

Nýting gervitunglagagna til viðvörunar vegna eldgosa og gróðurelda og til greiningar á útbreiðslu gosösku

Inga Rún Helgadóttir
Hrund Valgeirsdóttir
Hróbjartur Þorsteinsson
Þröstur Þorsteinsson

Nýting gervitunglagagna til viðvörunar vegna eldgosa og gróðurelda og til greiningar á útbreiðslu gosösku

Inga Rún Helgadóttir, Háskóla Íslands
Hrund Valgeirsdóttir, Háskóla Íslands
Hróbjartur Þorsteinsson, Veðurstofu Íslands
Þröstur Þorsteinsson, Háskóla Íslands

Skýrsla nr.: VÍ 2010-009	Dags.: Desember 2010	ISSN: 1670-8261	Opin Lokuð Skilmálar:
------------------------------------	--------------------------------	---------------------------	--

Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Nýting gervitunglagagna til viðvörunar vegna eldgosa og gróðurelda og til greiningar á útbreiðslu gosösku	Upplag: 20
	Fjöldi síðna: 29
Höfundar: Inga Rún Helgadóttir, Hrund Valgeirsdóttir, Hróbjartur Þorsteinsson og Þröstur Þorsteinsson	Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir
	Verkefnisstjóri: Hróbjartur Þorsteinsson
Gerð skýrslu/verkstig:	Verknúmer: 3443-0-0001

Unnið fyrir:

Styrk úr Nýsköpunarsjóði námsmanna

Samvinnuaðilar:

Jarðvísindastofnun Háskólans

Útdráttur:

Tímanlegar viðvaranir vegna eldgosa, gróðurelda og útbreiðslu gosösku eru æskilegar til að koma megi í veg fyrir tjón. Í kjölfar eldgoss í Eyjafjallajökli vorið 2010 hefur verið unnið að því að virkja sjálfvirkar aðferðir sem greina hitafrávik nær samstundis með gervitunglagögnum. Þær eru nú í tilraunakeyrlum á Veðurstofu Íslands. Aðferðir við greiningu gosösku og annarra svifagna í gervitunglamyndum voru einnig þróaðar og bættar til að fækka tilvikum rangrar greiningar, og ennfremur til að auka tækifæri til nýtingar gagnanna. Nú er hægt að greina útbreiðslu smárra agna í lofthjúpnnum, skoða breytingar í stærð meðalagna og áætla hæð gosmakkar með meiri vissu. Lagður hefur verið grunnur að greiningu agnastærða og magns ösku í gosmekki.

Lykilorð:

Gervitunglagögn, eldgos, gróðureldar, gosaska, svifagnir, hitafrávik

Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:



Undirskrift verkefnisstjóra:



Yfirfarið af:

ÞA, OSig, SG

Efnisyfirlit

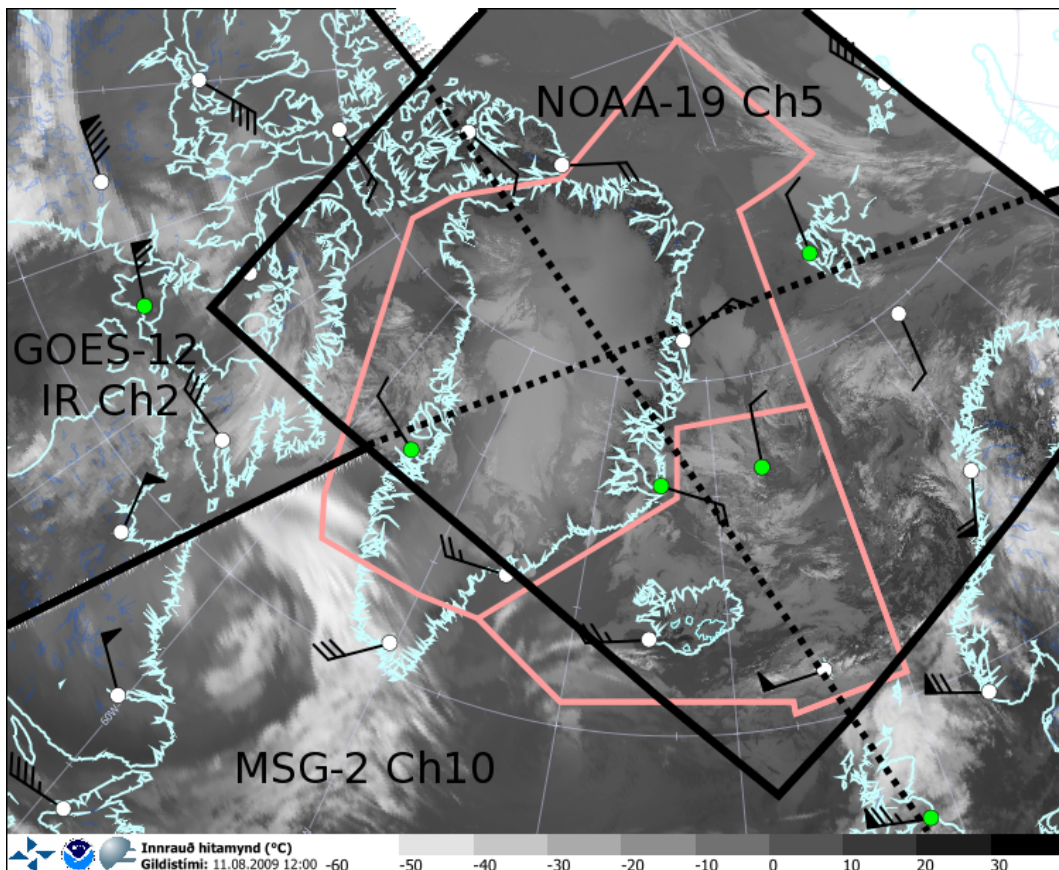
1	Inngangur.....	7
1.1	Markmið og hagnýtt gildi.....	8
2	Hitafrávik.....	9
2.1	Aðferðafræði.....	12
2.1.1	Hitafráviksþröskuldur.....	12
2.1.2	Bestun á hitafrávikslíkani.....	13
2.1.3	Hugmyndir að frekari þróun.....	16
2.2	Niðurstöður.....	16
3	Sviföskugreining.....	19
3.1	Aðferðafræði.....	19
3.1.1	Öskuþröskuldur.....	22
3.1.2	BTD_0 leiðrétting.....	24
3.2	Niðurstöður.....	24
	Heimildir.....	27
I	Viðauki. Hitafrávikskerfi.....	28
II	Viðauki. Öskugreiningarkerfi.....	29

Myndaskrá

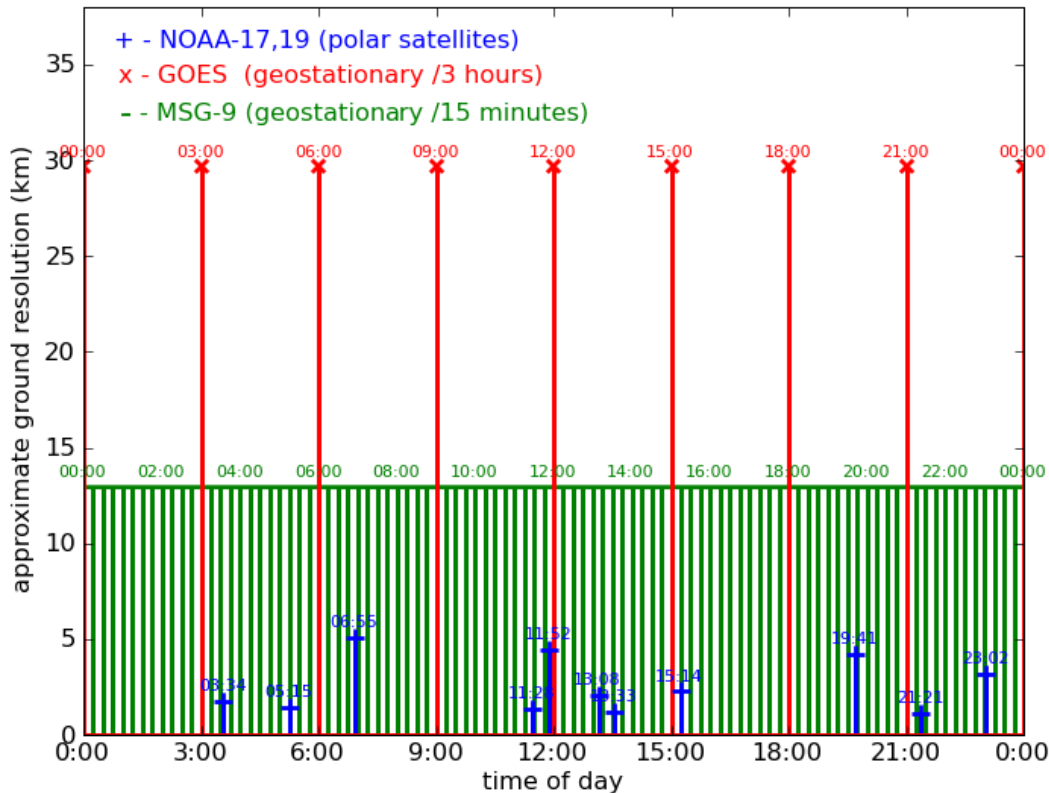
Mynd 1.	Þakning veðurtunglamynda við Ísland.....	7
Mynd 2.	Tíðni og upplausn veðurtunglamynda.....	8
Mynd 3.	Geislastyrkur: Sól, eldgos, land og ský.....	10
Mynd 4.	4 μ m rás MSG sýnir eldgos á Fimmvörðuhálsi.....	11
Mynd 5.	Stöplarit af NTI gildum.....	13
Mynd 6.	Hitafrávikslíkan.....	14
Mynd 7.	Sjálfvirkt viðvörðunarkort, Mýraeldar.....	17
Mynd 8.	Sjálfvirkt viðvörðunarkort, Hvaleyrarvatn.....	17
Mynd 9.	Hitafráviksgreining með NTI -stuðli og bestunarsvæði.....	18
Mynd 10.	Orkulosun í gróðureldunum á Mýrum.....	18
Mynd 11.	Algengt líkan, þunnt lag af svifögnum.....	20
Mynd 12.	BTD á móti T_{11} hermun og mælingar (Wen og Rose (1994)).....	21
Mynd 13.	Áhersla $BTD \times g $ vísis.....	21
Mynd 14.	Samanburður á öskuþröskuldum.....	23
Mynd 15.	Dreifirit sem sýnir greiningu öskulegra reita.....	24
Mynd 16.	Öskugreining úr eldgosinu í Eyjafjallajökli 6. maí 2010.....	25
Mynd 17.	Öskugreining úr eldgosinu í Eyjafjallajökli 14. maí 2010.....	26
Mynd 18.	Flæðirit fyrir hitafráviksgreiningu.....	28
Mynd 19.	Flæðirit fyrir öskugreiningu.....	29

1 Inngangur

Eldgos, gróðureldar og gosaska er vá sem æskilegt er að bregðast við sem fyrst til að koma í veg fyrir tjón. Þessir atburðir gera mjög vart við sig á innrauðum og nær-innrauðum rásum gervitungla. Myndavélar um borð í jarðrannsóknatunglum og ýmsum veðurtunglum nýtast vel til eftirlits með slíkri vá. Sem aðili að evrópsku veðurtunglastofnuninni (EUMETSAT) hefur Veðurstofa Íslands (VÍ) aðgang að gögnum í rauntíma (3–7 mín seinkun) frá öllum helstu veðurtunglum sem mæla geislun yfir Íslandi, og einnig aðgang að gögnum úr jarðrannsóknatunglum NASA sem fást í nær rauntíma (2–3 klst seinkun). Á VÍ eru í gangi grunnkerfi til kvörðunar og vinnslu á gögnum úr geislunarmælum í veðurtunglum, AVHRR og SEVIRI myndavélum, og úr rásum MODIS myndavélar um borð í Terra og Aqua tunglum NASA. Fjölmargar daglegar geislunarmælingar eru teknar af Íslandi með hefðbundnum veðurtunglum. Mynd 1 og 2 sýna þakningu þriggja mismunandi veðurtunglamynda með dæmigerðri tíðni og upplausn mynda. Þess má geta að upplausn og tíðni MODIS hitamynda eru sambærilegar AVHRR gögnum. Grunnur til þróunar sjálfvirkra kerfa tengdum þessum gögnum var til staðar á VÍ, þegar tveir nemendur voru fengnir í tvö verkefni.



Mynd 1. Dæmigerð þakning veðurtunglamynda við Ísland. Til að ná yfir allt flugumferðarstjórnarsvæði Íslands (rauð lína) þarf myndir úr sístöðutunglum og tunglum á pólbroti.



Mynd 2. Stöplartíð sýnir dæmigerða tíðni og upplausn veðurtunglamynda af Íslandi á degi hverjum. MSG-SEVIRI myndirnar eru flestar en hafa ekki bestu upplausn. NOAA-AVHRR mælingar eru færri en gefa betri upplausn.

Verkefnin voru hugsuð fyrir tvo námsmenn og fólust í notkun fjarkönnunargagna:

- Þróun á sjálfvirku viðvörunarkerfi vegna hitafráviks við jörðu. Slíkt kerfi nýtist til viðvörunar vegna eldgosa og gróðurelda. Auk þess nýtist það til kortlagningar á útbreiðslu og tíðni þessara atburða.
- Þróun á sjálfvirkri greiningu á gosösku og smáum ögnum. Þetta er æskilegt til að tryggja flugöryggi á flugumsjónarsvæði Íslands. Einnig myndi sjálfvirk greining á smáum ögnum, t.d. í sandstormum, nýtast til að meta magn, útbreiðslu og tíðni slíkra atburða.

Verkefnin studdust við samskonar gögn og þróunin því að miklu leyti samnýtanleg.

1.1 Markmið og hagnýtt gildi

Meginmarkmið verkefnisins var að þróa sjálfvirkar aðferðir til að greina hitafrávik við jörð með gögnum frá ýmsum gervitunglum. Einnig er mögulegt að reikna út stærð og hitastig þess svæðis sem gefur frá sér varma og þar af leiðandi einnig orkuútlösun. Hitafrávik, nánar tiltekið mismunahiti, er einnig notað til að meta magn og dreifingu gosösku og smárra agna. Markmiðið er að koma niðurstöðum til skila á vefsíðu VÍ í rauntíma. Stefnt er að því að hanna kerfið þannig að viðvörun skilar sér beint til vakthafandi sérfræðinga.

Hagnýtt gildi felst meðal annars í:

- Bættri vöktun, viðvörunum og spám í tengslum við gróðurelda, eldgos, öskufall og gosösku í háloftum.
- Bættri þjónustu gagnvart Alþjóðaflugmálastofnuninni (ICAO).
- Bættri þekkingu og reynslu af túlkun upplýsinga frá gervitunglum.
- Viðvörunum vegna hitafrávika sem geta í sumum tilvikum borist áður en menn verða varir við atburðinn á annan hátt.
- Bættum aðferðum við úrvinnslu gagna til eftirlits með gosösku í háloftum.
- Lengri fyrirvara til rýmingar og þar með björgunar mannlífa.
- Lengri fyrirvara til slökkvistarfa vegna gróðurelda.

Slíkt kerfi gæti nýst vel til að koma upplýsingum um eldgos og gróðurelda til viðbragðsaðila um leið og þær birtast í gögnum sem gervitunglin safna, en gildi þess er ótvírætt þegar hugað er að tækifærum til rýminga eða slökkvistarfs. Einnig nýttist kortlagning hitafrávika við mat á tíðni og staðsetningu gróðurelda, og stærð og ákafa eldgosa. Gervitunglagögn eru í þessu samhengi sérlega mikilvæg vegna þess að hitafrávik á óaðgengilegum svæðum eða svæðum fjarri byggð greinast á sama hátt og á öðrum svæðum.

2 Hitafrávik

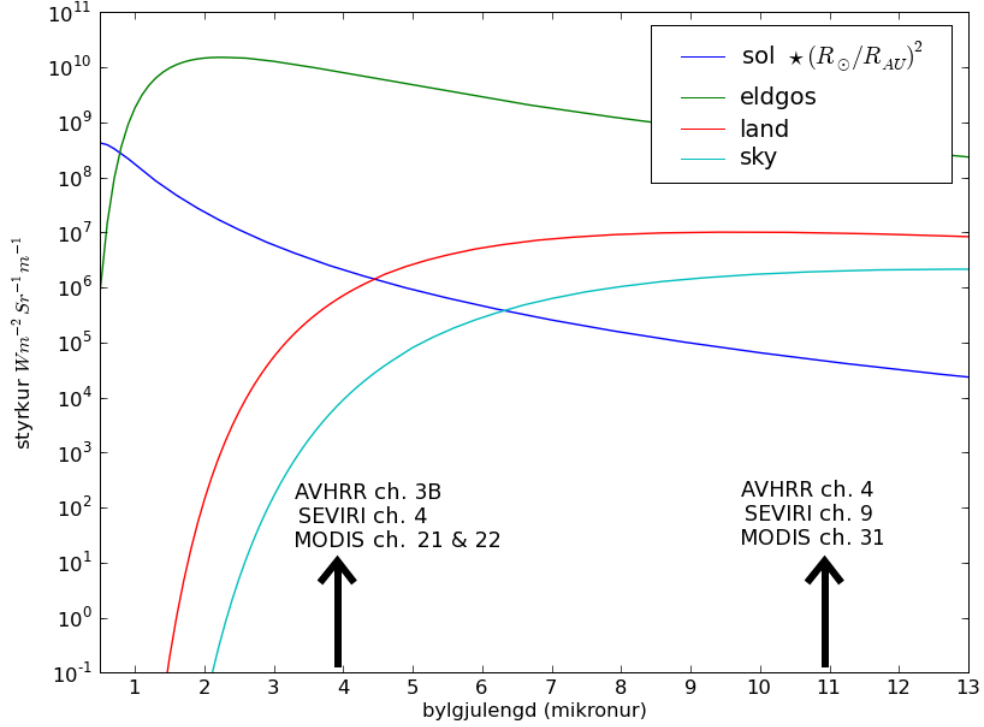
Innrauðar bylgjulengdir ljóss (e. thermal IR) á bilinu $\sim 3\text{--}15\ \mu\text{m}$ (oft kallað míkrónur) eru einna hentugastar í fjarkönnun á hitastigi jarðar og lofthjúps þar sem mikill hluti útgeislunar jarðar og lofthjúps á sér stað á þessum bylgjulengdum. Hitarásir í mælitækjum gervitungla eru margar staðsettar í lofthjúpsgluggum í kringum bylgjulengdirnar 4, 8 og 11 μm svo að auðveldara sé að mæla hitastig við jörð og yfirborð skýja.

Svarthlutarnálgunin er oftast viðeigandi á þessu bylgjusviði og sérstaklega þar sem ekki er þörf meiri nákvæmni en 1 K ($\pm 1^\circ\text{C}$). Samkvæmt Planck lögmálinu er útgeislun svarthlutar,

$$I_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

þar sem T er hitastig í kelvin, h er Planck fastinn, c er ljóshraði, k er Boltzmann fastinn og λ er bylgjulengd. Auðvelt er að nota jöfnu Plancks og umreikna mælda geislun yfir í samsvarandi hitastig, en þá er vaninn að kalla mælinguna birtuhitastig (e. brightness temperature).

Dæmi um geislun í umhverfi jarðarinnar eru gefin á mynd 3. Þar sést hvernig sól-argeislar yfirgnæfa styttri bylgjulengdir og hvernig útgeislun jarðar ræður ríkjum á lengri bylgjulengdum. Þar sem sólin yfirgnæfir ekki á 11 μm rásinni þá er sú rás hæf



Mynd 3. Geislstyrkur svarthlutar (I_λ) sem fall af bylgjulengd (λ) fyrir sól, eldgos, land og ský.

til hitastigsmælinga bæði nótt sem dag, en á 4 μm rásum gætir mikilla áhrifa frá endurkasti sólarljóss.

Athyglisvert er svo að bera saman útgeislun frá eldum og umhverfisgeislun (jörð og ský). Þar sést að við 11 μm rásina geisla eldar um 100 sinnum meira en umhverfið, en við 4 μm rásina geisla eldar um 10.000 sinnum meira en umhverfið. Þessi stórkostlegi munur í geislunarstyrk gerir það að verkum að eldar sem þekja einungis mjög lítið hlutfall af greinihæfni veðurtungls, þ.e. eldar sem loga á hlutfallslega litlu svæði (greinihæfnin er oft $>1 \text{ km}^2$), geta sést afar vel á hitamyndum. Fyrir langar bylgjulengdir $\lambda \gg hc/kT$ má nálga Planck-jöfnuna með línulegu sambandi við hita. Þetta er Rayleigh-Jeans nálgunin,

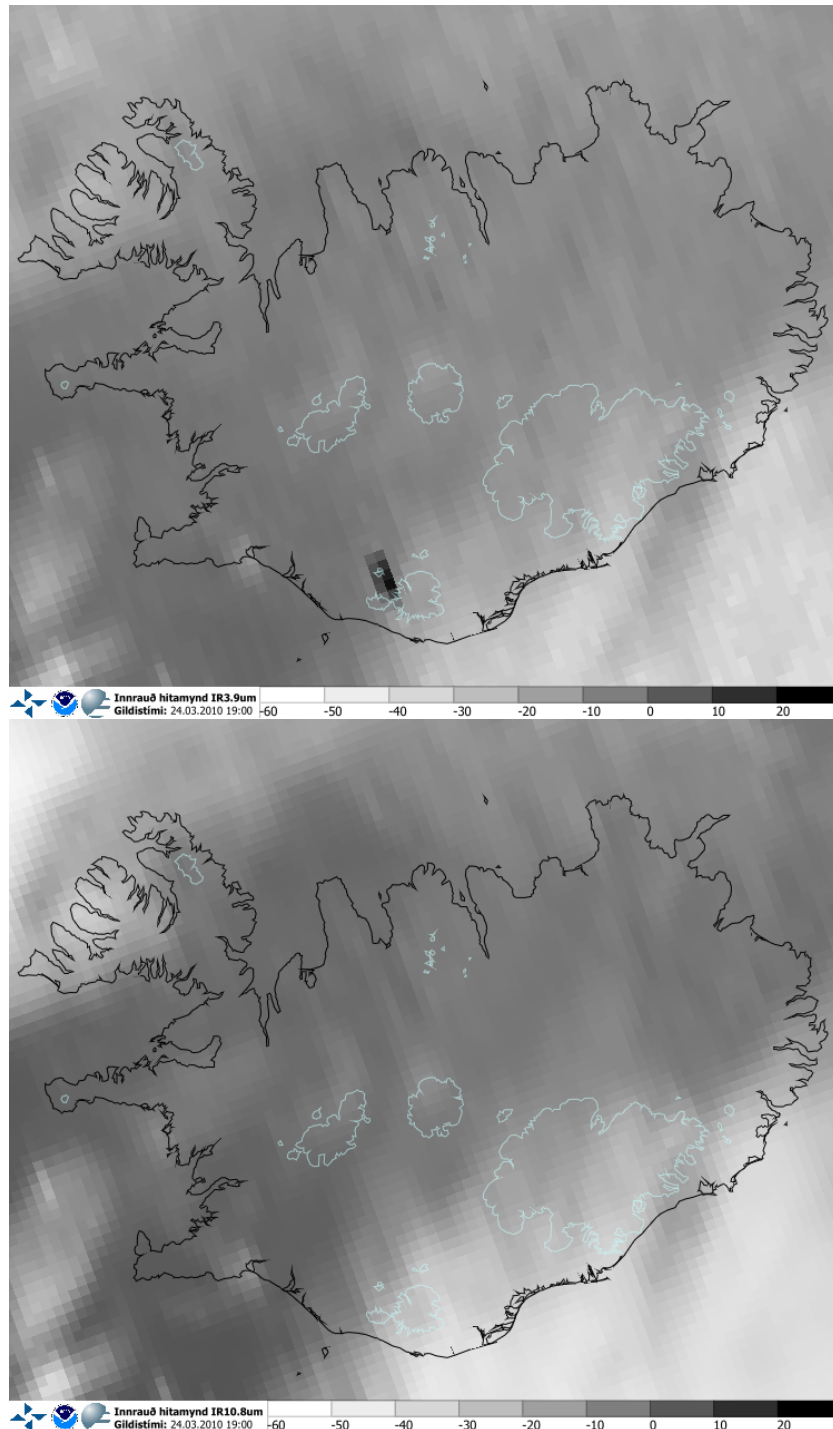
$$I_\lambda \propto T. \quad (2)$$

Fyrir stuttar bylgjulengdir $\lambda \ll hc/kT$, þá á Wien nálgunin við,

$$I_\lambda \propto e^{-hc/\lambda kT}. \quad (3)$$

Rayleigh-Jeans nálgunin er línuleg og leiðir til þess að útreiknað birtuhitastig af nokkrum mismunandi geislurum er í raun meðalhiti þeirra. Wien nálgunin er ólínuleg og gefur heitari svæðum margfalt hærra vægi en kaldari svæðum. Við eðlilegan umhverfshita í lofthjúpunum á Wien nálgunin við um 4 μm rásina, en 11 μm rásin er u.þ.b. mitt á milli Wien og Rayleigh-Jeans svæðisins. Hitamyndir úr gosinu á Fimmvörðuhálsi (sjá mynd 4), teknar með veðurtunglinu MSG-2, sýna hvernig hitafrávikid skín í gegn á 4 μm rásinni en ekki á 11 μm rásinni. Greinihæfni myndavélarinnar í tunglinu er

einungis $\sim 40 \text{ km}^2$ við Ísland og má áætla að gossprungan hafi ekki þakið meira en 0.1% af því svæði.



Mynd 4. Hitamynd af $4 \mu\text{m}$ rás MSG (efri) sýnir eldgosið á Fimmvörðuhálsi þrátt fyrir mjög lága greinihæfni tunglsins. Til samanburðar þá er $11 \mu\text{m}$ rásin (neðri) ekki eins næm fyrir hitafáviki.

2.1 Aðferðafræði

Ákveðið var að framkvæma hitafráviksgreiningu í tveimur skrefum. Fyrri þrepið var að greina frávik í hitastigi með aðstoð hitafráviksstuðuls og hið síðara var að nota hitafrávikslíkan á afmörkuð svæði til ályktunar um ýmsar kennistærðir sem geta nýst við mat á umfangi og þróun elda.

2.1.1 Hitafráviksþröskuldur

Ein þekktasta aðferðin við greiningu á hitafrávikum í hitamyndum úr gervitunglum er MODVOLC reikniritið (Wright o.fl., 2004). Reikniritið byggir á samanburði geislunarstyrks mældum á tveimur hitarásum. Til að greina hitafrávik á jörðu innan hvers reits (e. pixel) er stuðst við stuðul sem kallast *Normalized Thermal Index* (*NTI*) (Wright o.fl., 2004),

$$NTI = \frac{B_4 - B_{11}}{B_4 + B_{11}}. \quad (4)$$

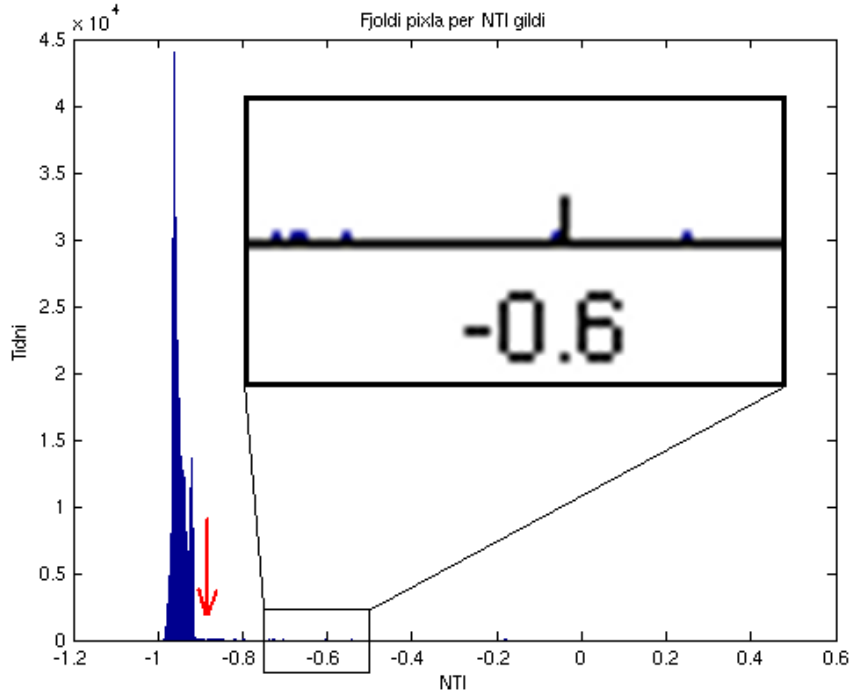
Í jöfnunni er B_4 geislunarstyrkur mældur á $4 \mu\text{m}$ rás gervitungls og B_{11} á $11 \mu\text{m}$ rás. Það má líta á *NTI* sem einskonar mælikvarða á fjölbreytni í hitastigi innan reits á hitamynd. Ef hitasamsetningin innan reits er mjög ójöfn fær B_4 hlutfallslega hátt gildi í samanburði við B_{11} , samkvæmt Wien lögmálinu. Við eðlilegar kringumstæður er *NTI* neikvæð tala, oftast í kringum -9 til -8 , en við mjög ójafna hitasamsetningu, þá getur *NTI* farið yfir 0 , en það fer eftir því hversu stórt hitafrávik er og hversu stórt svæði það þekur.

Í verkefninu var stuðst við gögn úr MODIS-tæki í jarðrannsóknatunglunum Terra og Aqua í eigu NASA. Í MODIS-tækinu eru tvær rásir sem eru næmar fyrir $4 \mu\text{m}$ geislun, rás númer 21 og 22. Rás 22 metstast fyrir en rás 21 en er nákvæmari. Ef metnun á sér stað á rás 22 þá er stuðst við rás 21 í staðinn. Sjaldgæft er að allar rásir metstist, það er helst að slíkt gerist í stærstu skógareldum erlendis.

Í hinu hefðbundna MODVOLC reikniriti er reynt að finna ákveðinn fastan þröskuld á *NTI*. Þröskuldurinn er þá byggður á langri reynslu og stilltur sérstaklega fyrir mismunandi svæði á jarðkringlunni. Þröskuldurinn er ákvarðaður með því að skoða dreifingu *NTI* gilda á stuðlariti. Í athugun okkar á ýmsum dæmum fyrir Ísland sáum við hvernig eðlileg *NTI* gildi klasast þétt saman í kringum $NTI = -9$. Breidd dreifingar á *NTI* gildum virtist þónokkuð háð aðstæðum eins og t.d. skýjafari. Þar af leiðandi þótti okkur eðlilegra að ákvarða virkan þröskuld sem tekur mið af megindreifingu á *NTI* gildum í hverri hitamynd fyrir sig.

Virkur þröskuldur hefur minni tilhneigingu en fastur þröskuldur til að vanmeta hitafrávik vegna sérstakra aðstæðna. Það er þó stillingaratriði hversu mikið bil þarf að setja hægra megin við *NTI* dreifinguna til að ákvarða þröskuldinn. Mynd 5 sýnir dæmi um *NTI* stöplarit með einstaka hitafrávikum vegna gróðurelda sem eru dreifð á hærri *NTI* gildi.

Vegna áhrifa sólarendurkasts á $4 \mu\text{m}$ rásina virkar *NTI* stuðullinn ekki eins áreiðanlega á daginn. Helsta vandamálið eru fletir sem stundum endurkasta miklu sólarljósi. Þetta gildir t.d. um stöðuvötn, sum háský og jafnvel þykka svifösku. Til þess að nýta *NTI*



Mynd 5. Stöplarit af NTI gildum er notað til að ákvarða hitafrávikspröskuld, sem er merktur með rauðri ör. Hitafrávik vegna gróðurelda raða sér síðan á hærri gildi en -0.9 (gildi þröskuldar). Nokkrir myndreitir greinast því sem hitafrávik.

á daginn þarf að fara varlega í túlkun á stuðlinum. Nýlega hefur MODVOLC-teymið gefið út upplýsingar á vefsíðum sínum um hvernig hægt er að fjarlægja helstu áhrif sólarendurkasts í stuðlinum (MODVOLC-team, 2010). Ekki gafst tími innan ramma verkefnisins til að skoða þessa leiðréttingu en það verður gert í áframhaldandi þróun kerfisins.

2.1.2 Bestun á hitafrávikslíkani

Tilbúinn vísir eins og NTI er ekki byggður á eðlisfræðilegu líkani sem lýsir bruna- aðstæðum á jörðu niðri. NTI nýtist afar vel til að nema óeðlilega útgeislun svæða í hitamyndum, en leiðir ekki til beinnar ályktunar um hitastig, útbreiðslu eða orkulosun.

Gagnlegt getur reynst að framkvæma eðlislæga ályktun um brunasvæðið þó að slík ályktun þarfnist mikillar einföldunar. Pröstur Þorsteinsson o.fl. (2008) hafa t.d. beitt tveggja rása aðferð við greiningu á hitamyndum af Mýraeldunum miklu árið 2006. Þá framkvæmir Jet Propulsion Laboratory (JPL) fjölrásagreiningu á svipuðum grundvelli með háupplausnatunglinu EO-1 (Davies o.fl., 2006).

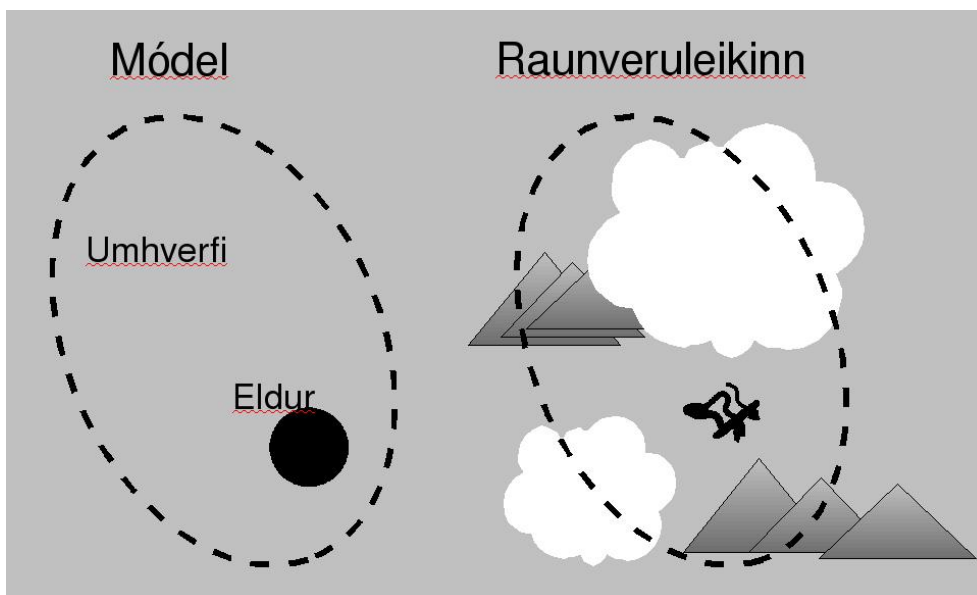
Æskilegt er að virkja slíka aðferð í sjálfvirku rauntímakerfi á Veðurstofunni því það mun leiða til betri skilnings og e.t.v. nýrri og næmari aðferða við hitafráviksgreiningu. Í líkaninu er mæld geislun M á gefinni rás λ , samansett úr tveimur geislurum, þ.e. elda-

svæði og umhverfi,

$$M_\lambda(T_E, T_J, a_E) = I_\lambda(T_E)a_E + I_\lambda(T_J)(1 - a_E), \quad (5)$$

þar sem I er Planck lögmálið, (T_E, a_E) og $(T_J, a_J = 1 - a_E)$ eru hitastig og svæði fyrir elda E og umhverfi J . Almenn er umhverfishitinn T_J nokkuð vel þekktur, en finna þarf lausn fyrir hitastig elds T_E og umfang svæðis a_E . Það þarf því a.m.k. tvær óháðar geislunarmælingar til að geta leyst þessar tvær óþekktu stærðir.

Það er mikilvægt að átta sig á einfaldleika líkansins, en það lýsir oft ekki raunverulegum aðstæðum sérstaklega vel, eins og mynd 6 gefur til kynna. Einfaldar tilraunir við hermingu áhrifa skýjahulu á lausnir gáfu til kynna að tiltölulega lítil skýjhula ($\sim 20\%$) veldur minniháttar hliðrun í lausnum. Við tiltölulega gott skyggni er það landslag og hitastigull í eldum og umhverfi sem leiða til óvissu og hliðrunar í lausnum með þessu einfalda líkani. Vert væri í framtíðinni að rannsaka áhrif landslags og hitastiguls á lausnirnar með líkaninu.



Mynd 6. Hitufrávikslíkanið er mjög einfalt og lýsir best hitafrávikum á flatlendi við tiltölulega skýlausar aðstæður. Hér er myndrænn samanburður á líkaninu (vinstri) og flóknari aðstæðum í umhverfi elda (hægri).

Með samtíma mælingum á 4 og 11 μm rásunum getum við fundið lausn á tveimur stærðum (T_E og a_E) með tveimur ólínulegum jöfnum,

$$\left\{ \begin{array}{l} M_4(T_E, a_E) = I_4(T_E)a_E + I_4(T_J)(1 - a_E) \\ M_{11}(T_E, a_E) = I_{11}(T_E)a_E + I_{11}(T_J)(1 - a_E) \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Þröstur Þorsteinsson o.fl. (2008) leysa jöfnuhneppið með innsetningu og leit að skurðpunkti, en einnig má leysa þessar stærðir með bestun.

Af þessum tveimur möguleikum þá var bestun valin byggð á eftirtöldum forsendum:

- Slíkt kerfi er stækkanlegt (auðvelt að fjölga jöfnum til að nýta fleiri hitarásir í gervitunglum),
- hægt er að breyta hitafrávikslíkani ef það hentar,
- það leiðir til læsilegri kóða,
- og auðveldar athugun á margvíðu viki lausna (sjá Hessian fylki neðar).

Fyrstu rökin eiga sérstaklega við ef forsendur verða í framtíðinni til að gera hitafrávikslíkanið flóknara (fleiri kennistærðir) að gefnum fleiri rásum í MODIS og/eða annarskonar gögnum.

Ákveðið var að vinna með bestun, með því að lágmarka mismun líkans M og mælinga B ,

$$X(T_E, a_E) = \frac{(B_4 - M_4(T_E, a_E))^2}{\sigma_M^2} + \frac{(B_{11} - M_{11}(T_E, a_E))^2}{\sigma_M^2}. \quad (7)$$

Í þessari firð (e. metric) X vantar alla stöðlun með óvissu í mælingunum B eins og eðlilegt er í *chi-square* bestun. Ástæðan er sú að við gerum ráð fyrir að mælingarnar séu mun nákvæmari en líkanið sjálft. Ef óvissan væri í mælingunni sjálfri, σ_B , þá myndi hún e.t.v. vera byggð á ljóseindakliði (e. photon noise), $\sigma_B \propto \sqrt{B}$, eða vera föst tala vegna aflestrarkliðurs í geislanema (e. read out noise), en hér höfum við útbúið handahófskennda kennistærð σ_M vegna mikillar óvissu um hæfi líkansins.

Ef við gefum okkur þær hentugu forsendur að Gauss-líkindi séu hæfilega góð nálgun á líkindum á mælingu B að gefinni kennistærð T_E, a_E ,

$$P(B|T_E, a_E) \propto \exp\left(-\frac{(B_\lambda - M_\lambda(T_E, a_E))^2}{2\sigma_M^2}\right), \quad (8)$$

þá má túlka bestunina sem sennileikaaðferð (e. maximum likelihood).

σ_M stjórnar vægi mælinga í gerð lausnarinnar, en ósennilegt þykir að σ_M sé nærri því að vera fasti. Heldur sennilegra er að frávikid sé minna ef mælingin B er lág og stærra ef mælingin er há. Þetta er þó einungis huglægt mat, en án betri vitneskju um eiginleika σ_M þá var ákveðið að styðjast við vægið

$$\sigma_M \propto B \quad (9)$$

Hessian-fylki er hjáafurð margra reiknirita í bestun og gefur upplýsingar um krappa (e. curvature) í kringum lausnina. Hessian-fylki ásamt stöðvunarviðmiði bestunar er að öllu jöfnu notað til að reikna út óvissu í ályktuðum kennistærðum, en þar sem við höfum enga greiðfæra leið til að mæla eða magnhæfa σ_M þá er ekki hægt að ákvarða stöðvunarviðmið og óvissu í lausninni að svo stöddu. Við getum þó reynt að hlutfallslega greina óvissur á lausnum. Þ.e. við getum skoðað hlutföll í skekkjum á a_E og T_E , og e.t.v. eru einnig forsendur til að bera saman lausnir á mismunandi nærliggjandi svæðum í sömu mynd.

Út frá niðurstöðum fyrir hita og svæði elds er hægt að áætla orkulosun hitafráviks innan reits með Stefan-Boltzmann lögmálinu,

$$a_E \sigma T_E^4 \quad \text{Wm}^{-2}, \quad (10)$$

þar sem σ er Stefan-Boltzmann fastinn, $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$. Orkulosun er þægilegur mælikvaði á hvort um mælanlegt hitafrávik sé að ræða, því ekki dugar að einblína á lausnina fyrir svæðið eða hitastigið eitt og sér.

2.1.3 Hugmyndir að frekari þróun

Það er vel hugsanlegt að sérstök rannsókn á líkaninu við mismunandi þjagandi aðstæður geti leitt til ágætis skilnings á nákvæmni þess fyrir mismunandi svæði og gerð elda. Með tímanum verður í sumum tilvikum hægt að bera saman mannaðar athuganir á eldum til sannreynslu á lausnum kerfisins.

Mögulegt er að fjölga kennistærðum í líkaninu svo að betur sé hægt að aðlaga það raunverulegum aðstæðum, en þá þarf aukaupplýsingar og helst að nýta fleiri ólíkar geislunarmælingar úr gervitunglum. Fjölbreytni hitanema og lofthjúpsglugga er þó takmörkuð. 8 μm glugginn mun geta veitt líkaninu eina kennistærð að auki.

Í hráum birtuhitastigsmælingum gætir einnig áhrifa frá lofthjúpunum sjálfum. Áhrifin eru mest af völdum koltvísýrings og vatnsgufu, en nógu smá ($\sim 0.5\text{--}3\text{K}$) í samanburði við aðrar óvissur svo að hægt sé að sleppa slíkum leiðréttingum í bili. Þar að auki hafa slíkar hliðranir minni áhrif á *NTI*-stuðulinn þar sem hann er staðlaður með heildarstyrk ($B_4 + B_{11}$).

Bestunin í jöfnu 7 er óstöðug þegar lítið eða ekkert mælanlegt hitafrávik er í gögnunum. Þá koma til greina margar misjafnar lausnir, sem þó leiða til lítillar umfram geislunar í samanburði við umhverfið,

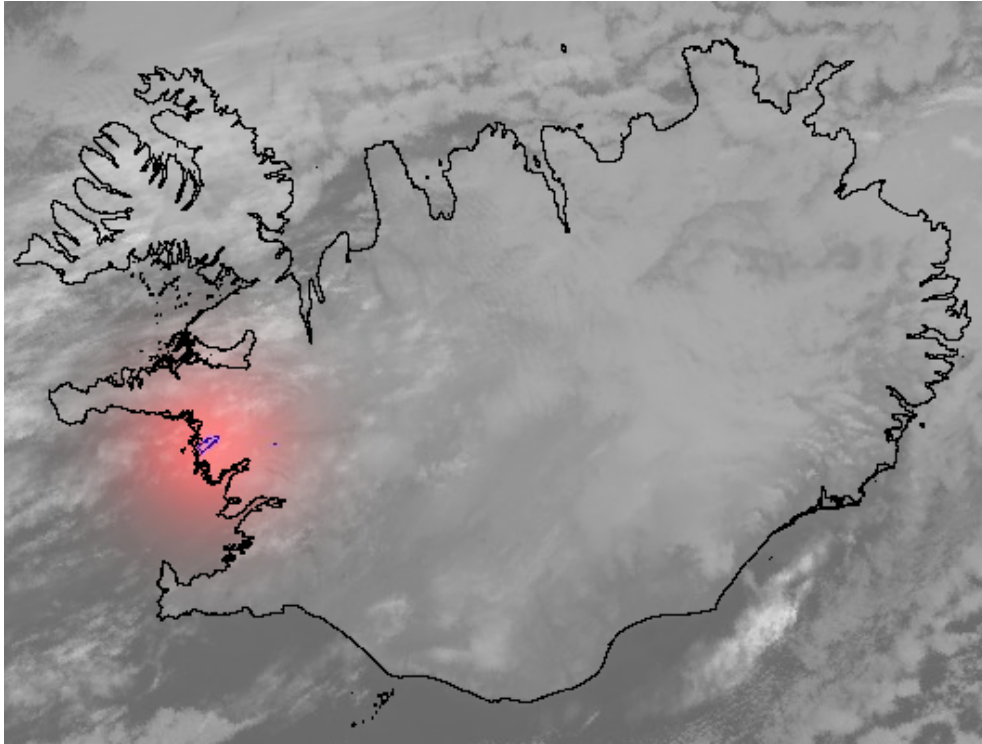
$$a_E T_E^4 \approx (1 - a_E) T_J^4. \quad (11)$$

Lausn í slíku tilviki væri til dæmis $a_E \rightarrow 0$, $T_E \rightarrow \infty$. Æskilegra væri að sjá niðurstöður fyrir a_E og T_E sem eru þægilegri í túlkun, eins og t.d. $a_E \rightarrow 0$ og $T_E \rightarrow T_J$. Möguleiki er að setja bestuninni léttar skorður (e. regularization) til að þvinga fram þægilegri og myndrænni lausnir.

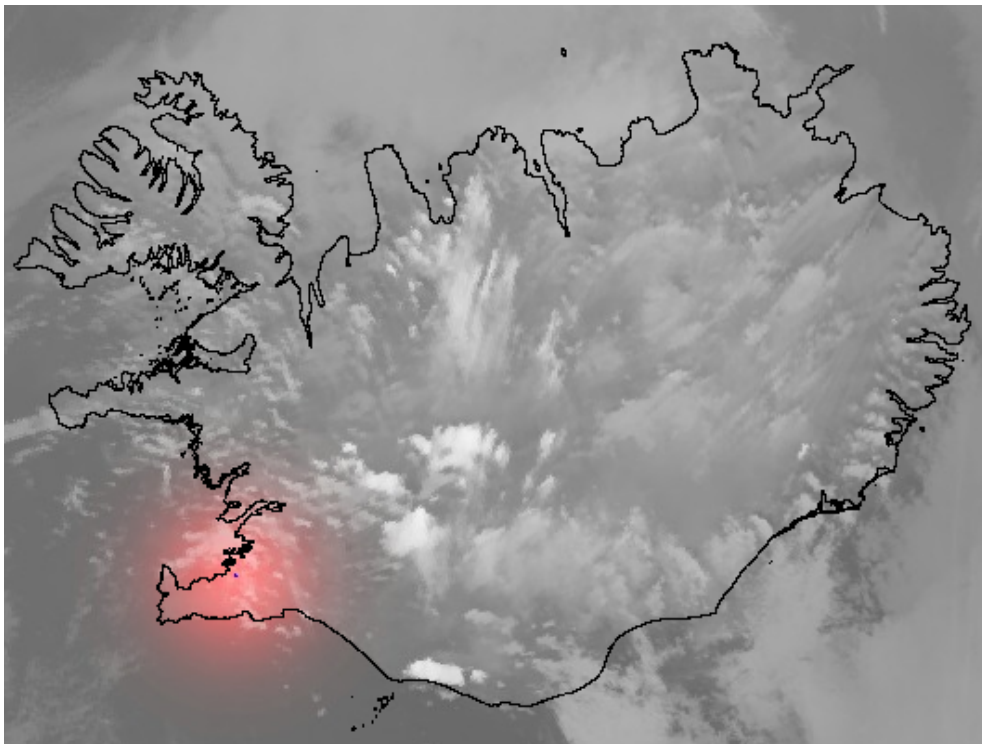
2.2 Niðurstöður

Gróðureldarnir miklu á Mýrum 30. mars til 1. apríl 2006 fóru yfir 73 km^2 landsvæði og eru langstærstu gróðureldar sem mældir hafa verið hérlendis. Útbreiðsluhraði þeirra undan vindi var í upphafi yfir 3 m/s (Pröstur Þorsteinsson o.fl., 2008).

Við notum hér gervitunglagögn frá tíma eldanna til að sýna niðurstöður greiningar á hitafrávikum og frekari úrvinnslu. Fyrst sýnum við dæmi um greiningu hitafráviks, annars vegar gróðureldana á Mýrum 30. mars 2006 (mynd 7), og hinsvegar dæmi um lítinn gróðureld við Hvaleyrarvatn 29. apríl 2008 (mynd 8).



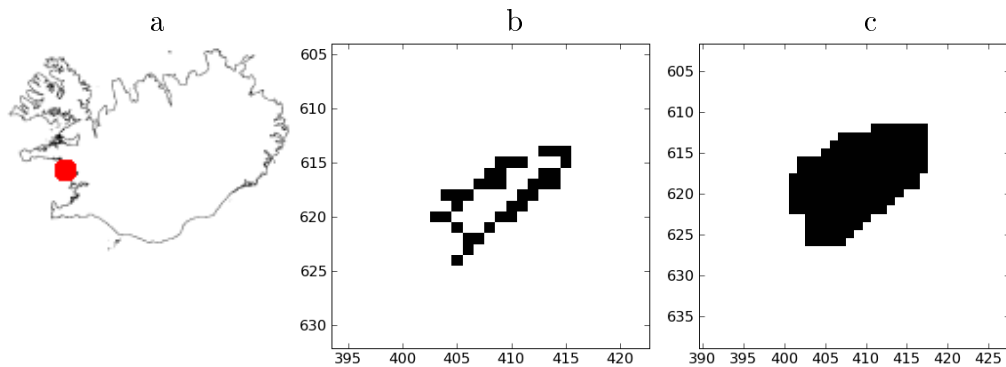
Mynd 7. Dæmi um sjálfvirkt viðvörðunarkort 30. mars 2006 vegna Mýraeldanna miklu.



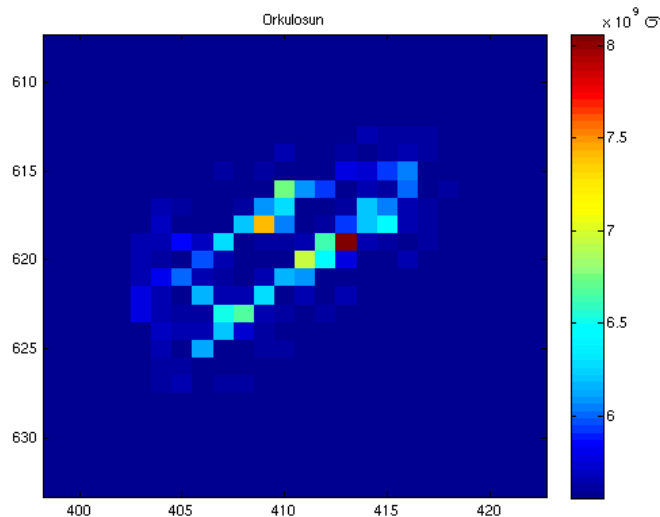
Mynd 8. Dæmi um sjálfvirkt viðvörðunarkort vegna minni gróðurelda við Hval-eyrarvatn 29. apríl 2008.

Gróðureldurinn á Mýrum var stór atburður og því mikilvægt að hann greinist með þessari aðferð. Í samanburði var gróðureldurinn við Hvaleyrvatn lítill atburður. Þar varð eldur laus í lúpínubreiðu og brunnu um 7.7 hektarar alls. Heildarstærð svæðisins sem brann er því um 8% af greinihæfni MODIS. Ekki logar nema á tiltölulega litlu beltí í jafri eldsins á hverjum tíma, þannig að fastlega má reikna með því að á þeim tíma sem eldurinn greinist hafi innan við 1% af heildarflatarmáli reitsins logað.

Á gervitunglamyndum um kl. 22:35 þann 30. mars 2006 greindust allmörg hitafrávik á Mýrum. Staðsetning er sýnd á mynd 9a, *NTI* frávik eru sýnd á mynd 9b og útvíkkað svæðið til útreikninga á hitastigi og stærð svæðis sem logar á er sýnt á mynd 9c.



Mynd 9. (a) Kort af staðsetningu gróðureldanna á Mýrum 2006. (b) Staðsetning greindra hitafrávika með *NTI*-stuðli og (c) útvíkkað svæði til bestunar. Kvarði á (b,c) er í km.



Mynd 10. Orkulosun í gróðureldunum á Mýrum 30. mars 2006 kl. 22:35. Til að fá orkulosun í Wm^{-2} þarf að margfalda tölur við litaskala með Stefan-Boltzmann fasta $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$. Blár litur (bakgrunnsgeislun) er um $310 Wm^{-2}$ og rauður er um $450 Wm^{-2}$.

Með því að reikna stærð svæðis sem eldar loga á (a_E) og hitastig eldanna (T_E), getum við reiknað orkulosun (mynd 10). Greinilegt er að eldarnir eru ákafastir á suður- og norðurjöðrum brunasvæðisins.

3 Sviföskugreining

Mikilvægt getur verið að auðkenna útbreiðslu, magn og gerð svifagna eins og gosösku. Nátengt því er mat á svifögnum úr jarðvegi sem fýkur á haf út í stormum hér við land.

Nýlegt dæmi úr gosinu í Eyjafjallajökli sýndi að gosaska getur haft gífurleg áhrif á flugumferð og óvissa um dreifingu ösku getur valdið gífurlegu fjárhagslegu tjóni. Meginniðurstöður fjölþjóðlegrar ráðstefnu um eldgos og flugstarfsemi (Atlantic Conference on Eyjafjallajökull and Aviation, 15–16 september 2010) benda meðal annars til þess að með betri nýtingu og miðlun á upplýsingum um öskudreifingu hefði verið hægt að spara milljónir evra í flugrekstri.

3.1 Aðferðafræði

Hitamyndavélar, sér í lagi í veðurtunglum, hafa lengi verið nýttar til greiningar á svifögnum. Staðalaðferðin við slíka greiningu er að mæla mismun í birtuhita á 11 og 12 μm rásum,

$$BTD = T_{11} - T_{12}. \quad (12)$$

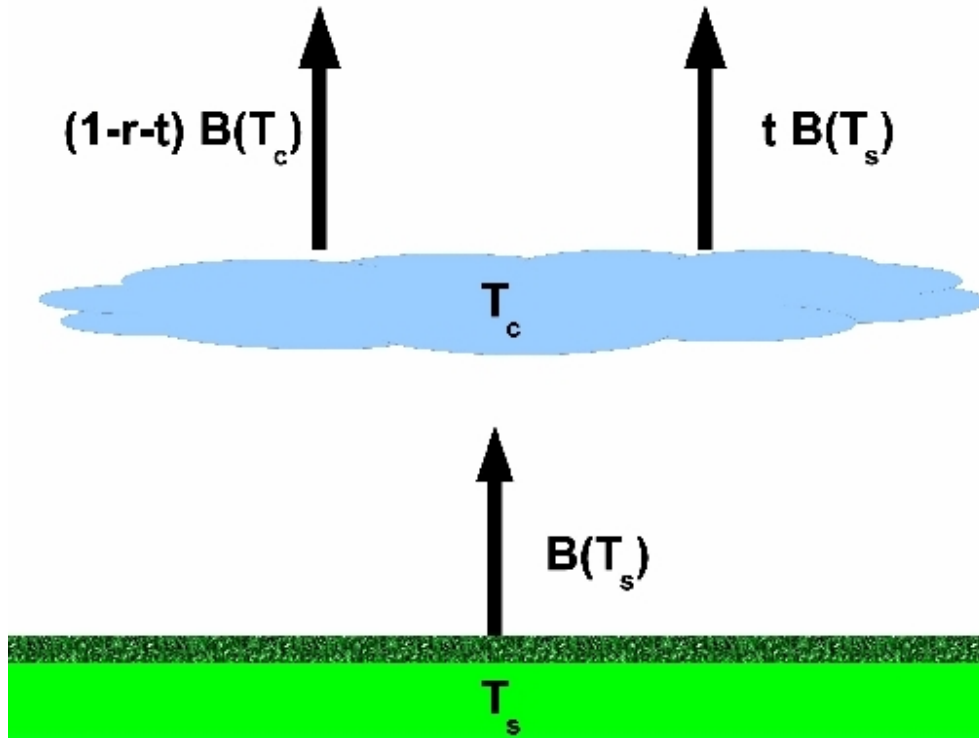
Þessi birtuhitastigsmismunur (e. brightness temperature difference) eða BTD, virkar á grundvelli ljósvístrunar á hitageislum frá einhverjum upptökum. Séð frá sjónarhóli gervitungls er það bakgrunnsgeislunin af jörðu niðri eða undirliggjandi skýi sem tvístrast af árekstri við svifagnirnar og þar sem þessi tvístrun er háð bylgjulengd mælist munur í birtuhita á tveimur rásum.

Einkenni vatnssvifagna (skýja) eru almennt þau að $BTD > 0$ en steingerðra svifagna eins og ösku $BTD < 0$, sjá Prata (1989a). Wen og Rose (1994) og Prata (1989b) voru frumkvöðlar að magntengdri greiningu á svifösku. Við magntengda greiningu þarf fyrst að auðkenna öskuleg svæði og aðlaga líkan um geislaburð að mælingunum. Að gefnum efniseiginleikum (ljósbrotstuðull) þá er hægt að áætla magn og meðalstærð agna sem passa best við geislunarmælingarnar.

Mynd 11 sýnir hvernig geislaflutningur og gosöskulag er oftast nálgæð í slíkri greiningu. Þ.e. bakgrunnsgeislun á upptök sín frá jörðu niðri við hitastig T_s og drífur í gegnum þunnt jafndreift öskulag í ákveðnu hlutfalli. Þá bætist við geislun frá öskuskýinu sjálfu við hitastig T_c . Því er hægt að líkja eftir geisluninni sem mæld er í gervitunglinu með eftirfarandi jöfnu,

$$M_\lambda = (1 - r_\lambda(\tau, \rho))I_\lambda(T_c) + t_\lambda(\tau, \rho)(I_\lambda(T_s) - I_\lambda(T_c)), \quad (13)$$

þar sem M er samsafnaður geislastyrkur fyrir ofan skýið, I er Planck lögmálið, r er endurvarpsstuðull og t er framferðarstuðull öskuslæðunnar. Styðjast þarf við geislaburðarlíkan til að reikna út stuðlana r og t , en báðir eru þeir háðir agnastærð ρ , efniseiginleikum (ljósbrotstuðull) og deyfipykkt τ . Wen og Rose (1994) teikna BTD

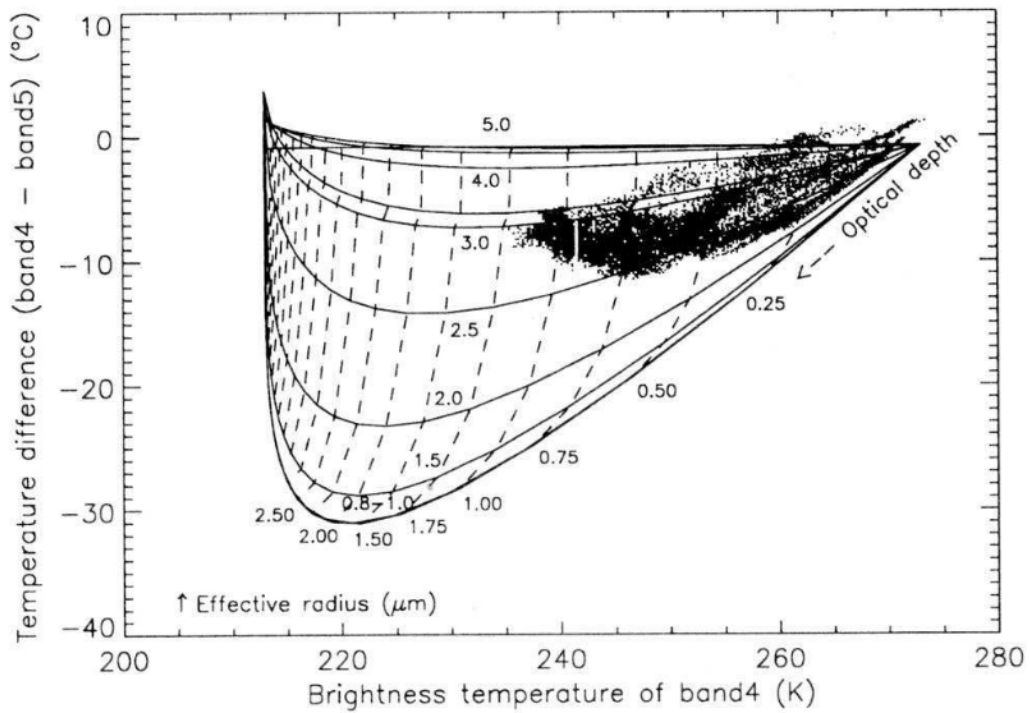


Mynd 11. Líkan til að greina þunnt lag af svifögnum í lofti. Líkanið gerir ráð fyrir að lagið sé þunnt miðað við hæð, og að agnir innan myndreits séu jafndreifðar.

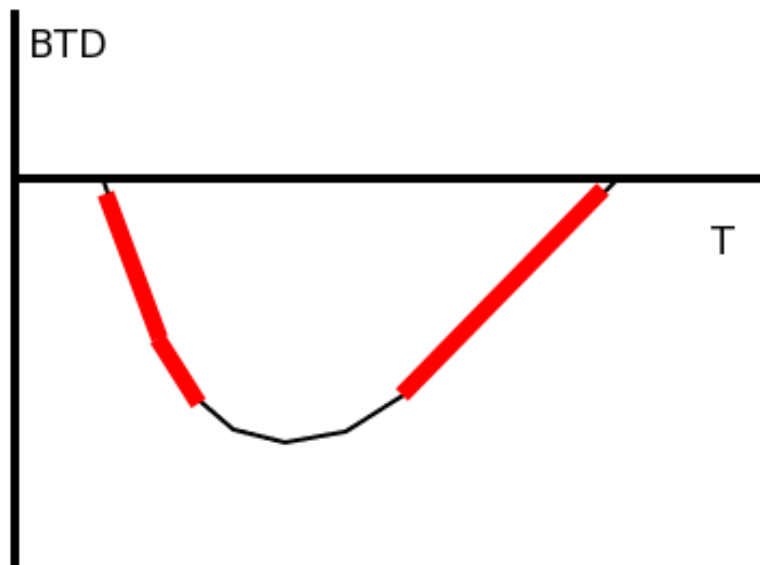
á móti T_{11} bæði sem fall af deyfþykkt (e. optical depth) ösku og fyrir mismunandi meðalstærðir agna, sjá mynd 12. Þessir ferlar sýna fræðilega eiginleika BTD fyrir mismunandi magn og agnastærðir.

Vert er að taka eftir því hvernig BTD fjarlægist núll-ásinn við bakgrunnshitastig, og lækkar línulega með hækkandi öskumagni, en snýr svo frekar skjótt við og nálgast hitastigið í öskuskýinu. Erfiðustu svæðin í öskugreiningu með BTD eru í jaðrinum á þessu línuriti, sjá mynd 13. Hallatölu í ljóspynnri enda (hægri enda) línuritsins má nota sem vísi að agnastærð, en ljósþykkari endann (vinstri endi) er hægt að nota sem vísi við hitastigsmat á öskuskýi.

Fáar veðurstofur hafa virkjað magntengda greiningu á ösku með gervitunglum. Vert er að nefna að NOAA setti nýlega í gang slíkt kerfi og vakti það athygli á meðan á gosinu í Eyjafjallajökli stóð. Eitt af markmiðum höfunda er að þróa rauntímaöskugreiningarkerfi Veðurstofunnar og Háskóla Íslands að því marki að hægt sé að draga magntengdar ályktanir. Magntengd ályktun á gosefni með fjarkönnun er ekki ólík ályktunum um veðurfræðilegar kennistærðir með veðurtunglum. Slíkir útreikningar eru gerðir daglega í ýmsum veðurlíkönum.



Mynd 12. Reiknaðir ferlar af BTD á móti T_{11} og mælingar á ösku með AVHRR-myndavél úr veðurtungli. Band 4 og 5 eru 11 og 12 μm rásirnar í AVHRR. Myndin er tekin úr grein Wen og Rose (1994).



Mynd 13. Teikningin sýnir áherslu $BTD \times |g|$ vísis í rauðum lit.

3.1.1 Öskuþröskuldur

Í flestum tilvikum styðjast eftirlitsstofnanir við fastan þröskuld á BTD til að greina öskulega reiti í gervitunglamyndum. Öskuþröskuldsgreining hefur líka hlutverki að gegna í frekari magntengdri greiningu því hún beinir úrvinnslunni að öskulegum svæðum og styttir þar með úrvinnslutíma.

Oft geta önnur fyrirbæri en aska leitt til neikvæðs BTD . Eftirfarandi aðstæður geta leitt til rangra eða ófullnægjandi greininga:

- Há klósigaský (e. cirrus) greinast stundum með neikvæðum BTD .
- Landslag og jaðar á skýjum leiða oft einnig til neikvæðs BTD . Þetta gerist líklega vegna smá misvísunar eða mismunar í greinihæfni á hitarásunum.
- Jarðvegur, sérstaklega sandar hafa töluverð neikvæð litrófseinkenni í BTD .
- Raki í lofthjúpunum kælir útgeislun mismikið á rásunum svo að öskuagnir geta haft jákvæðan BTD .

Í verkefninu einbeittum við okkur að því að greina hallatölu á BTD ,

$$g = \frac{d(BTD)}{dT_{11}}, \quad (14)$$

með það að leiðarljósi að hallatalan komi að gagni við að einangra öskuleg svæði sem eru á mörkum þess að vera greinanleg, en gefi einnig vísbendingu um deyfifykkt og agnastærð.

Ekki er sjálfgefið hvernig slík hallatala er reiknuð. Hægt er t.d. að reikna út hallatöluna með því að færa kassa (glugga) í einhverri hentugri stærð (t.d. 5×5 reitir) yfir myndina og reikna síðan út hallann í þeim reit. Á endanum var notaður gluggi með óreglulegu úrtaki af myndreitum (e. pixel), þ.e. bjöllulaga dreifingu af dílum, en með honum var hægt að forðast óæskileg áhrif hjárómunar (e. aliasing). Línuleg aðhvarfsgreining (e. linear regression) var notuð til að reikna hallatöluna g og óvissu í hallatölu δ_g .

Eftirfarandi vísir,

$$V_g = BTD \times |g|, \quad (15)$$

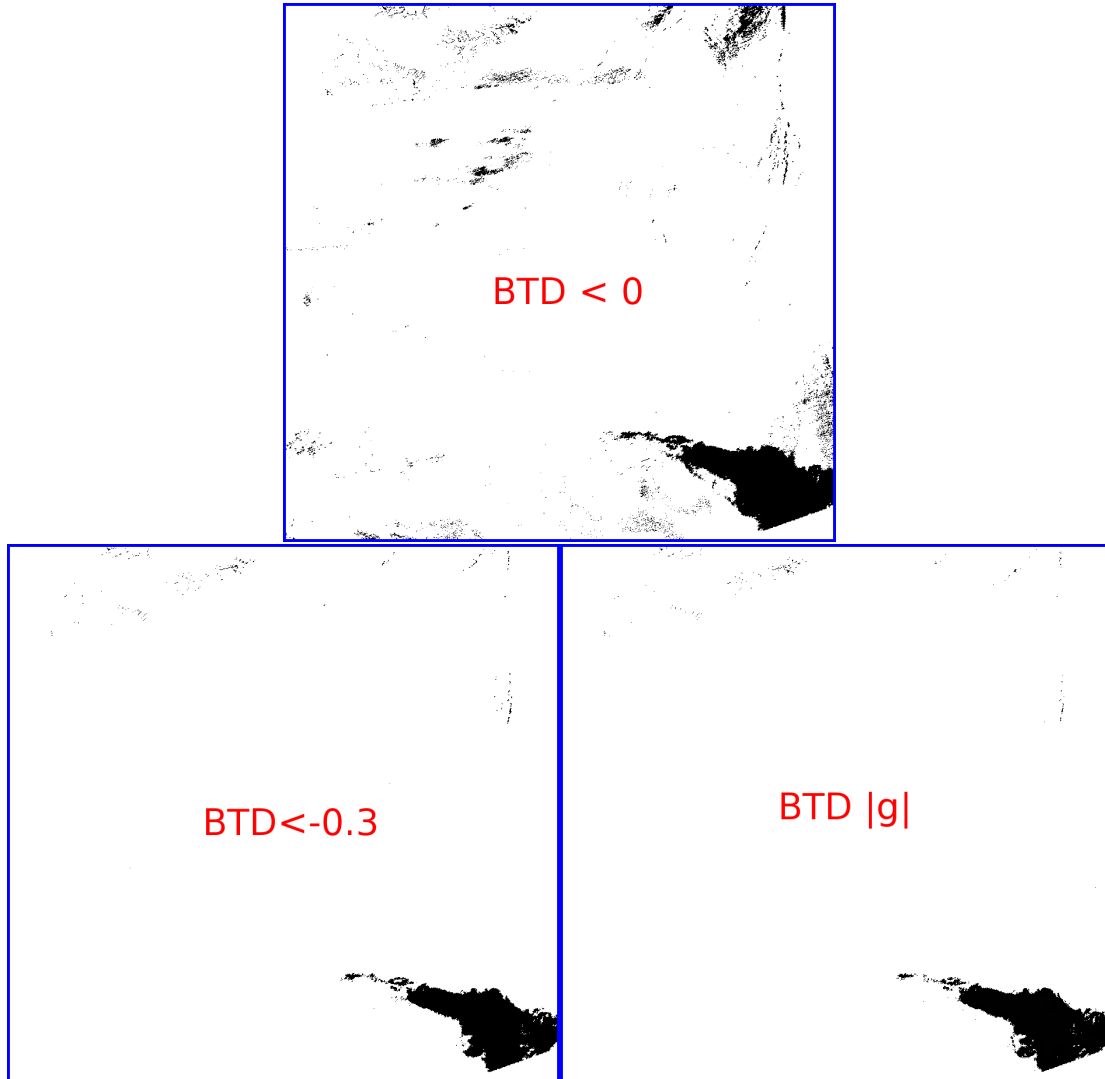
leggur áherslu á svæði í jaðri BTD kúrfunnar. $V_g < 0$ leggur áherslu á öskuleg jaðartilvik, sjá mynd 13.

Við getum einnig greint óvissuna í þessari stærð og þar með skoðað hvort $BTD|g|$ sé greinanlega stærra eða minna en 0,

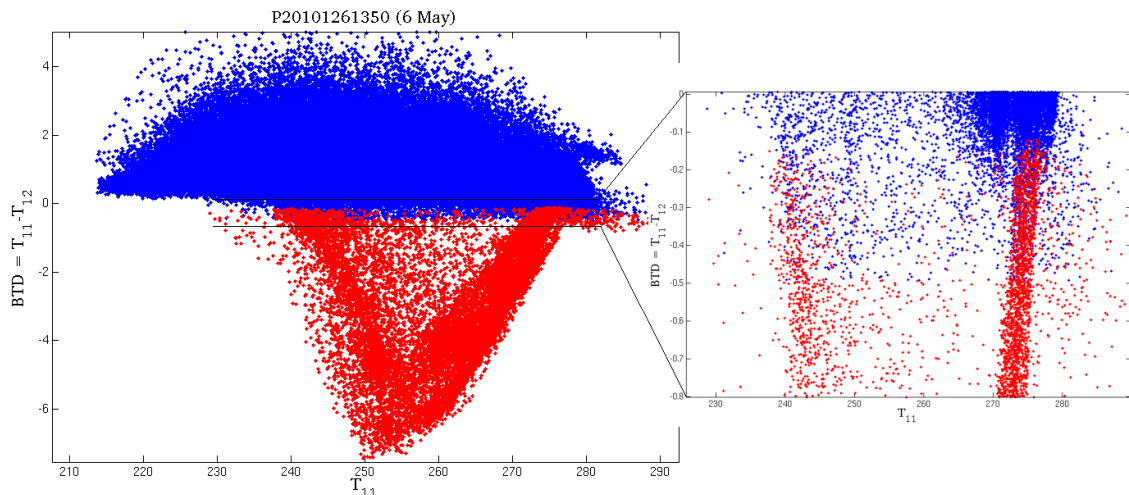
$$\frac{V_g}{\sqrt{(\delta_{BTD} \times g)^2 + (\delta_g \times BTD)^2}} < -\text{þröskuldur}. \quad (16)$$

Þröskuldurinn hefur merkinguna fjöldi staðalfrávika af V_g . Þröskuldurinn 2,5 virtist gefa ágætari niðurstöður. Myndreitum sem innihalda klár BTD -einkenni um ösku $BTD < -1.0$ eru síðan bætt við jaðargreininguna í lokaniðurstöðu. Dæmi um mismunandi öskuþröskulda eru sýnd á mynd 14. Þar sést hvernig $BTD < 0$ þröskuldur

leiðir til rangrar greininga og frekar óhreinnar niðurstöðu. $BTD < -0,3$ leiðir til betri niðurstöðu, en vegna breytileika í umhverfi er þó verulegur ókostur að nota fastan þröskuld. V_g þröskuldurinn er kvikur og tekur tillit til aðstæðna. Mynd 15 sýnir hvernig V_g þröskuldurinn er kjörvís, þ.e. velur og hafnar myndreitum eftir því hversu góð hallatala mælist. Í þessu tilviki greinast öskulegir reitir allt upp í $BTD \approx -0.1$. Vert er að benda á að vægi hallatölunar g í vísinum V_g hefur ekki verið rannsakað. Það er því vel hugsanlegt að betri niðurstöður fáiast með því að gefa hallanum g t.d. meira vægi en BTD . Í áframhaldandi þróun þá gæti verið athyglisvert að skoða mismunandi útfærslur á vísu, t.d. $BTD \times |g|^\alpha$, með stillanlegu vægi α .



Mynd 14. Samanburður á aðferðum með föstum BTD þröskuldum (efri og vinstri mynd) og aðferð sem tekur tillit til hallatölu (hægri mynd). Hægt er að finna ágætan fastan BTD þröskuld sem ber vel saman við aðferð með hallatölu. Frekari þróun myndi gefa hallatölu meira vægi og taka tillit til klösunar ösku.



Mynd 15. $BT D$ dreifirit sem sýnir greiningu öskulegra myndreita í rauðum lit.

3.1.2 $BT D_0$ leiðrétting

Vatnsgufa í lofthjúpunum leiðir stundum til töluverðrar hliðrunar í $BT D$. Ýmis dæmi benda til þess að hliðrun geti verið allt að 0.6 K hér við Ísland. Þetta er þó minni hliðrun en gengur og gerist í suðurhögum þar sem heitur lofthjúpur getur haldið mun meiri raka.

Einföld aðferð var þróuð til að áætla hliðrunina, $BT D_0$. Leitað var að heitustu myndeiningunni á hafi úti því við skýlausar aðstæður á hafið að gefa $BT D = 0.0$. Ný ákvörðun $BT D$ var svo áætluð með

$$BT D = T_{11} - T_{12} - BT D_0 \quad (17)$$

Þessi aðferð er mikil einföldun og virkar frekar illa fyrir svæði í jadrí á MODIS gögnum þar sem leið ljósgeisla í gegnum lofthjúpin er mun lengri en nær miðju. Þar að auki er $BT D_0$ ekki fasti, heldur fall af deyfipykkt ösku eða hitastigi T_{11} í mynd.

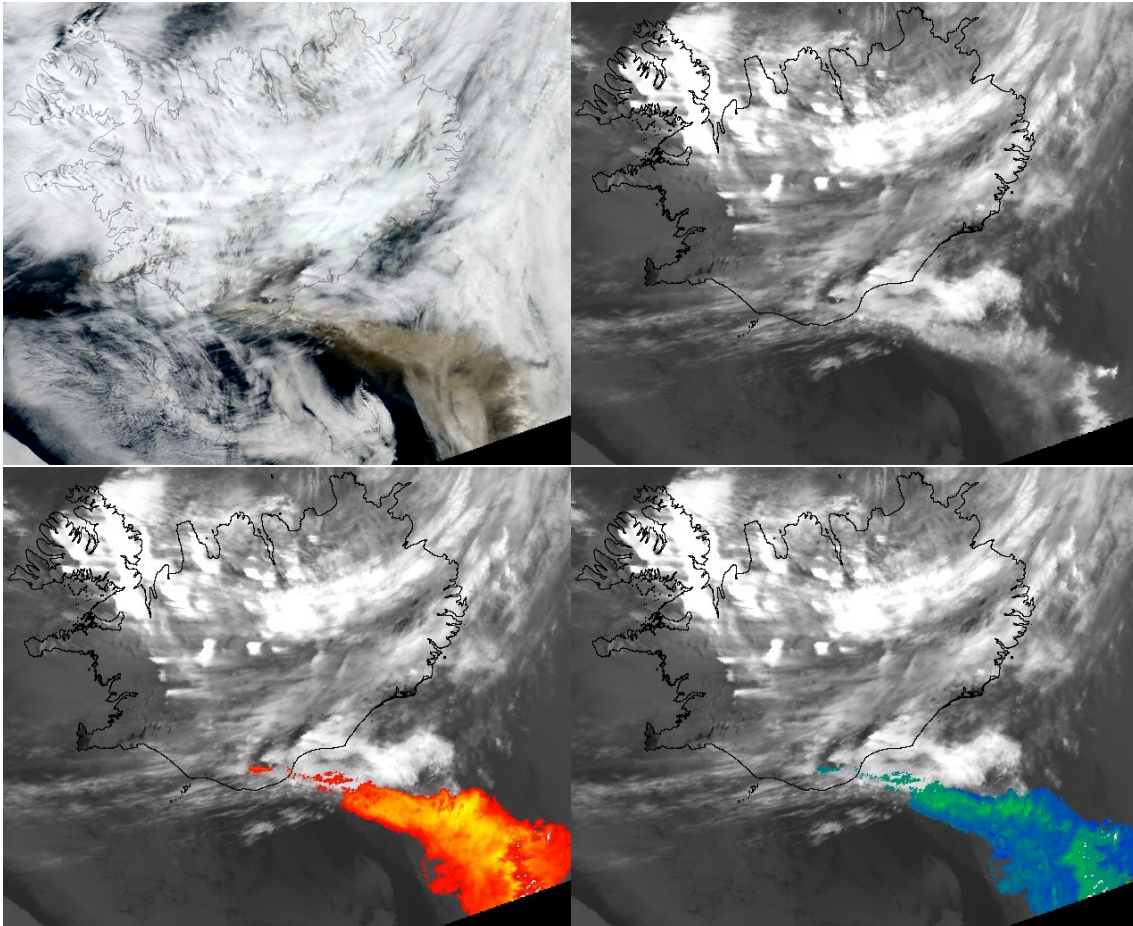
Í áframhaldandi þróun mun verða tekið tillit til leiðar ljósgeisla í gegnum lofthjúpin. Einnig verður skoðuð ný nálgun frá Fred Prata til að áætla leiðréttinguna sem fall af hitastigi. Hugsanlega verður best að reikna út $BT D_0$ með upplýsingum um raka úr veðurlíkani.

3.2 Niðurstöður

Mikilvæg skref voru tekin til betri skilnings á einkennum ösku í hitamyndum. Gagnlegt hefur verið að komast í kynni við ýmsar hindranir í þróun eins og t.d. mikilvægi hitaleiðréttinga vegna áhrifa vatnsgufu.

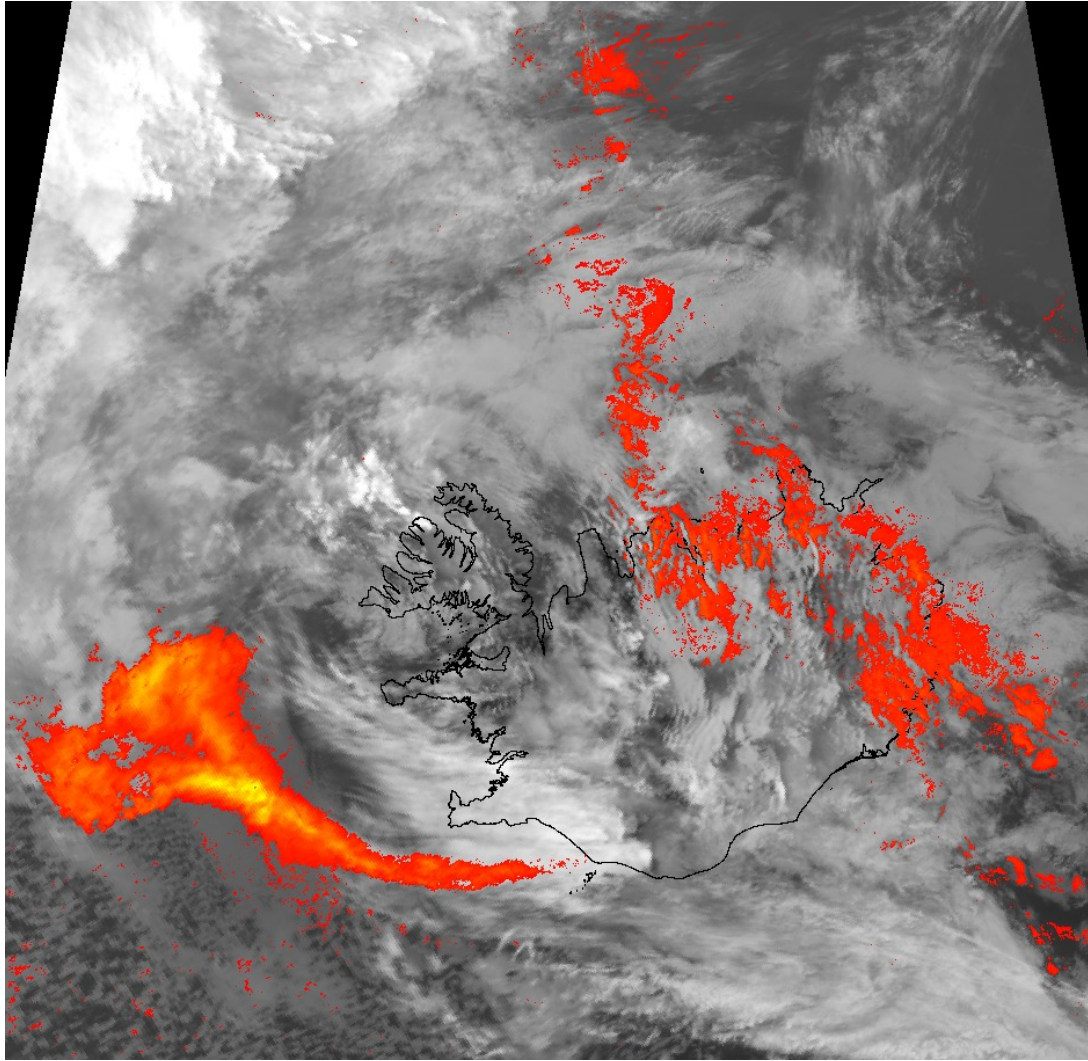
Helsta niðurstaða þróuninnar er hallatöluafurð sem hjálpar til við að afmarka betur gosösku en mun einnig nýtast á marga aðra vegu í framtíðinni og mun skila nýrri innsýn fyrir veðurfæðinga í eftirliti með svifösku.

Gosökugreining 6. og 14. maí úr gosinu í Eyjafjallajökli eru dæmi um þröskuldsaðferðina sem var þróuð. Á mynd 16 er öskugreining borin saman við náttúrlega litamynd úr MODIS. Rauð og gul mynd sýnir *BTD* afmarkaðan með nýju greiningunni, en blá og græn öskumynd teiknar *BTD* hallatöluna. Í jaðri á hallatölumyndinni má greina líklegan breytileika í hallatölu. Það má bera saman hallatölu í tímaröðum af gervitunglamyndum til að greina breytingu í agnastærð, en hallatalan (löggun *BTD* ferils) er mjög ónæg fyrir hæð öskuskýs. Neikvæð hallatala (grænn litur) bendir á góð svæði til að meta hitastig öskunnar og þar af leiðandi er hægt að meta öskuhæðina.



*Mynd 16. Öskugreining úr eldgosinu í Eyjafjallajökli 6. maí 2010. Nedri myndirnar tvær sýna birtuhitastigsmismun (*BTD*) í rauðum og gulum lit og *BTD* hallatölu í bláum og grænum lit fyrir það svæði sem greindist með breytilegri þröskuldsaðferð. Græni liturinn (neikvæð hallatala) bendir til ljósþykkari svæða í öskuskýinu. Öskugreining er sýnd í samanburði við náttúrlega litmynd (efst til vinstri) og hitamynd (efst til hægri).*

Á mynd 17 er önnur öskugreining á MODIS hitamynd. Þar sést nýr öskustrókur úr Eyjafjallajökli sem teygir sig vestur. Á sama tíma greinist dreifð aska norðan við landið. Samanburður tímaráða mynda úr MSG veðurtunglinu skýrir tilvist þessarar dreifðu ösku, en það er eldri aska sem hefur ferðast með lægðarkerfum langt til suðurs og svo aftur til Íslands. Myndin renndi stöðum undir greininguna með MODIS.



Mynd 17. Öskugreining úr eldgosinu í Eyjafjallajökli 14. maí 2010. Öskugreiningin sýnir nýjan öskustrók en einnig marga tvístraða flekki yfir Norðausturlandi. Með samanburði tímaraða af myndum úr veðurtunglinu MSG tókst að rekja þessa flekki til fyrri öskulosunar.

Nefna má að MSG er næmara fyrir svifösku þó svo að upplausnin sé ekki eins góð og MODIS eða AVHRR. Ástæðan er sú að sjónarhorn MSG frá miðbaug leyfir tunglinu að horfa í gegnum meiri ösku en tungl eins og Terra og Aqua sem ferðast beint yfir svæðin sem þau mynda.

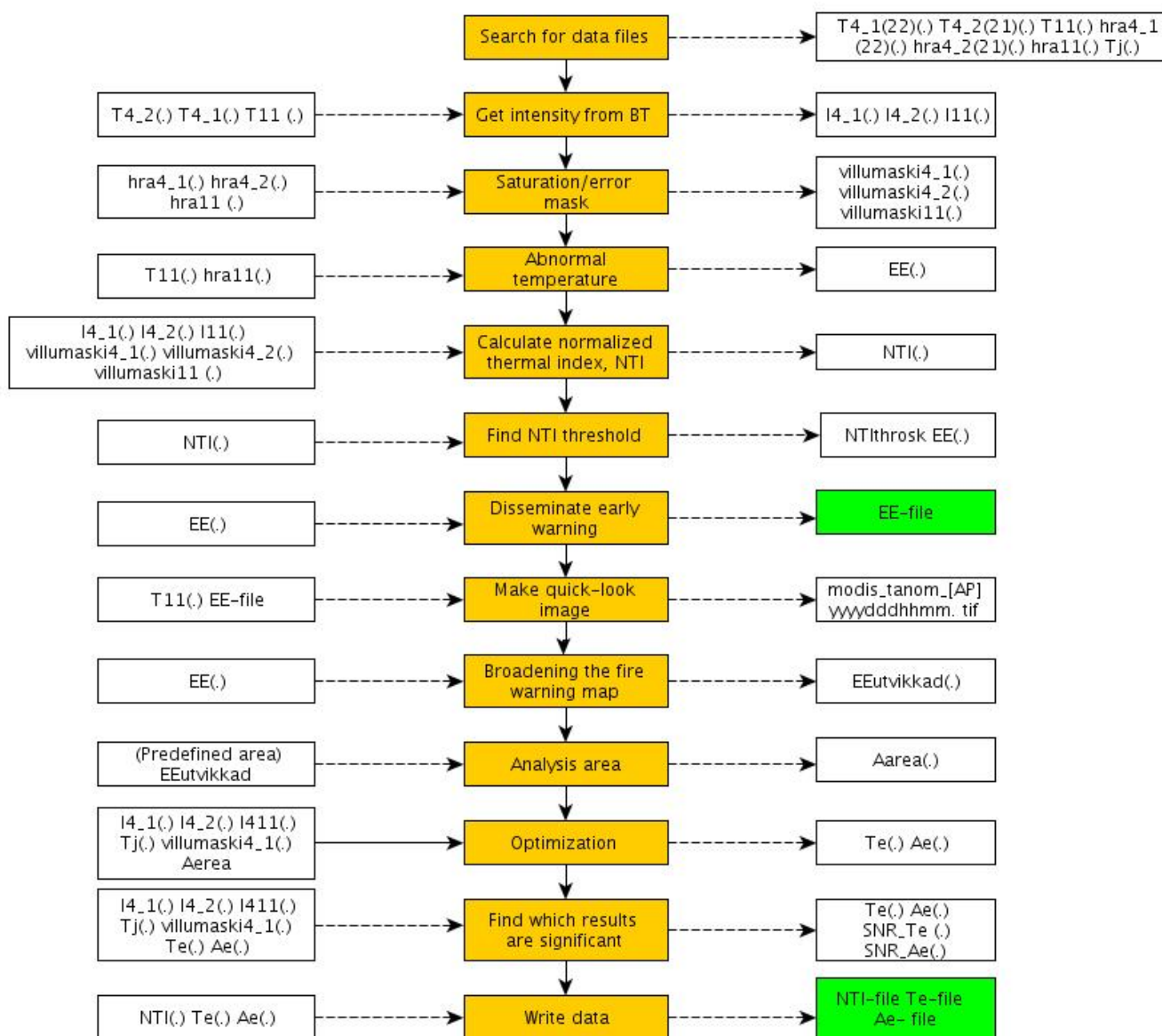
Heimildir

- Atlantic Conference (2010). Atlantic conference on Eyjafjallajökull and aviation, 15-16 Sept. 2010, Vefslóð: <http://en.keilir.net/keilir/conferences/eyjafjallajokull>, sótt í september 2010.
- Davies, A. G., Chien, S., Baker, V., Doggett, T., Dohm, J., Greeley, R., Ip, F., Castanbreveo, R., Cichy, B. & Rabideau, G. (2006). Monitoring active volcanism with the autonomous sciencecraft experiment on EO-1. *Remote Sensing of the Environment*, 101:427-446.
- MODVOLC-team (2010). The daytime modvolc algorithm. Vefslóð: <http://modis.higp.hawaii.edu/daytime.html>, sótt í júní 2010.
- Prata, A. J. (1989a). Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 16:1293-1296.
- Prata, A. J. (1989b). Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. *Int. J. Remote Sensing*.
- Wen, S. and Rose, W. I. (1994). Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *J. Geophys. Res.*, 99:5421-5432.
- Wright, R., Flynn, L. P., Garbeil, H., Harris, A. J. L. & Pilger, E. (2004). MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 135:29-49.
- Pröstur Þorsteinsson, Borgþór Magnússon & Guðmundur Guðmundsson (2008). Sinueldarnir miklu á Mýrum 2006. *Nátturufraeðingurinn*, bls. 76.

I Viðauki. Hitafrávikskerfi

Þörf var á varfærni í öllum útreikningum með gögnin. Sérstaklega þurfti að greina villur í gögnunum til að forðast ónákvæmar eða rangar mælingar. Samhliða framleiðslu á kortvörpuðu birtuhitastigi þurfti því einnig að keyra út villumaska svo hægt væri að aðgreina góðar mælingar, villur og mettnun á rásun.

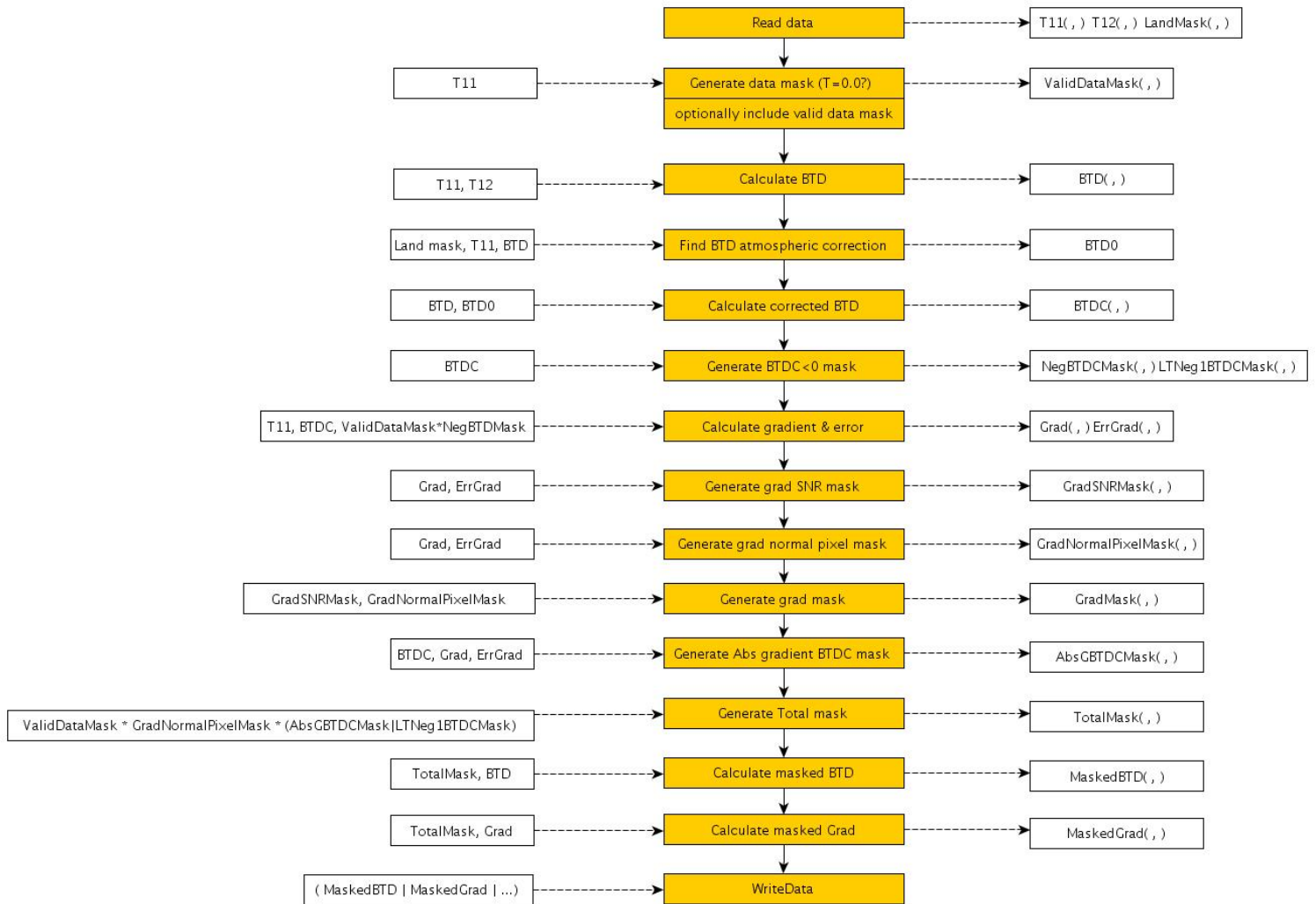
Mikil forritunarvinna var unnin af sumarstarfsmönnum og reynt að tryggja rétta meðferð gervitunglagagna til að auðvelda áframhaldandi þróun kerfanna. Mynd 18 sýnir flæðirit fyrir hitafrávikskerfið og hvernig því hefur verið skipt upp í vel skipulagðar sjálfstæðar aðgerðir á gögnin.



Mynd 18. Flæðirit sem lýsir kerfi fyrir hitafráviksgreiningu. Gulir kassar tákna aðgerðir og hvítir kassar tákna gögn á mismunandi stigi í úrvinnslu. Grænir kassar tákna niðurstöður til birtingar.

II Viðauki. Öskugreiningarkerfi

Mikil forritunarvinna var unnin af sumarstarfsmönnum á VÍ og reynt að tryggja rétta meðferð gervitunglagagna til að auðvelda áframhaldandi þróun kerfanna. Mynd 19 sýnir flæðirit fyrir öskugreiningarkerfið og hvernig því hefur verið skipt upp í vel skipulagðar sjálfstæðar aðgerðir á gögnin.



Mynd 19. Flæðirit sem lýsir kerfi fyrir öskugreiningu. Gulir kassar tákna aðgerðir og hvítir kassar tákna gögn á mismunandi stigi í úrvinnslu.