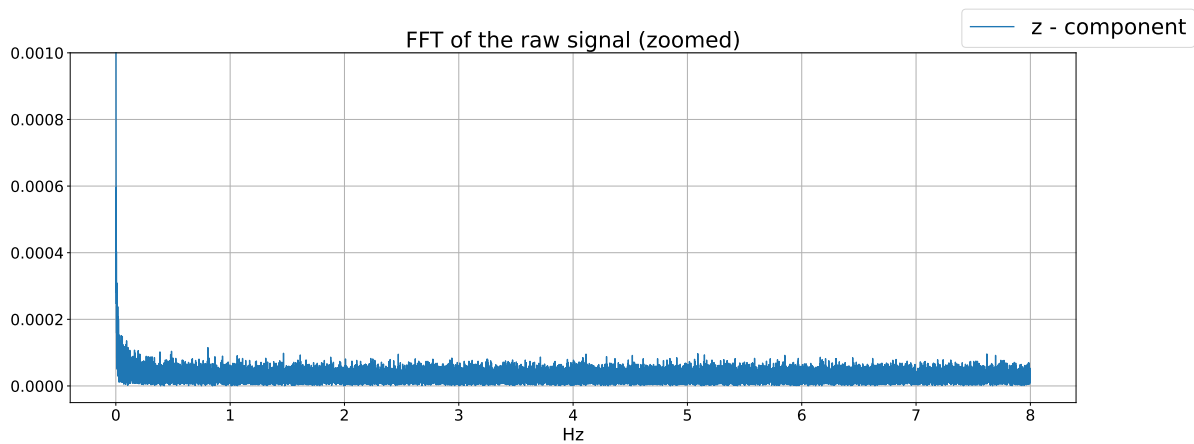
Eftir gagnasöfnun voru gögnin flutt í tölvu og unnin þar með Python kóða.



Mynd 1: Hrá gögn úr tölvunni, beint lesin inn. Heildarfærslan sem gögnin virðast taka er vegna hitanum utandyra og að hitinn á mælitölvunni sé að lækka.

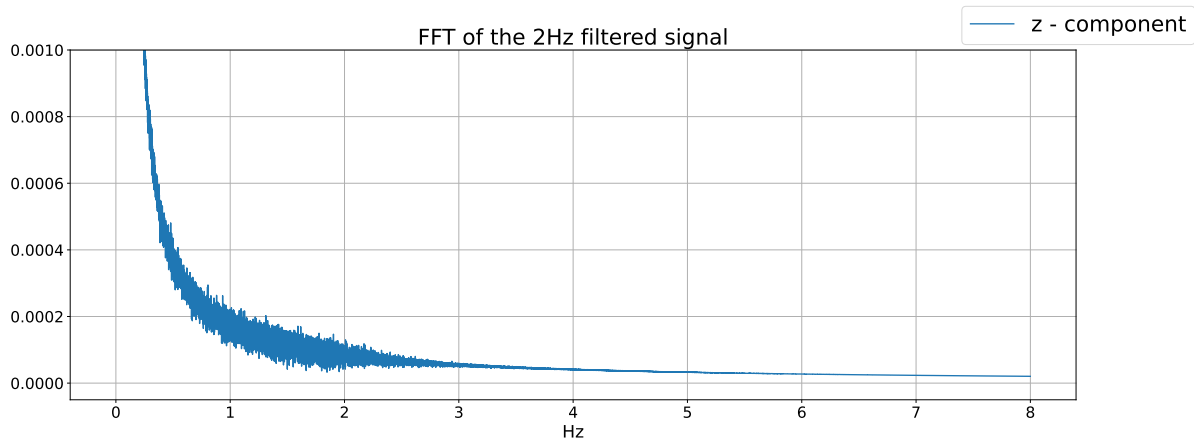
Hér má sjá að suð er eitthvað er fyrst og fremst virðist útslag vera t.d $(-9.68) - (-9.76)$ $[\text{ms}^{-2}]$ sem gerir útslag í kringum 0.04 $[\text{ms}^{-2}]$. Á myndinni sést að meðaltalið lækkar eitthvað fyrsta hálf tímann og skýrist það af lofthita sem er lægri en hitinn á tölvunni og hitastig lækkar aðeins. Þetta gerist samt á tíðni sem er fyrir utan það svið sem er skoðað og þar fyrir utan þá er þessi breyting svo hæg að hún myndi ekki sjást á því hlaupandi meðaltali sem er unnið með í þessu verkefni.

Það sem er áætlað að fá út úr þessu að mæliskekkja, kunnir hún að vera, er að hún sé hvítt suð. Hér er því tíðnisviðið til skoðunar. Áður en merkið var síað með þeim aðferðum sem merkið er venjulega síað við þá er horft til tíðnisvið hvíta suðsins



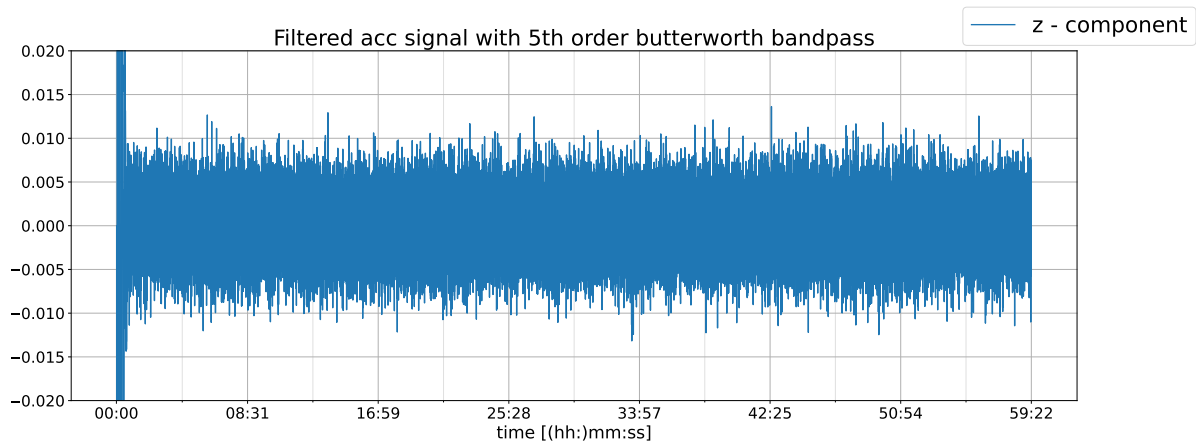
Mynd 2: Hér má sjá tíðnisvið merkisins. y -ás grafsins er útslag hveðrar bylgju og hefur því einingarnar [ms^{-2}].

Af þessari mynd má sjá að útslag er nánast ekki til staðar það er af svo lítilli stærðargráðu. En næst skal skoða sambærilega mynd nema þegar búið er að sía merkið. Síað var með fimmtu gráðu Butterworth síu með neðri mörk í 0.1 Hz og efri mörk sett í 2.0 Hz.



Mynd 3: Hér er búið að sía merkið með efri mörk síunnar í 2 Hz.

Hér virðist sían draga aðeins upp hvíta suðið. Hér eru því eiginleikar síunnar að koma fram. En hér má þó sjá að það er langt fyrir neðan öll mörk þess sem er skoðuð af okkar verkefni. Hér er því hægt að segja með mikilli vissu að suð sem kemur frá mælinum er óverulegt. Ef tímaröðin er svo skoðuð eftir síun kemur eftirfarandi í ljós að stærðargráðan á suðinu er um 0.005 m/s^2 með mesta útlag í kringum 0.01 m/s^2 .



Mynd 4: Tímaröðin eftir síun. Hér má sjá að stærðargráða suðsins er í kringum 0.005 m/s^2 með mesta útlag í kringum 0.01 m/s^2 .

2 Niðurstaða

Mælt var utandyra í kyrru veðri og gögnin skoðuð. Hér var suðið til skoðunar og eins og má sjá á þeim gröfum sem hér fylgja að suðið er langt fyrir neðan þau skoðunarmörk sem við erum að mæla ókyrrð í lofti.

HÁSKÓLINN Í REYKJAVÍK

Technical memo



Staðgöngufall fyrir kvikusvörunarstuðulinn

Skriafað af:

Jóhannes Bergur Gunnarsson

16. júlí 2021

1 Inngangur

Jafnan sem lýsir EDR er

$$\text{EDR}^2 = \varepsilon^{2/3} = \frac{\sigma_z^2}{0.7 \cdot V^{2/3} \cdot I^*(\omega, \omega_1, \omega_2)} \quad (1)$$

Þar sem I^* er heildi sem oft er lýst á eftirfarandi hátt og er tekið mið af því í eftirfarandi skýrslu.

$$I^*(\omega, \omega_1, \omega_2) = \int_0^\infty |H_{bp}(\omega_1, \omega_2, \omega)|^2 |H_w^z|^2 \omega^{-5/3} d\omega \quad (2)$$

Þar sem H_{bp} er bandhleyphisía sem afmarkar þær tíðnir sem um ræðir til skoðunar. Ekki er alveg búið að ákveða á þessum tíma hvort efri mörk verði 2Hz eða 5Hz. Í þessari skýrslu miðast við 5Hz þó það breyti ekki miklu um niðurstöður þessarar skýrslu nema smávægileg mögnun/dempun á lokatölum. Til einföldunar þá verður það gert þannig í þessum útreikningum að heildismörkum verður breytt í efri og neðri mörk tíðninnar sem um ræðir í síunni. Auðvitað er sían ekki fullkomin, en einnig þá yrði um 3dB lækkan á tíðninni sem um ræðir fyrir hvert stig síunnar. Notuð hefur verið fimmtugráðu Butterworth sía í Python á gögnin. En I^* reiknast þá með eftirfarandi jöfnu

$$I^*(\omega, \omega_1, \omega_2) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_w^z|^2 \omega^{-5/3} d\omega \quad (3)$$

Vegna samræmingar ofl. milli mismunandi greina er I oft kallað það sem er I^* í þessari skýrslu. Hér er notast við I þannig að

$$\text{EDR}^2 = \frac{\sigma_z^2}{I}$$

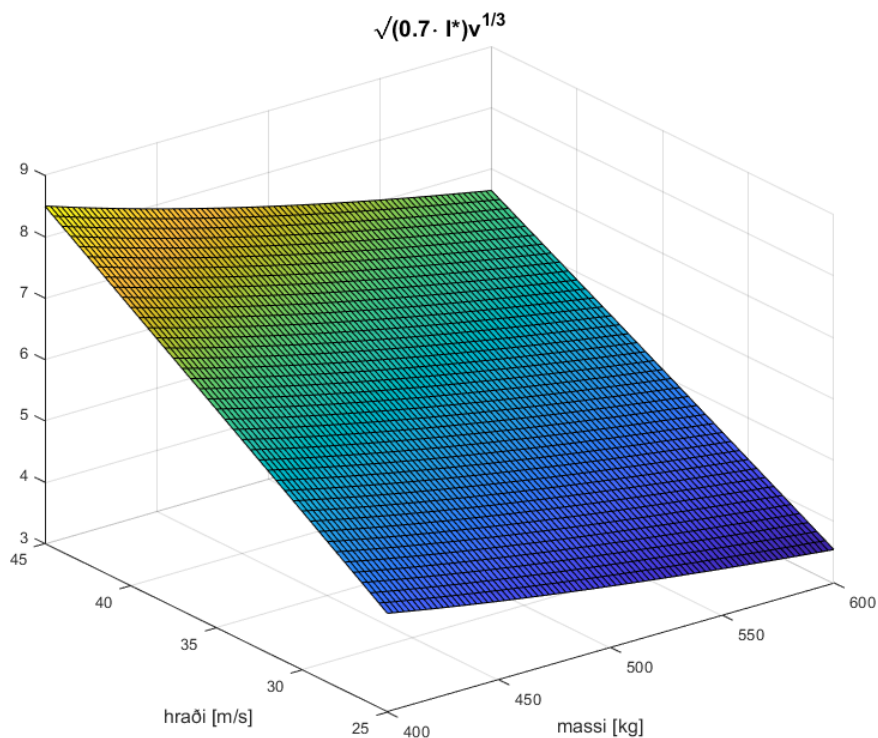
þannig að

$$I = I^* \cdot 0.7 \cdot V^{2/3} \quad (4)$$

2 Samanburður

Matlab var einfaldlega notað til þess að reikna I^* og það sem því við kemur. Það tekur mið að yfirfærslufallinu þar sem Küssner og Wagner eru með tvo póla. Yfirfærslufallið var reiknað og stuðlar nefnara og teljara voru dregur úr og notast við innbyggða Matlab-fallið `polyval`. Búinn var til vigur fyrir $\omega = [0.1 \cdot (2\pi), 5 \cdot (2\pi)]$ og bilið látið vera $0.01 \cdot (2\pi)$ sem einnig var sett inn í Matlab fallið, nema margfaldað við j , þar sem $s = j\omega$. Því næst var stærð tvinntölunnar reiknað og sett í annað veldi. Að lokum var margfaldað við $\omega^{(-5/3)}$. Þannig er fallið sem heilda skal komið. Næst er það heildað tölulega og eitt gildi fyrir I^* fæst. Nú til þess að einfalda hlutina er reiknað allur nefnarinn, I , reiknaður.

Hér sést að nefnarinn er ekki mjög næmur fyrir massa, þó það væri ágætt að hafa í huga massa á milli ferða, t.d. ef auka farþegi er um borð eða eldsneytistankar fullir eða hálfir. Þ.e.a.s. ekki eru miklar áhyggjur fyrir þeim massa sem vélin brennur á einni ferð.



Mynd 1: Nefnarinn í jöfnu 1 sem fall af massa og hraða.

Hins vegar þá er næmni fyrir hraða óþarflega mikil. Ef það er skoðað aðeins betur þá fæst eftirfarandi mynd.

Þar sem flugmaðurinn stefnir á að halda föstu afli á vélinni, þá helst flughraði almennt fasti í sömu átt. Ef hraði breytist um 5 m/s þá breytist nefnarinn um t.d. á milli 30 m/s og 35 m/s frá 4.3 \rightarrow 5.1 sem er aukning um 19%. Hér þarf því aðeins að skoða hraðann. Hvort sem það er með raunhraða eða GPS-hraða og leiðréttu það á einhvern sanngjarnan hátt.

Staðgönguföll eru oft notuð þegar hið raunverulega fall er flókið og tekur langan tíma að reikna. Þar sem $I(M, V)$ krefst þess að heildað sé í hvert skipti myndi þetta flokkast til flókins fall og hér verður því gerð skil á þeirri nálgun að finna fall sem er einfalt módel og verður notast við línulegt fall. Sem hefur jöfnuna

$$S_1(x) = \lambda_0 + \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2$$

á fylkaformi væri það:

$$X \vec{\lambda} = \vec{y}. \tag{5}$$

Þar sem

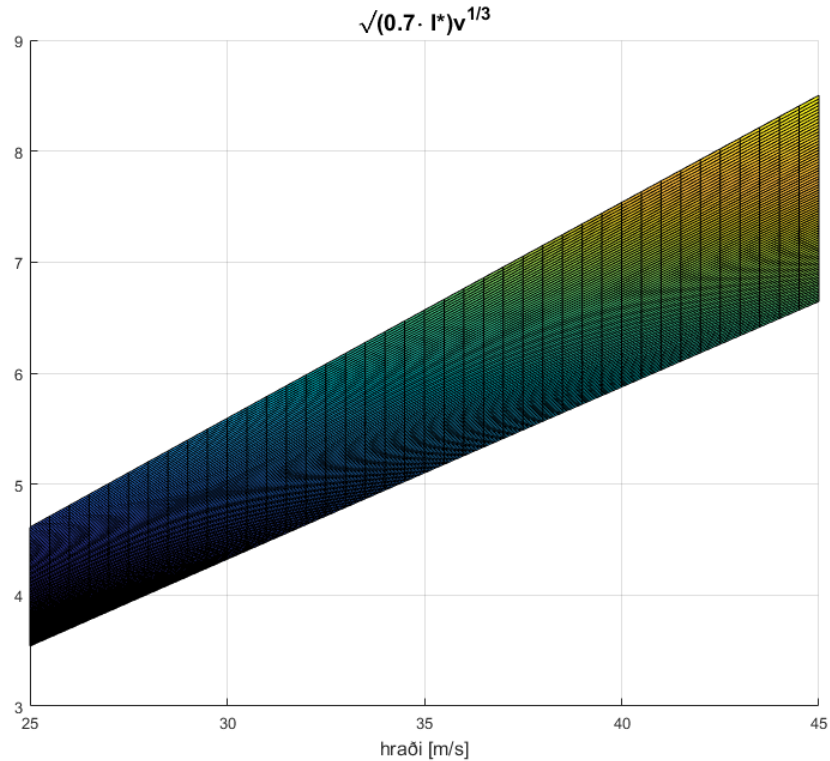
$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{2,1} \\ 1 & x_{1,2} & x_{2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1,N} & x_{2,N} \end{bmatrix}$$

Þar sem N er fjöldi réttra punkta gefnir. Sem eru þeir punktar sem sjást á myndum 1 og 2, sem eru margir fyrir meiri nákvæmni.

Stuðlafylkið er þá svona fyrir línulega nálgun

$$\vec{\lambda} = [\lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \lambda_2]^\top$$

og \vec{y} er vigur sem inniheldur rétt svör.

Mynd 2: I sem fall af massa og hraða.

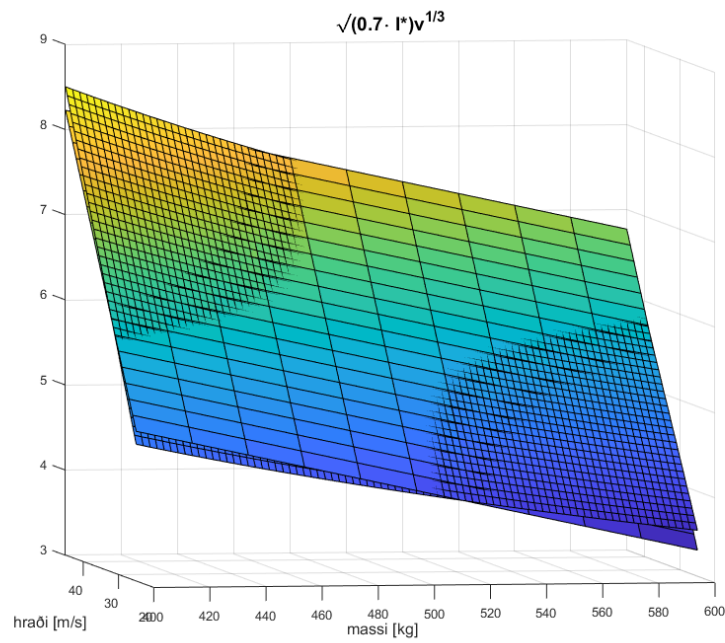
Þar sem fylkið í jöfnu 5 er ekki ferningsfylki heldur með fleiri línur en dálka er ekki til nákvæm lausn, en lausn minnstu kvaðrata er

$$\vec{\lambda} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{y} \quad (6)$$

Það sem fékkst úr MATLAB var

- $\lambda_1 = 3.931419$
- $\lambda_2 = 0.186879$
- $\lambda_3 = 0.007786$

Þegar það fall var lagt sem plan yfir raunverulegt gildi fékkst það sem sést á mynd 3. Á þessari mynd sést að línulega nálgunin er alveg nægilega góð með töluvert litla skekkju eins og má sjá myndrænt.



Mynd 3: Hér má sjá hvernig stórmöskva nálgunin fellur mjög vel að raunverulegum gildum með lítilli skekkju.

3 Niðurstaða

Hér er komið línulegt fall af tveimur breytum sem hægt er að hafa í Python kóðanum þannig að hægt sé að nota hraða upplýsingarnar sem eru mældar í hverjum punkti. Það passar mjög vel að nánast línulegu sambandi sem myndast þegar I er reiknað.