



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

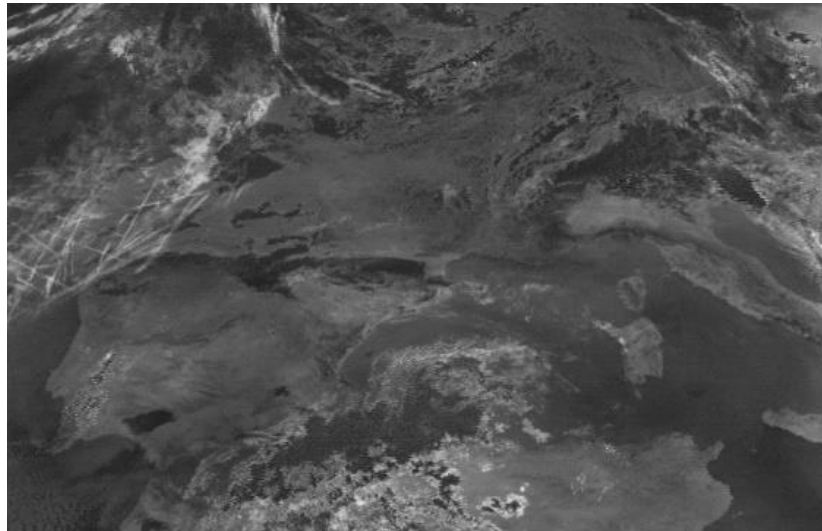


ΓΕΩΡΓΙΟΣ Θ. ΔΕΚΟΥΤΣΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Φυσικός

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΙΧΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΝΟΪΚΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ
ΣΥΝΘΗΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
'ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'*



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΓΕΩΡΓΙΟΣ Θ. ΔΕΚΟΥΤΣΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Φυσικός

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΙΧΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΝΟΪΚΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 17/01/2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Χαράλαμπος Φείδας, Επιβλέπων
Αν. Καθηγητής Ιωάννης Πυθαρούλης, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
ΕΔΙΠ Δημήτριος Μπαμπζέλης, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής



© Γεώργιος Θ. Δεκουτσίδης, Φυσικός, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΙΧΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΝΟΪΚΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ – *Μεταπτυχιακή
Διπλωματική Εργασία*

© Georgios Th. Dekoutsidis, Physicist, 2020

All rights reserved.

DETECTION OF JET AIRCRAFT CONTRAILS FROM SATELLITE DATA AND
ESTIMATION OF FAVORABLE ATMOSPHERIC CONDITIONS – *Master Thesis*

Citation:

Δεκουτσίδης Γ. Θ., 2020. – Εντοπισμός ιχνών αεροσκαφών από δορυφορικά δεδομένα και εκτίμηση των ευνοϊκών ατμοσφαιρικών συνθηκών. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ..

Dekoutsidis G. Th., 2020. – Detection of Jet aircraft contrails from satellite data and estimation of favorable atmospheric conditions. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας 10,8μm-12μm, 26/06/2016 08:45. SEVIRI, MSG. Εμφανή contrails στα ΒΔ της Ιβηρικής χερσονήσου. Γεώργιος Δεκουτσίδης.



*“Science has not yet taught us
if madness is or is not the sublimity
of the intelligence”
- Edgar Allan Poe*



Περίληψη

Τα ίχνη αεροσκαφών – contrails, καθώς και τα παράγωγά τους νέφη contrail cirrus, ασκούν σημαντική επίδραση στο ισοζύγιο των ακτινοβολιών της ατμόσφαιρας και συνεπώς και στο κλίμα της Γης. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια, μέσω της χρήσης δορυφορικών δεδομένων, να μελετηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά τους και να καθοριστούν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που πιθανά ευνοούν τον σχηματισμό των contrails. Η περιοχή ενδιαφέροντος περιλαμβάνει την Κεντρική και Δυτική Ευρώπη, και μελετάται για το έτος 2016. Ο εντοπισμός των contrails γίνεται στις εικόνες του ραδιομέτρου SEVIRI που φέρεται σε δορυφόρο MSG, με τη βοήθεια τροποποιημένης έκδοσης του αλγορίθμου αυτόματου εντοπισμού contrails CDA (Mannstein et al., 1999). Αξιοποιώντας ως κύρια βάση δεδομένων τα εντοπισμένα contrails, τίθενται τα ερωτήματα: ποια είναι τα μορφολογικά και μικροφυσικά χαρακτηριστικά των contrails και ποιες οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν τον σχηματισμό τους;

Η στατιστική ανάλυση των εντοπισμένων contrails, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος παρατηρούνται πέντε υποπεριοχές με συχνότερη εμφάνιση contrails, με την ακριβή κατανομή τους όμως να εμφανίζει ημερήσια και εποχιακή μεταβολή. Τα μήκη των εντοπισμένων contrails κυμαίνονται μεταξύ 225 km και 292,5 km, τα πλάτη τους μεταξύ 5,1 km έως 8,1 km και το συνολικό εμβαδόν τους μεταξύ 993 km² και 1463 km². Συνολικά η κάλυψη της σκηνής από contrails βρέθηκε να είναι μέχρι 0,085 %, με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες.

Η σύγκριση των θέσεων των εντοπισμένων contrails με τα δεδομένα της βάσης δεδομένων reanalysis ERA-5, οδήγησε στον εντοπισμό των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν όταν εντοπίζονται contrails. Βρέθηκε ότι τα contrails εντοπίζονται κυρίως σε περιβάλλοντα κορεσμένα σε υδρατμούς ($RH \geq 100\%$), όταν η θερμοκρασία είναι 204 K έως 232 K (-69,15 °C έως -41,15 °C) και η ειδική υγρασία περίπου 0,025 gr/kg – 0,05 gr/kg. Προτιμητέα διεύθυνση ανέμου είναι η Δ-ΝΔ (240° έως 260°) με την ένταση να βρίσκεται από 10 m/s έως 30 m/s.



Abstract

Jet aircraft contrails, and the contrail – cirrus clouds generated from them, have a great effect on the radiation balance of the atmosphere and thus impact the climate. This study aims to study the physical features of contrails and determine the possible atmospheric conditions that favor their formation, with the use of satellite data. The contrails are detected on satellite images obtained by the SEVIRI radiometer on board MSG satellites, with the use of a modified version of the Contrail Detection Algorithm (Mannstein et al., 1999). The area of interest includes central and Western Europe and the time period is the whole year 2016. Using a dataset of detected contrails in satellite images, it asks: what are the physical properties of those contrails and under what atmospheric conditions have they formed?

The subsequent statistical analysis of the detected contrails leads to the conclusion that there are five main contrail detection hot-spots, although the geographical distribution of the contrails, varies depending on the time of day and the season. The length of the detected contrails lies between 225 km and 292,5 km, the mean width between 5,1075 km and 8,1 km and their overall area between 993 km² and 1463 km². The total contrail cover of the scenes was up to 0,085 %, with greater values being detected during winter.

Comparison of the locations of the detected contrails with the ERA-5 reanalysis database, revealed the atmospheric conditions favoring their formation. Results show that contrail formation is favored in water saturated areas ($RH \geq 100\%$), when the temperature is between 204 K and 232 K (-69,15 °C to -41,15 °C) and the specific humidity between 0,025 gr/kg and 0,05 gr/kg. The favorable wind direction is W-SW (240° - 260°) and wind speed between 10 m/s and 30 m/s.



Συντομογραφίες

- SAC: Schmidt – Appleman Criterion (1.1.2)
- CRF: Contrail Radiative Forcing (CRF) (1.1.4)
- GEOs: Geostationary Earth Observation satellites (1.2.1)
- EUMETSAT: European organization for the exploitation of Meteorological Satellites (1.2.2)
- MSG: Meteosat Second Generation (1.2.2)
- SEVIRI: Spinning Enhanced Visible and Infra-red Imager (1.2.2)
- AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer (1.2.3)
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (1.2.3)
- EOC: Earth Observation Center (2.1)
- DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2.1)
- ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2.2)
- ICAO: International Civil Aviation Organization (2.3)
- POD: Probability of detection (3.1.2)
- FAR: False alarm ratio (3.1.2)
- EKB: Αεροπορικός διάδρομος Ευρώπη – Κανάρια – Βραζιλία (4.2.1)



Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωλογίας «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον». Αποτελεί μία μελέτη των μορφολογικών και μικροφυσικών χαρακτηριστικών των contrails, ενώ παράλληλα ερευνά και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξή τους. Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας ολοκληρώθηκε στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), και τμήμα της στην Γερμανική Υπηρεσία Διαστημικής και Αεροπλοΐας (DLR). Έχοντας πετύχει τους στόχους που τέθηκαν και έχοντας ολοκληρώσει την συγγραφή της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους βοήθησαν σε όλη αυτή την εξαιρετικά ενδιαφέρουσα διαδικασία.

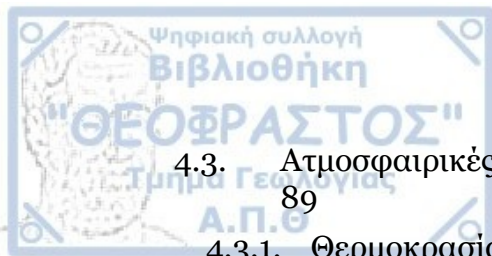
Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας καθηγητή Χαράλαμπο Φείδα που πρότεινε ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για όλη τη βοήθειά του στην ολοκλήρωση αυτή της εργασίας. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, αναπληρωτή καθηγητή Ιωάννη Πυθαρούλη και ΕΔΙΠ Δημήτριο Μπαμπζέλη για την καθοδήγηση και στήριξή τους. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους διδάσκοντες του τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας για όλα όσα προσέφεραν στα δύο έτη της παρουσίας μου στο μεταπτυχιακό. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Dr.rer.nat. Luca Bugliaro, DLR για την υπομονή του και την βοήθειά του τόσο κατά την διάρκεια της παραμονής μου στην DLR, όσο και εξ' αποστάσεως μετά την επιστροφή μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης στις συμφοιτήτριές μου στο μεταπτυχιακό για δύο αξέχαστα έτη. Η συνύπαρξή μας αποτέλεσε σημαντική βοήθεια στην καθημερινότητα του μεταπτυχιακού και ισχυρό κίνητρο βελτίωσης.

Τέλος θα ήθελα φυσικά να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς και την αδερφή μου Ελένη, για την υπομονή τους και την στήριξή τους σε όλους τους τομείς. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στη σύντροφό μου Πηνελόπη που αποτέλεσε το στήριγμα και κίνητρό μου στην εκπόνηση της εργασίας και σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και σε όλους τους φίλους σε Ελλάδα και Γερμανία που έκανα πιο ευχάριστη την καθημερινότητα.



Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	11
1.1.	Ίχνη αεροσκαφών - Contrails	11
1.1.1.	Μηχανισμός σχηματισμού των contrails.....	12
1.1.2.	Κριτήριο Schmidt – Appleman	14
1.1.3.	Contrail Cirrus.....	15
1.1.4.	Radiative forcing των contrails	16
1.1.5.	Επίδραση των contrails στο κλίμα.....	17
1.2.	Δορυφορική τηλεπισκόπηση.....	18
1.2.1.	Βασικά στοιχεία δορυφορικής τηλεπισκόπησης.....	18
1.2.2.	SEVIRI – MSG.....	20
1.2.3.	Εντοπισμός contrails από δορυφορικά δεδομένα.....	22
1.3.	Αναγκαιότητα και στόχοι εργασίας	25
2.	Δεδομένα.....	27
2.1.	Δορυφορικά δεδομένα	27
2.2.	Δεδομένα επανάλυσης ERA-5	28
2.3.	Βοηθητικά δεδομένα.....	31
3.	Μεθοδολογία.....	33
3.1.	Αλγόριθμος εντοπισμού ιχνών αεροσκαφών.....	33
3.1.1.	Λειτουργία αλγορίθμου – Παράδειγμα.....	33
3.1.2.	Αξιολόγηση αλγορίθμου	54
3.1.3.	Σύγκριση	56
3.2.	Ανάλυση χαρακτηριστικών των ιχνών αεροσκαφών	57
3.3.	Εντοπισμός συνθηκών ατμόσφαιρας που ευνοούν τον σχηματισμό – παρατήρηση ιχνών αεροσκαφών	62
4.	Αποτελέσματα.....	65
4.1.	Γενικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου	65
4.2.	Χαρακτηριστικά ιχνών αεροσκαφών	68
4.2.1.	Γεωγραφική κατανομή των contrails.....	68
4.2.2.	Μήκος των contrails.....	80
4.2.3.	Μέσο πλάτος των contrails	83
4.2.4.	Εμβαδό των contrails	84
4.2.5.	Κάλυψη της σκηνής από contrails	85



4.3.	Ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την εμφάνιση ιχνών αεροσκαφών	89
4.3.1.	Θερμοκρασία	89
4.3.2.	Σχετική Υγρασία.....	93
4.3.3.	Ειδική υγρασία	97
4.3.4.	Ζωνική συνιστώσα του ανέμου	100
4.3.5.	Μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου	104
4.3.6.	Ολική ταχύτητα του ανέμου.....	106
4.3.7.	Διεύθυνση του ανέμου.....	109
4.4.	Μελέτη περίπτωσης	113
5.	Συμπεράσματα – Συζήτηση	130
5.1.	Αλγόριθμος Εντοπισμού Contrails	130
5.2.	Χαρακτηριστικά των contrails.....	131
5.3.	Ατμοσφαιρικές παράμετροι που ευνοούν την εμφάνιση contrails	134
5.4.	Μελέτη περίπτωσης	135
6.	Παράρτημα	137
6.1.	Γεωγραφικό πλάτος και μήκος	137
6.2.	Μέσο πλάτος	143
6.3.	Εμβαδόν	144
6.4.	Κάλυψη.....	145
6.5.	Θερμοκρασία.....	145
6.6.	Σχετική υγρασία.....	146
6.7.	Ειδική υγρασία	147
6.8.	Ζωνική συνιστώσα του ανέμου	147
6.9.	Μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου	148
6.10.	Ταχύτητα του ανέμου.....	150
6.11.	Διεύθυνση του ανέμου	150
6.12.	Ροδογράμματα	153
7.	Βιβλιογραφία	156

1. Εισαγωγή

1.1. Ίχνη αεροσκαφών - Contrails

Τα ίχνη αεροσκαφών – contrails, είναι λεπτά, γραμμικά νέφη αποτελούμενα από παγοκρυστάλλους που παρατηρούνται συχνά δια γυμνού οφθαλμού πίσω από εν πτήση αεροσκάφη (Freudenthaler et al., 1995) (Εικόνα 1). Σχηματίζονται κυρίως λόγω της ανάμειξης των υδρατμών που εκλύονται από τους κινητήρες των αεροσκαφών με τον κρύο αέρα του περιβάλλοντος (Schumann, 1996). Η ανάμειξη αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τον τοπικό κορεσμό της αέριας μάζας ως προς τους υδρατμούς, τη συμπύκνωση των υδρατμών και τέλος την παγοποίηση (Kärcher, 2018). Συνήθως εντοπίζονται σε περιοχές με υπερκορεσμό ως προς το πάγο. Μπορούν συχνά να διατηρηθούν για αρκετές ώρες και να εξελιχθούν σε νέφη τύπου cirrus σε υγρά περιβάλλοντα (Εικόνα 2) (Iwabuchi et al., 2012)(Schumann et al., 2012).



Εικόνα 1: Σχηματισμός contrails πίσω από αεροσκάφη. Αριστερά και Μέση: Σχηματισμός contrails με καύσιμο διαφορετικής περιεκτικότητας σε θειούχες ενώσεις. Δεξιά: Δύο αεροσκάφη με διαφορετική αποδοτικότητα κινητήρων. (Φωτογραφίες: R. Busen, P. Thomas, U. Schumann, DLR)

Τα contrails μελετήθηκαν αρχικά λόγω της ορατότητάς τους. Μετά την πρώτη παρατήρησή τους, το 1915, και την πρώτη δημοσιευμένη μελέτη το 1919 (Ettenreich, 1919), η μελέτη του σχηματισμού των contrails, έχει οδηγήσει σε σημαντικές ανακαλύψεις γενικότερα για την ατμόσφαιρα όπως τον εντοπισμό υπερκορεσμού ως προς το πάγο, την ομογενή και ετερογενή παγοποίηση και την κυκλοφορία Brewer – Dobson (Schumann et al., 2012). Το 1987 μετά την ανακάλυψη της τρύπας του όζοντος, και με αυξανόμενες ανησυχίες για την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, η επίδραση της αεροπλοΐας στο ισοζύγιο ακτινοβολιών της ατμόσφαιρας, στην ποιότητα του αέρα και το κλίμα, έγινε θέμα δημόσιας διαβούλευσης στην Ευρώπη. Μία σειρά από ερευνητικά

προγράμματα ξεκίνησαν στην Ευρώπη το 1990 και λίγο αργότερα και στις Η.Π.Α.. Αρχικά η έμφαση δόθηκε στις χημικές επιδράσεις του άνθρακα, του αζώτου, του θείου και των σωματιδίων στο όζον. Από τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, τα contrails άρχισαν να μελετώνται λόγω ενδείξεων για την επίδραση που έχουν στο κλίμα από την τεχνητά δημιουργούμενη νέφωση (Liou et al., 1990).



Εικόνα 2: Γηραιά contrails που μετατρέπονται σε contrail cirrus. (Φωτογραφία: Ch. König, Bildverarbeitungs-Büro König, BVBK, 2004; 09:48 UTC 24 Ιανουαρίου 2004, 47.91°N, 11.13°E, NNA διεύθυνση)

1.1.1. Μηχανισμός σχηματισμού των contrails

Η θερμοδυναμική επεξήγηση του σχηματισμού των contrails είναι αρκετά απλή και εξαρτάται μόνο από την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Ένα αεροσκάφος εκπέμπει από τους κινητήρες στο περιβάλλον θερμό και υγρό αέρα. Όταν αυτός ο αέρας ψύχεται από την εκτόνωση και την ανάμιξη με τον περιβάλλοντα αέρα, αυξάνεται η σχετική υγρασία του πέραν του κορεσμού ως προς την υγρή φάση και οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε σταγονίδια πάνω στα εκπεμφθέντα αεροζόλ, τα οποία παγώνουν αμέσως (Mannstein et al., 2010). Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους -40°C ο σχηματισμός των παγοκρυστάλλων γίνεται μέσω της ετερογενούς πυρηνοποίησης, απαιτείται δηλαδή η ύπαρξη σωματιδίων με ειδική μορφολογία πάνω στα οποία σχηματίζονται οι παγοκρύσταλλοι. Σε μικρότερες θερμοκρασίες οι υδροσταγόνες μπορούν να παγώσουν και με τη διαδικασία της ομογενούς πυρηνοποίησης, δηλαδή χωρίς την ύπαρξη κάποιου σωματιδίου (Pruppacher, 1995; Sassen & Dodd, 1988). Λόγω

του μικρού αριθμού σωματιδίων πάνω στα οποία μπορεί να γίνει ετερογενής πυρηνολοποίηση στο μέσο ύψος πτήσης των αεροσκαφών, θεωρείται ότι για τον σχηματισμό των contrails ο βασικός μηχανισμός είναι η ομογενής πυρηνολοποίηση (Iwabuchi et al., 2012) και συνεπώς απαιτούνται θερμοκρασίες μικρότερες από περίπου -40°C (Pruppacher, 1995). Το ακριβές όριο της θερμοκρασίας, εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η ατμοσφαιρική πίεση, οι ποσότητες υδρατμών και θερμότητας που εκλύονται από τους κινητήρες και άλλα.

Από επιτόπιες μετρήσεις σε contrails πίσω από αεροσκάφη, βρέθηκε ήδη από το 1941 ότι ο σχηματισμός των contrails απαιτεί τοπικά κατάσταση κορεσμού ως προς την υγρή φάση στα καυσαέρια του αεροσκάφους (Höhndorf, 1941; Schumann, 1996). Υπερκορεσμός ως προς τον πάγο στον ευρύτερο περιβάλλοντα αέρα βοηθάει ώστε οι παγοκρύσταλλοι που σχηματίζονται να μην εξαχνωθούν, και έτσι το contrail να αποκτήσει μεγάλη διάρκεια ζωής. Πιο συγκεκριμένα για τον σχηματισμό και τη διατήρηση των παγοκρυστάλλων απαιτείται υπερκορεσμός ως προς τον πάγο περίπου 100 % - 154% (Sassen & Dodd, 1988). Σημειώνεται ότι η τάση κορεσμού πάνω από πάγο είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη πάνω από υγρή επιφάνεια, επομένως οι παγοκρύσταλλοι που σχηματίζονται σε περιβάλλον κορεσμένο ως προς την υγρή φάση βρίσκονται και σε υπερκορεσμό ως προς τον πάγο και έτσι δεν εξαχνώνονται αμέσως.

Η πρώτη εμπειριστατωμένη θερμοδυναμική εξήγηση για τον σχηματισμό των contrails θεωρείται ότι ανήκει στον Herbert Appleman (Appleman, 1953), ο οποίος βασίστηκε πάνω στις ιδέες και θερμοδυναμικές εξισώσεις του Schmidt (Schmidt, 1941). Το λεγόμενο κριτήριο Schmidt – Appleman που αναπτύχθηκε, έδειξε ότι οι συνθήκες που απαιτούνται για τον σχηματισμό των contrails (απαιτούμενη θερμοκρασία και σχετική υγρασία), εξαρτώνται από την ατμοσφαιρική πίεση, την υγρασία του περιβάλλοντος και τα ποσοστά υδρατμών και θερμότητας που εκλύονται από τους κινητήρες του αεροσκάφους. (Schumann, 1996).

Εκτός από τα contrails που σχηματίζονται από τον υπερκορεσμό ως προς την υγρή φάση, στους υδρατμούς των καυσαερίων των αεροσκαφών και σε μικρή απόσταση από τους κινητήρες, υπάρχουν και άλλα δύο είδη contrails με διαφορετικό μηχανισμό σχηματισμού που εμφανίζονται σπανιότερα (Brewer, 1946). Τα γηραιά contrails, που

παραμένουν στον ουρανό για μεγάλο χρονικό διάστημα, εφόσον υπάρχουν συνθήκες υπερκορεσμού ως προς τον πάγο, και τέλος τα αεροδυναμικά contrails (Gierens et al., 2009). Τα τελευταία μπορούν να σχηματιστούν από αδιαβατική ψύξη του αέρα, λόγω απότομης πτώσης της πίεσης πάνω σε καμπύλες επιφάνειες του αεροσκάφους, όταν αυτά πετούν σε υγρό αέρα (Brewer, 1946; Gierens et al., 2009; Kärcher et al., 2009). Τέτοια αεροδυναμικά contrails μπορούν να εμφανίζονται ταυτόχρονα με τα κλασικά contrails υδρατμών – καυσαερίων και να μην διακρίνονται μεταξύ τους.

1.1.2. Κριτήριο Schmidt – Appleman

Το κριτήριο Schmidt – Appleman (Schmidt – Appleman Criterion, SAC) για τον σχηματισμό των contrails, προϋποθέτει εμφάνιση κορεσμού ως προς την υγρή φάση, τοπικά, στα καυσαέρια του αεροσκάφους. Η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται έπειτα από ισοβαρική ανάμειξη των καυσαερίων με τον ψυχρό αέρα του περιβάλλοντος. Αυτή η προϋπόθεση πληρείται όταν η θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον είναι μικρότερη από μια θερμοκρασία κατωφλίου T_c και η σχετική υγρασία ως προς την υγρή φάση U , είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή U_c . Το κριτήριο ως προς την σχετική υγρασία είναι υπολογιστικά πιο αποδοτικό από ότι το κριτήριο της θερμοκρασίας (Ponater et al., 2002). Μία καλή προσέγγιση δίδεται από τον (Schumann, 1996):

$$T_c = 46.46 + 9.43 \ln(G - 0.053) + 0.72[\ln(G - 0.053)]^2, T_c \text{ σε } ^\circ\text{C}, \text{ και } G \text{ σε Pa/K},$$

$$G = \frac{c_p p E_{H_2O}}{(M_{H_2O}/M_{air}) Q_{fuel} (1 - \eta)}, \eta = \frac{VF}{m_{fuel} Q_{fuel}}, U_c = \frac{G(T - T_c) + p_{liq}(T_c)}{p_{liq}(T)}$$

όπου, G είναι η κλίση της γραμμής ανάμειξης με ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p=1004 \text{ J/(kgK)}$, λόγο μοριακής μάζας του νερού και του αέρα $M_{H_2O}/M_{air} = 0.622$, ατμοσφαιρική πίεση p , δείκτη εκπομπών υδρατμών E_{H_2O} , θερμοκρασία καύσης του καυσίμου Q_{fuel} και αποδοτικότητα πρόωσης του κινητήρα η . Η ολική αποδοτικότητα πρόωσης σχετίζεται με το έργο που παράγει ο κινητήρας του αεροσκάφους με ώση F και ταχύτητα V , σε σχέση με την ενέργεια καύσης που παρέχεται από το καύσιμο όταν η ροή του είναι m_{fuel} .

Για αεροσκάφη που χρησιμοποιούν ως καύσιμο την κηροζίνη, και με αποδοτικότητα $\eta=0,3$, το SAC συνεπάγεται σχηματισμό contrails σε ύψος μεταξύ 8,4 km

και 14 km στην τυπική ατμόσφαιρα. Για ατμοσφαιρικές συνθήκες κοντά στις κρίσιμες, τα contrails γίνονται ορατά σχεδόν ένα μήκος φτερού πίσω από τους κινητήρες. Για μικρότερες θερμοκρασίες φαίνεται να σχηματίζονται ήδη μερικά μέτρα πίσω από τους κινητήρες. Το SAC έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά (Busen & Schumann, 1995; Jensen et al., 1998; Kärcher et al., 1998; Schumann, 1990)

1.1.3. Contrail Cirrus

Τα contrails έχει παρατηρηθεί ότι παραμένουν ορατά για έως και 4.1 ώρες μετά το σχηματισμό τους αν σχηματιστούν σε περιβάλλον με υπερκορεσμό ως προς το πάγο (Duda et al., 2004; Graf et al., 2012; Haywood et al., 2009; Minnis et al., 1998; Schumann & Wendling, 1990). Μετρήσεις δείχνουν ότι αρκετά συχνά η σχετική υγρασία στην ανώτερη τροπόσφαιρα ξεπερνάει το επίπεδο κορεσμού ως προς το πάγο (Jensen et al., 2001). Συνεπώς μπορούν να σχηματίζονται με μεγάλη συχνότητα contrails με μακρά διάρκεια ζωής. Με την πάροδο του χρόνου οι παγοκρύσταλλοι αυτών των contrails αυξάνονται σε μέγεθος και μάζα λόγω της εναπόθεσης της υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα. Η ολική μάζα του πάγου μέσα σε ένα γηραιό contrail, μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τους υδρατμούς που εκπέμπονται αρχικά από το αεροσκάφος (Schumann et al., 2012). Αυτά τα γηραιά contrails διαχέονται και μπορεί να εξαπλωθούν σε αρκετά χιλιόμετρα κυρίως λόγω του διατμητικού ανέμου (Freudenthaler et al., 1995). Έτσι ενώ αρχικά ήταν λεπτά και με μικρούς παγοκρυστάλλους, μετασχηματίζονται σε contrail cirrus με μεγάλους παγοκρυστάλλους και πλάτος (Εικόνα 2). Είναι δύσκολο να διακριθούν από τα φυσικά cirrus, καθώς έχουν όμοια χαρακτηριστικά. Η μελέτη αυτών των ανθρωπογενών νεφών είναι σημαντική καθώς έχει αποδειχθεί ότι κυρίως αυτά τα γηραιά contrails έχουν επίδραση στο κλίμα (Ponater et al., 1996a, 1996b).

Τα contrail cirrus σχηματίζονται και διατηρούνται σε περιοχές όπου ο αέρας είναι κορεσμένος ως προς το πάγο, ενώ τα φυσικά cirrus απαιτούν μεγάλα ποσοστά υπερκορεσμού ως προς τον πάγο προκειμένου να σχηματιστούν. Για αυτό το λόγο τα contrail cirrus μπορούν να σχηματιστούν σε κανονικά ανέφελες περιοχές, αυξάνοντας έτσι την νεφοκάλυψη και επιδρώντας στο ισοζύγιο των ακτινοβολιών. Σε αέριες μάζες με συχνή αεροπορική κυκλοφορία και μεγάλα ποσοστά υγρασίας, πολλά contrails δύνανται

να σχηματιστούν, και να τμηθούν, χάνοντας έτσι την γραμμική τους μορφή και σχηματίζοντας άμορφα contrail cirrus (Schumann et al., 2012). Αυτοί οι σχηματισμοί χαρακτηρίζουν περιοχές όπου παρατηρείται έξαρση στην εμφάνιση των contrails (Duda et al., 2004).

1.1.4. Radiative forcing των contrails

Με τον όρο contrail radiative forcing (CRF), ορίζεται η μεταβολή της ροής ενέργειας προς την επιφάνεια της Γης ανά μονάδα επιφάνειας παρουσία contrails σε σχέση με απουσία τους. Είναι δηλαδή ένα μέτρο της επίδρασης που έχουν τα contrails στο ισοζύγιο των ακτινοβολιών. Το CRF εξαρτάται κυρίως από την ολική κάλυψη των contrails και το οπτικό τους πάχος τ (Schumann et al., 2012). Θετικό CRF σημαίνει ότι η παρουσία των contrails έχει σαν αποτέλεσμα να εισέρχεται στην ατμόσφαιρα περισσότερη ακτινοβολία από ότι εξέρχεται, με αποτέλεσμα την θέρμανση της ατμόσφαιρας. Το κλίμα αντιδρά στην μεταβολή του ισοζυγίου των ακτινοβολιών με μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας όταν επέλθει θερμική ισορροπία ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και τους ωκεανούς, μετά από αρκετές δεκαετίες (Hansen et al., 2005).

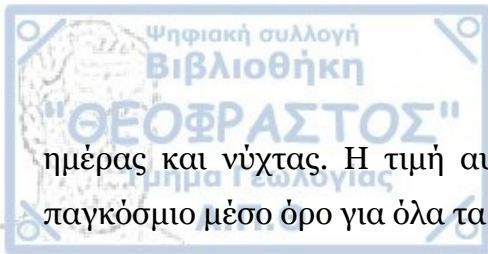
Το CRF αποτελείται από δύο μέρη, ένα μεγάλου μήκους κύματος και ένα μικρού μήκους κύματος και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τα contrail, τον ήλιο και παραμέτρους του συστήματος Γη -ατμόσφαιρα (Meerkötter et al., 1999). Το μεγάλου μήκους κύματος CRF είναι θετικό, δηλαδή οδηγεί σε θέρμανση. Εξαρτάται από την γήινη ακτινοβολία και συνεπώς έχει επίδραση τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα. Οδηγεί σε μειωμένη ψύξη της επιφάνειας της Γης, σε σχέση με την περίπτωση ανέφελου ουρανού, καθώς η μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την Γη παγιδεύεται από τα contrails και δεν διαφεύγει στο διάστημα. Το μικρού μήκους κύματος CRF, είναι κατά βάση αρνητικό δηλαδή οδηγεί σε ψύξη. Σχετίζεται με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς έχει επίδραση μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η παρουσία των contrails ιδιαίτερα πάνω από σκούρες επιφάνειες, όπως για παράδειγμα οι ωκεανοί, αυξάνει την ανακλαστικότητα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα μικρότερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάνει στην επιφάνεια. (Dietmüller et al., 2008).

Οι λεπτομέρειες που καθορίζουν το CRF εξαρτώνται κυρίως από τις οπτικές ιδιότητες των παγοκρυστάλλων των contrails, όπως η απορρόφηση και η σκέδαση του φωτός. Με τη σειρά τους οι οπτικές αυτές ιδιότητες εξαρτώνται από το μέγεθος, τη μορφή (habit) και τον προσανατολισμό των παγοκρυστάλλων, που εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος (Gierens, 1996). Σε νεαρά contrails, οι παγοκρυστάλλοι είναι μικροί (1 – 20 μm) και μικρότεροι από αυτούς που εντοπίζονται στα φυσικά cirrus. Είναι επίσης μη σφαιρικοί και τυχαία προσανατολισμένοι. Με το πέρασ του χρόνου, οι παγοκρυστάλλοι στα γηραιότερα contrails, πλησιάζουν περισσότερο σε μέγεθος και μορφολογία αυτούς των φυσικών cirrus. Οι μη σφαιρικοί παγοκρυστάλλοι σκεδάζουν περισσότερο το φως προς τα πλάγια και είναι πιο αποδοτικοί στην ψύξη της ατμόσφαιρας (Schumann et al., 2012). Για σταθερή ποσότητα παγοκρυστάλλων, contrails με μικρότερους παγοκρυστάλλους επιφέρουν πολύ μεγαλύτερη θέρμανση στην ατμόσφαιρα, έως 80 K/ημέρα συγκριτικά με τα 10 K/ημέρα ενός cirrus με μεγάλους παγοκρυστάλλους (Gothe & Graßl, 1993). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα συνολικά να θεωρείται ότι τα contrails οδηγούν σε θέρμανση της ατμόσφαιρας.

1.1.5. Επίδραση των contrails στο κλίμα

Τα contrails πιθανά έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις μικρής χρονικής διάρκειας κλιματικές επιδράσεις της αεροπλοΐας (Burkhardt & Kärcher, 2011; Lee et al., 2009). Ο βασικός τρόπος με τον οποίο επιδρούν στο κλίμα είναι λόγω της τεχνητής αύξησης της νεφοκάλυψης και της επακόλουθης επίδρασης στο ισοζύγιο των ακτινοβολιών. (Penner et al., 2009; Stephens & Webster, 1981). Η απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από την κατώτερη ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης, είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας την ημέρα (Bugliaro et al., 2012; Mannstein et al., 2012). Παρ' όλα αυτά η ακριβής τιμή του μέσου, παγκόσμιου, ετήσιου CRF παραμένει ακόμη αβέβαιη (Schumann et al., 2012).

Τα contrails βέβαια έχουν πολύ πιο ισχυρές τοπικές επιδράσεις, από ότι θα ήταν αναμενόμενο από τις παγκόσμιες μέσες τιμές. Το τοπικό CRF για contrail cirrus με οπτικό βάθος περίπου 0,1 μπορεί να κυμαίνεται τυπικά κατά $\pm 10\text{W}/\text{m}^2$, για παράδειγμα μεταξύ



ημέρας και νύχτας. Η τιμή αυτή είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο για όλα τα contrail cirrus (Schumann et al., 2012).

1.2. Δορυφορική τηλεπισκόπηση

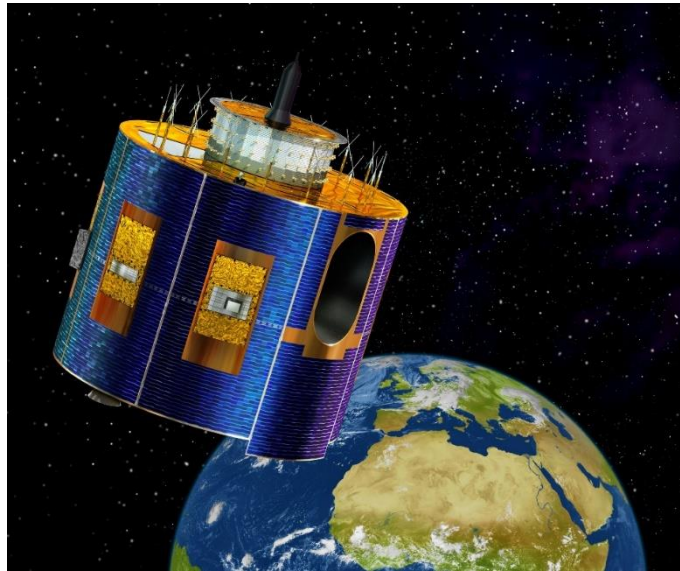
Ο όρος τηλεπισκόπηση ή τηλεανίχνευση (remote sensing) χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας λήψης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μία περιοχή ή φαινόμενο, με τη χρήση ανιχνευτικών συσκευών που δεν βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης (Καρτάλης & Φείδας, 2006). Πιο συγκεκριμένα, η τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος σημαίνει απόκτηση πληροφοριών με την από απόσταση μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο η δορυφορική τηλεπισκόπηση (satellite remote sensing), δηλαδή η καταγραφή δεδομένων από ανιχνευτές οι οποίοι φέρονται από δορυφόρους (Εικόνα 3). Η δορυφορική τηλεπισκόπηση, για τη μελέτη της ατμόσφαιρας της γης, άρχισε την δεκαετία του 1960, όταν οι τεχνικές δυνατότητες των δορυφόρων συνέκλιναν με την ραγδαία ανάπτυξη των δυνατοτήτων των Η/Υ για τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

1.2.1. Βασικά στοιχεία δορυφορικής τηλεπισκόπησης

Οι αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είτε ανακλάται ή εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια σε διάφορες φασματικές περιοχές. Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες έχει διαμορφωθεί από την αλληλεπίδραση της με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης και συνεπώς μεταφέρει πληροφορία για τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

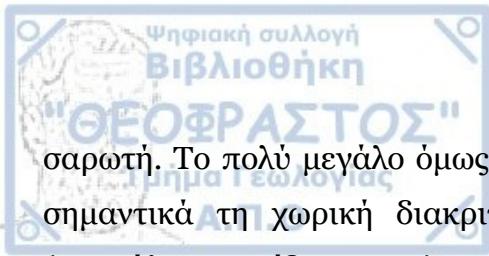
Τα καταγραφικά συστήματα που φέρονται από δορυφόρους ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των ραδιομέτρων (radiometer), τα οποία αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι δορυφορικοί αισθητήρες κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τη πηγή της ακτινοβολίας που καταγράφουν: τους παθητικούς και τους ενεργητικούς. Οι παθητικοί αισθητήρες (passive sensors) αποτελούν συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από το παρατηρούμενο αντικείμενο - στόχο. Αντίθετα, οι ενεργητικοί ανιχνευτές (active

sensors) χρησιμοποιούν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό έρευνα αντικείμενο, αυτή στη συνέχεια ανακλάται στο στόχο (αντικείμενο ή περιοχή της επιφάνειας της γης), επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα (Καρτάλης & Φείδας, 2006).



Εικόνα 3: Καλλιτεχνική απεικόνιση δορυφόρου MSG. ESA - D. Ducros

Βασικός παράγοντας που καθορίζει τη λειτουργία του εκάστοτε ραδιομέτρου, είναι ο δορυφόρος στον οποίο φέρεται. Το ύψος της τροχιάς που τίθενται οι δορυφόροι κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 800 και 1500 km. Υπάρχουν όμως και δορυφόροι που η τροχιά τους βρίσκεται σε πολύ μεγάλο ύψος, περίπου 36000 km. Οι δορυφόροι της πρώτης κατηγορίας ονομάζονται δορυφόροι χαμηλής τροχιάς και της δεύτερης κατηγορίας καλούνται υψηλής τροχιάς ή γεωστάσιμοι. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροχιάς τους, οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς διακρίνονται σε: Ισημερινής τροχιάς, πολικής τροχιάς και πλάγιας τροχιάς. Οι δορυφόροι υψηλής τροχιάς (high-level earth observation satellites) περιστρέφονται γύρω από τη γη, στο επίπεδο του ισημερινού της γης, σε πολύ μεγάλο ύψος, περίπου 36000 km. Η τροχιά αυτή έχει την ιδιαιτερότητα ο δορυφόρος να κινείται με γωνιακή ταχύτητα ίση με αυτή της γης. Με τον τρόπο αυτό, ο δορυφόρος βρίσκεται στάσιμος πάνω από μια περιοχή της γης, και για αυτό το λόγο ονομάζεται γεωστάσιμος (geostationary earth observation satellites, GEOs'). Επιτυγχάνεται έτσι συνεχής κατόπτευση του γήινου δίσκου με πολύ μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα, η οποία εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του

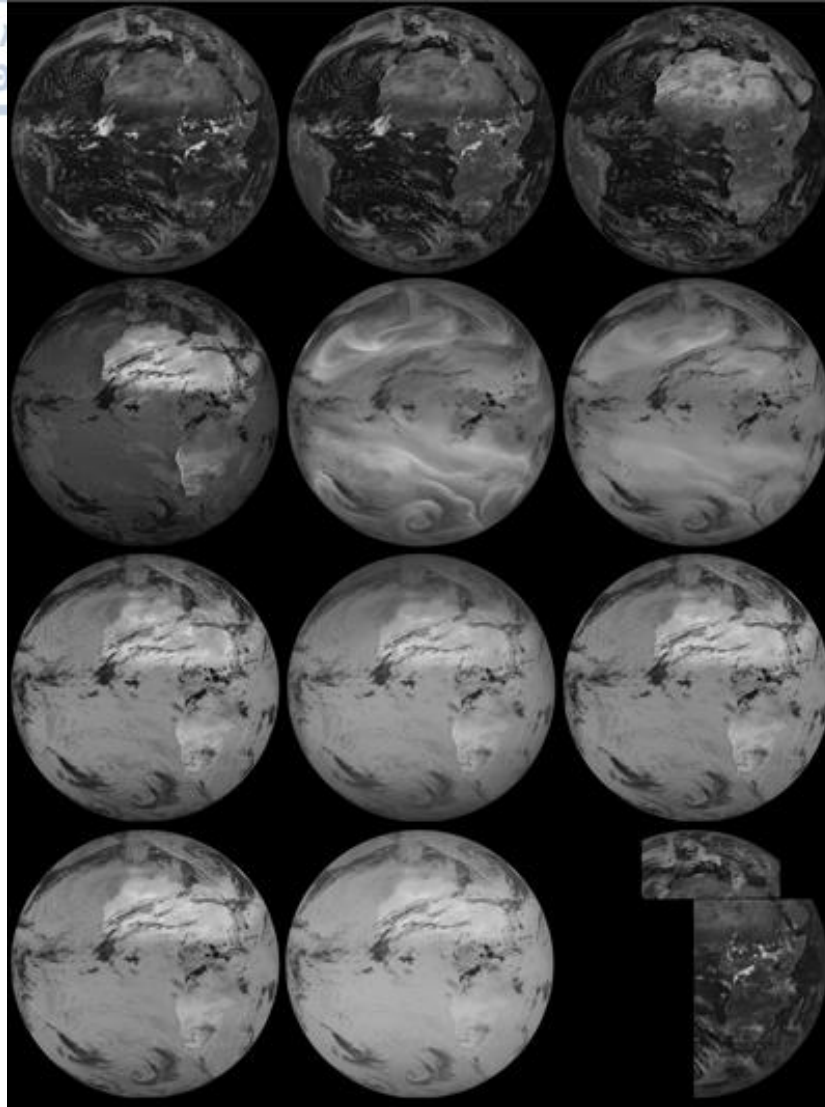


σαρωτή. Το πολύ μεγάλο όμως ύψος τροχιάς των γεωστάσιμων δορυφόρων περιορίζει σημαντικά τη χωρική διακριτική ικανότητα των αισθητήρων που αυτοί φέρουν (Καρτάλης & Φείδας, 2006).

1.2.2. SEVIRI – MSG

Από τους πιο σημαντικούς μετεωρολογικούς δορυφόρους είναι οι Meteosat (Meteorological Satellite), οι οποίοι λειτουργούν υπό την αιγίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT). Το 2002 ξεκίνησε το πρόγραμμα MSG (Meteosat Second Generation) με την εκτόξευση σε τροχιά του MSG-1 που μετονομάστηκε σε Meteosat-8, όταν ξεκίνησε να λειτουργεί (Εικόνα 3) (Bugliaro et al., 2012). Για το έτος 2016, που μελετάται στην παρούσα εργασία, ο εν ενεργεία δορυφόρος ήταν ο Meteosat-10. Βρισκόταν σε γεωστάσιμη τροχιά στη σταθερή θέση 0° B, 0° A και σε ύψος 35800 km, δηλαδή περιστρέφονταν με τη συχνότητα περιστροφής της γης. Το κύριο όργανο που διαθέτουν οι δορυφόροι δεύτερης γενιάς MSG είναι ο απεικονιστής με την ονομασία SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra-red Imager). Το ραδιόμετρο SEVIRI επί του δορυφόρου Meteosat-10, λάμβανε μία εικόνα του δίσκου της γης κάθε 15 λεπτά, σε δώδεκα κανάλια που καλύπτουν διαφορετικές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Schmetz et al., 2002). Τέσσερα κανάλια χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στη φασματική περιοχή του ορατού ενώ τα υπόλοιπα οκτώ κανάλια καταγράφουν συγκεκριμένα μήκη κύματος στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Μία σύντομη περιγραφή αυτών των καναλιών δίνεται στον Πίνακα I. Οι εικόνες αυτές αποτυπώνονται σε πλέγμα μεγέθους 3712x3712 εικονοστοιχεία στα κανάλια 1 έως 11 και 5568 x11136 στο υψηλής ανάλυσης ορατό κανάλι 12 (Schmetz et al., 2002). Η χωρική διακριτική ικανότητα είναι 1 km στο ζενίθ για το κανάλι υψηλής ανάλυσης στο ορατό (κανάλι 12) και 3 km για τα υπόλοιπα έντεκα κανάλια, στο ζενίθ, δηλαδή στην κάθετο δορυφόρου - επιφάνειας (Schmetz et al., 2002; Καρτάλης & Φείδας, 2006). Το πεδίο του δίσκου της γης που είναι ορατό από το SEVIRI, καθώς και ενδεικτικές εικόνες για κάθε ένα από τα δώδεκα κανάλια παρατίθενται στην Εικόνα 4.

Αριθμός Καναλιού	Όνομα καναλιού	Περιοχή του Η/Μ φάσματος	Μήκος κύματος στο κέντρο (μm)	Χαρακτηριστικά
1	VISo.6	Ορατό	0.6	Μπλε (ατμοσφαιρικό παράθυρο)
2	VISo.8	Ορατό	0.8	Πράσινο (ατμοσφαιρικό παράθυρο)
3	NIR1.6	Εγγύς Υπέρυθρο	1.6	Κόκκινο (ατμοσφαιρικό παράθυρο)
4	IR3.9	Μέσο υπέρυθρο	3.9	Ατμοσφαιρικό παράθυρο
5	WV6.2	Μέσο υπέρυθρο	6.2	Απορρόφηση υδρατμών
6	WV7.3	Μέσο υπέρυθρο	7.3	Απορρόφηση υδρατμών
7	IR8.7	Θερμικό υπέρυθρο	8.7	Ατμοσφαιρικό παράθυρο
8	IR9.7	Θερμικό υπέρυθρο	9.7	Απορρόφηση O ₃
9	IR10.8	Θερμικό υπέρυθρο	10.8	Ατμοσφαιρικό παράθυρο
10	IR12.0	Θερμικό υπέρυθρο	12.0	Ατμοσφαιρικό παράθυρο
11	IR13.4	Θερμικό υπέρυθρο	13.4	Απορρόφηση CO ₂
12	HRV	Ορατό	0.75	Ατμοσφαιρικό παράθυρο και απορρόφηση υδρατμών



Εικόνα 4: Εικόνες του δίσκου της Γης για τα 12 κανάλια του SEVIRI. Κανάλι 1 επάνω αριστερά, κανάλι 12 κάτω δεξιά. Πηγή: EUMETSAT

1.2.3. Εντοπισμός contrails από δορυφορικά δεδομένα

Γενικότερα τα νέφη παγοκρυστάλλων είναι ορατά στις εικόνες του θερμικού υπέρυθρου Ch09 στα 10,8μm και Ch10 στα 12,0μm του SEVIRI λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λαμπρότητας που έχουν σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία της εικόνας. Ειδικότερα, όπως πρώτος παρατήρησε ο Thomas Lee ήδη το 1989 (Lee, 1989) νέφη με μικρούς παγοκρυστάλλους, όπως τα νεαρά contrails (Gayet et al., 1996), φαίνονται πιο φωτεινά στο κανάλι Ch09 στα 10,8μm από ότι στο κανάλι Ch10 στα 12,0μm του SEVIRI (Ch4 στα 10,3 μm και Ch5 στα 11,5 μm για το AVHRR). Αντίθετα τα φυσικά cirrus που έχουν μεγαλύτερους παγοκρυστάλλους, καθώς και τα νέφη υδροσταγόνων έχουν όμοια



φωτεινότητα στα δύο κανάλια (Gothe & Graßl, 1993). Συνεπώς αφαιρώντας τις δύο εικόνες, $TD = 10,8\mu\text{m}-12\mu\text{m}$, ενισχύονται τα contrails ενώ αφαιρούνται τα υπόλοιπα νέφη από την εικόνα. Έτσι γίνεται πιο εύκολος ο εντοπισμός τους (Mannstein et al., 1999).

Η παρατήρηση δορυφορικών εικόνων από ανθρώπους και ο χειροκίνητος εντοπισμός των contrails είναι μία άκρως υποκειμενική διαδικασία. Για τα δεδομένα του AVHRR διάφοροι εκπαιδευμένοι παρατηρητές εκτίμησαν κάλυψη από contrails μέχρι και δυο τάξεις μεγέθους διαφορετικές μεταξύ τους. Επιπλέον είναι μια διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα και δε μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη επιλογή για την παρατήρηση των contrails σε βάθος χρόνου (Mannstein et al., 1999). Για το λόγο αυτό έγιναν αρκετές προσπάθειες ανάπτυξης αλγορίθμων αυτόματου εντοπισμού, που δεν απαιτούν ανθρώπινο παρατηρητή. Οι περισσότεροι από αυτούς τους αλγορίθμους αξιοποιούν τη γραμμική μορφή των contrails και τη φωτεινότητά τους στη διαφορά θερμοκρασίας $10,8\mu\text{m}-12\mu\text{m}$ (Lee, 1989) για τον εντοπισμό τους. Η γραμμική μορφή μπορεί να ενισχυθεί εφαρμόζοντας έναν μετασχηματισμό Hough (Pratt, 1991) στις δορυφορικές εικόνες θερμοκρασίας λαμπρότητας.

Οι πρώτοι τέτοιοι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν από τους (Engelstad et al., 1992) και (Forkert et al., 1993) και αξιοποιούσαν τις παραπάνω αρχές εντοπισμού. Ο αλγόριθμος των (Engelstad et al., 1992) ήταν αρκετά επιτυχής στις περισσότερες σκηνές αλλά είχε την τάση να χαρακτηρίζει ως contrails φυσικά γραμμικά νέφη cirrus (Mannstein et al., 1999). Αργότερα ο αλγόριθμος των (Forkert et al., 1993) υποεκτιμούσε την κάλυψη από contrails όταν αυτά είχαν μεγάλο πλάτος και πολύ συχνά αναγνώριζε ως contrails ακτογραμμές, κοιλάδες και όρια νεφών (Mannstein et al., 1999). Ένα σημαντικό βήμα έγινε το 1994 όταν ο (Meinert, 1994) αποπειράθηκε να εκπαιδεύσει ένα νευρονικό δίκτυο ώστε να αναγνωρίζει τα contrails στις δορυφορικές εικόνες του AVHRR. Η απαίτηση για την ύπαρξη πολύ ακριβών και πολλών δειγμάτων για κάθε δυνατή περίπτωση εμφάνισης contrail, ο μεγάλος αριθμός των απαραίτητων νευρώνων και ο πολύς απαιτούμενος χρόνος εκπαίδευσης κατέστησαν αυτή την απόπειρα μη βιώσιμη (Meinert et al., 1997). Πολύ πρόσφατα και με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών πραγματοποιήθηκαν νέες προσπάθειες με πιο αισιόδοξα αποτελέσματα, όπως των (Zhang et al., 2018).

Μία από τις πρώτες και πιο επιτυχείς προσπάθειες ανάπτυξης αλγορίθμου για τον αυτοματοποιημένο εντοπισμό contrails σε δορυφορικές εικόνες έγινε το 1999, όταν και αναπτύχθηκε ο Contrail Detection Algorithm, CDA (Mannstein et al., 1999), που βασίζεται σε προηγούμενη εργασία των (Forkert et al., 1993; Mannstein & Meyer, 1997). Ο αλγόριθμος αυτός μπορούσε να εντοπίζει contrails στις εικόνες του ραδιομέτρου Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) που φέρεται στους δορυφόρους πολικής τροχιάς του National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Πιο συγκεκριμένα αξιοποιεί τις εικόνες της διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας ανάμεσα στα κανάλια 4 και 5 και εντοπίζει γηραιά και γραμμικά contrails. Σε αυτή τη διαφορά, φαίνονται πολύ έντονα και οι άκρες νεφικών σχηματισμών καθώς και στοιχεία της επιφάνειας. Για την αποφυγή λαθών χρησιμοποιήθηκε και το κανάλι 5 σαν δεδομένο για τον εντοπισμό.

Η παραμετροποίηση του CDA ήταν τέτοια ώστε να έχει πολύ μικρά ποσοστά λανθασμένων εντοπισμών (0.1%) παρά το μικρό ποσοστό επιτυχών εντοπισμών (30 % - 50 %) που συνεπαγόταν (Mannstein et al., 1999). Από την εφαρμογή του αλγορίθμου, προέκυψε ότι τα contrails εμφανίζονται συχνά σε μεγάλες ομάδες. Αυτές οι ομάδες χαρακτηρίζουν περιοχές όπου η κατάσταση της ατμόσφαιρας ευνοεί την ανάπτυξη και διατήρηση των contrails.

Ο CDA έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό γραμμικών contrails σε διάφορες μελέτες και διάφορες περιοχές της Γης και με εικόνες διαφόρων δορυφόρων: κεντρική Ευρώπη (Meyer et al., 2002), Βόρεια Αμερική (Palikonda et al., 2005), Ανατολικός Βόρειος Ειρηνικός (Minnis et al., 2005), Νότια και Ανατολική Ασία (Meyer et al., 2007) και Βόρειος Ατλαντικός (Graf et al., 2012). Τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα από τους (Bedka et al., 2013; Duda et al., 2013; Spangenberg et al., 2013) για την εκτίμηση ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των γραμμικών contrails στο Βόρειο Ημισφαίριο.

Από την αξιολόγηση του CDA μέσω παρατήρησης των δορυφορικών εικόνων δια οφθαλμού, προέκυψε ότι η ικανότητα εντοπισμού των contrails είναι μικρή όταν τα contrails είχαν μέσο πλάτος μικρότερο από 1,9 km, ενώ δεν ήταν εφικτός ο εντοπισμός πολύ αδύναμων contrails τα οποία θα μπορούσε να αναγνωρίσει το ανθρώπινο μάτι,

όπως για παράδειγμα πολύ γηρασμένα contrails που έχουν διαχυθεί και δεν διακρίνονται εύκολα από τα φυσικά νέφη cirrus. Τέλος εντοπίζεται δυσκολία στον εντοπισμό των contrails σε περιπτώσεις που αυτά καλύπτουν μεγάλο μέρος της σκηνής, με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται και να μην είναι εύκολα διακριτή η γραμμική τους μορφή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο εντοπισμός των contrails σε περιοχές με μεγάλη αεροπορική κυκλοφορία παρά τις ευνοϊκές συνθήκες σχηματισμού (Mannstein et al., 1999). Επιπρόσθετα, από την αξιολόγηση προέκυψε ότι εντοπίζονται περισσότερα contrails πάνω από τη θάλασσα, και τους χειμερινούς μήνες. Δεν είναι απόλυτα βέβαιο αν το γεγονός αυτό έχει κάποια φυσική σημασία ή αν προέρχεται λόγω της καλύτερης ικανότητας εντοπισμού από τον αλγόριθμο σε αυτές τις συνθήκες. Τα παραπάνω έχουν αντίκτυπο και στην παρούσα εργασία καθώς χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένη έκδοση του CDA.

1.3. Αναγκαιότητα και στόχοι εργασίας

Τα contrails και τα contrail cirrus, αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς και παράλληλα λιγότερο κατανοητούς παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα (Chauvigné et al., 2018; Kärcher et al., 2018; Liou, 1986; Rosenow & Fricke, 2019; Schumann et al., 2012; Vázquez-Navarro et al., 2015). Δύνανται να αυξήσουν τη νεφοκάλυψη σε μεγάλα υψόμετρα, ειδικά όταν μετατρέπονται σε contrail cirrus (Duda et al., 2013; Eichenlaub, 1982; Schumann et al., 2012). Τα φυσικά νέφη cirrus, τα contrail cirrus, και τα contrails, μειώνουν την εξερχόμενη θερμική ακτινοβολία της Γης ενώ αυξάνουν μόνο λίγο την ανακλαστικότητα της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα νεαρά contrails, έχουν πολύ πιο σημαντική επίδραση στην θέρμανση της ατμόσφαιρας, από ότι τα contrail cirrus και τα φυσικά cirrus, λόγω του μικρού μεγέθους των παγοκρυστάλλων τους (Gothe & Grafl, 1993). Συνεπώς, αύξηση του αριθμού αυτών των νεφών μπορεί να οδηγήσει σε θέρμανση της επιφάνειας του πλανήτη την ώρα που άλλα σύννεφα οδηγούν σε ψύξη (Liou, 1986; Stephens & Webster, 1981). Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον και τις πολλές εργασίες που έχουν δημοσιευτεί τις τελευταίες δεκαετίες σχετικά με το CRF και άλλες ιδιότητες των contrails και των contrail cirrus (Atlas et al., 2006; Bakan et al., 1994; Duda et al., 2013; Iwabuchi et al., 2012; Mannstein et al., 1999; Meyer et al., 2007; Minnis et al., 2004; Palikonda et al., 2005), το επίπεδο κατανόησης για τα contrails είναι μικρό και για τα επαγόμενα contrail cirrus πολύ μικρό (Lee et al., 2010; Vázquez-Navarro et al., 2015).

Η αεροπορική κυκλοφορία αναμένεται να έχει ετήσια αύξηση 2 % - 5 % τα επόμενα τριάντα χρόνια και κατά συνέπεια αναμένεται αύξηση και της κάλυψης από contrails που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα μέχρι το 2050 (Bock & Burkhardt, 2019; Minnis et al., 2004; Minnis et al., 1999). Συγκεκριμένα για τις Η.Π.Α. προβλέπεται τροποσφαιρική θέρμανση 0,2°C – 0,3°C ανά δεκαετία (Minnis et al., 2004), ενώ παγκόσμια το CRF μπορεί να φτάσει 160 – 180 mW*m⁻² (Bock & Burkhardt, 2019).

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και έρευνα των contrails και μάλιστα σε τοπικό επίπεδο, καθώς εκεί εντοπίζονται οι μεγαλύτερες επιδράσεις. Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα για τον εντοπισμό και την μελέτη των contrails, είναι όμοια από την αρχή της προηγούμενης δεκαετίας και ενέχουν μεγάλα σφάλματα και αβεβαιότητες. Είναι λοιπόν σημαντικό να αναπτυχθούν και νέες βελτιωμένες μέθοδοι αυτοματοποιημένου εντοπισμού των contrails.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα που θα οδηγήσουν στην καλύτερη κατανόηση των contrails. Πρώτος στόχος της εργασίας είναι η εφαρμογή ενός αλγορίθμου αυτόματου εντοπισμού contrails σε δορυφορικές εικόνες. Σαν βάση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος CDA (Mannstein et al., 1999), με τη βοήθεια του Luke Kulik, MIT, προσαρμοσμένος στις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Δεύτερος στόχος είναι να μελετηθούν κάποια γενικά χαρακτηριστικά των contrails, όπως η γεωγραφική τους κατανομή και η μορφολογία τους. Τέλος ο βασικότερος στόχος είναι να εντοπιστούν εκείνες οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη και τον εντοπισμό των contrails στις δορυφορικές εικόνες.



2. Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα για τον εντοπισμό των contrails στην περιοχή ενδιαφέροντος, και για το έτος 2016. Έπειτα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επανάλυσης (reanalysis), προκειμένου να εντοπιστούν για κάθε contrail οι μετεωρολογικές παράμετροι που ευνοούν την ανάπτυξη και τον εντοπισμό τους. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν και κάποια βοηθητικά δεδομένα, για τις διαδικασίες της στατιστικής ανάλυσης και της εξαγωγής αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικότερες πληροφορίες για κάθε μία από τις κατηγορίες δεδομένων.

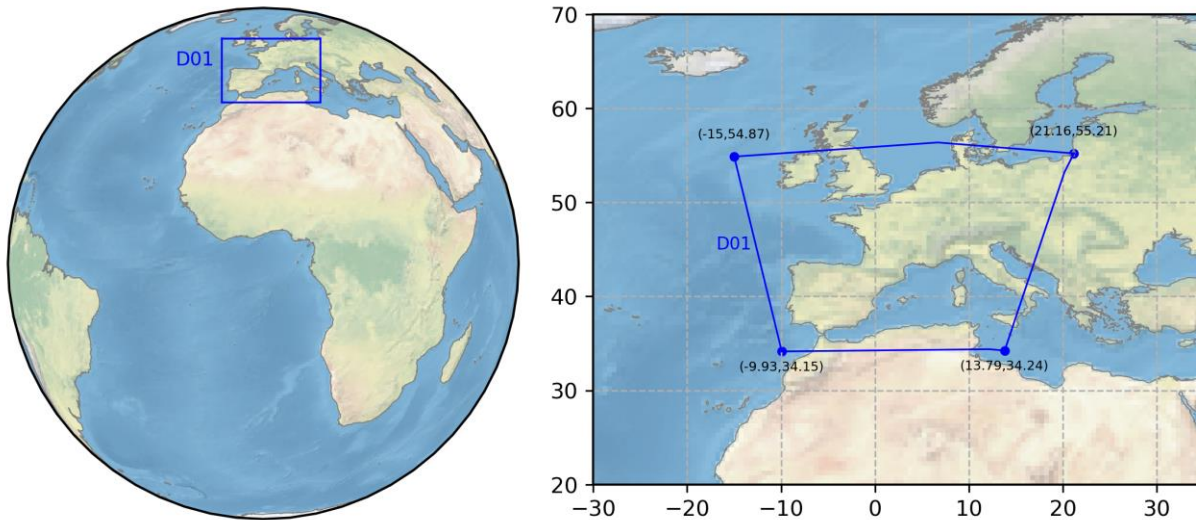
2.1. Δορυφορικά δεδομένα

Τα δορυφορικά δεδομένα προέρχονται από το ραδιόμετρο SEVIRI που φέρεται από τους μετεωρολογικούς δορυφόρους Meteosat του προγράμματος MSG της EUMETSAT. Πρόκειται για δορυφορικές εικόνες του δίσκου της γης που καλύπτουν την χρονική περίοδο 01/01/2016 00:00 μέχρι 31/12/2016 23:45, δηλαδή το σύνολο του έτους 2016. Το χρονικό βήμα των δεδομένων είναι 15 λεπτά, καθώς αυτό είναι και το χρονικό βήμα με το οποίο λαμβάνει εικόνες της γης το SEVIRI. Τα δεδομένα είναι επιπέδου 1.5, δηλαδή έχουν περάσει μία αρχική επεξεργασία για βελτιστοποίηση και διορθώσεις διαφόρων σφαλμάτων. Αυτή η επεξεργασία γίνεται από τα επίγεια τμήματα της EUMETSAT σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Τα δεδομένα αυτά παρέχονται από την EUMETSAT στο Earth Observation Center (EOC), του German Aerospace Center (DLR), όπου και αποθηκεύονται στο Data Information Management System (DIMS) σε μορφή High Rate Information Transmission (HRIT). Από τα δώδεκα διαθέσιμα κανάλια του SEVIRI, χρησιμοποιούνται μόνο τρία, το κανάλι 9, IR10.8, το κανάλι 10, IR12.0 και το κανάλι 6, WV7.3 (Πίνακας I).

Από το σύνολο του τμήματος του δίσκου της γης που καταγράφεται από το SEVIRI, επιλέγεται μόνο μία περιοχή ενδιαφέροντος. Η περιοχή αυτή καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της κεντρικής και Δυτικής Ευρώπης. Στα επόμενα θα αναφέρεται ως περιοχή Do1 (domain 01). Η περικοπή της δορυφορικής εικόνας γίνεται με βάση των αριθμό των εικονοστοιχείων. Από το αρχικό πλέγμα 3712x3712 εικονοστοιχεία, ο άξονας

των γεωγραφικών μηκών περιορίζεται στα εικονοστοιχεία 1450 έως 2150 και ο άξονας των γεωγραφικών πλατών στα εικονοστοιχεία 3000 έως 3450. Η προβολή των δεδομένων είναι σε σφαιρικές συντεταγμένες, επομένως η περιοχή D01, είναι ορθογώνια σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων. Σε τιμές γεωγραφικού μήκους και πλάτους, ορίζεται από τέσσερα σημεία Α(-9.930, 34.151), Β(13.791, 34.244), Γ(21.161, 55.209) και Δ(-14.997, 54.867) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: **Αριστερά:** Περιοχή ενδιαφέροντος D01 σε σφαιρικές συντεταγμένες. **Δεξιά:** Λεπτομερής απεικόνιση περιοχής ενδιαφέροντος D01 σε ορθογώνιες συντεταγμένες.

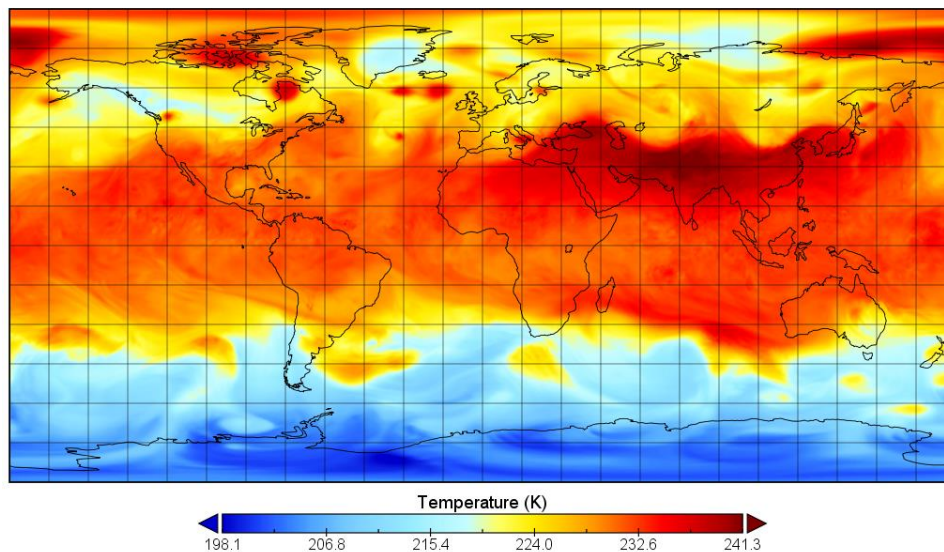
Παρόμοια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και για την εκπόνηση της μελέτης περίπτωσης. Οι εικόνες προέρχονται αυτή τη φορά από το Earth Observation Portal (EOP) της EUMETSAT. Πρόκειται για εικόνες που λήφθηκαν και πάλι από το ραδιόμετρο SEVIRI των δορυφόρων MSG κωδικοποιημένες σε «native» μορφή. Η ανάλυση και επεξεργασία των εικόνων, καθώς και η κατασκευή των rgb έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος “Nubes” που έχει αναπτυχθεί από την PraPro.

2.2. Δεδομένα επανάλυσης ERA-5

Τα δεδομένα reanalysis συνδυάζουν δεδομένα μοντέλων με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο σε μία ενιαία βάση δεδομένων. Στόχος είναι να παραχθεί ένα πλέγμα στο οποίο θα αποτυπώνονται οι διορθωμένες μετεωρολογικές συνθήκες σε κάθε σημείο. Η βασική αρχή, ονομάζεται αφομοίωση δεδομένων (data assimilation) και χρησιμοποιείται και από προγνωστικά κέντρα, όπου βραχυπρόθεσμες προγνώσεις συνδυάζονται με καινούριες

παρατηρήσεις, ώστε να παραχθεί μια νέα βελτιστοποιημένη εκτίμηση για την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η βάση δεδομένων reanalysis ERA-5 του ECMWF. Τα δεδομένα είναι ωριαία και αποτυπώνονται σε πλέγμα με ανάλυση $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ στο οριζόντιο επίπεδο. Κατακόρυφα διακρίνονται σε ισοβαρικά επίπεδα.

Το μέσο ύψος πτήσεως των αεροσκαφών στην Ευρώπη είναι περίπου στα 35000 πόδια ή 10668 μέτρα. Κατά προσέγγιση αυτό μεταφράζεται στο επίπεδο της ατμόσφαιρας με ατμοσφαιρική πίεση 238 hPa. Για το λόγο αυτό τα δεδομένα επιλέχθηκαν στο κοντινότερο επίπεδο των 250 hPa. Από το σύνολο των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων ERA-5, επιλέχθηκαν η ειδική και σχετική υγρασία, η θερμοκρασία, καθώς και οι συνιστώσες U και V της ταχύτητας του ανέμου. Αναλυτικές πληροφορίες για την κάθε παράμετρο δίνονται παρακάτω στον Πίνακα II. Στην Εικόνα 6, παρουσιάζεται το περιεχόμενο ενός αρχείου reanalysis της βάσης ERA - 5, για την θερμοκρασία στο επίπεδο των 250hPa.



Εικόνα 6: Παράδειγμα αρχείου ERA-5. Θερμοκρασία στα 250hPa στις 15/07/2016 15:00 UTC.

Πίνακας II: Περιγραφή μετεωρολογικών παραμέτρων reanalysis.

Όνομα παραμέτρου	Μονάδα μέτρησης	Σύντομη Περιγραφή
Σχετική υγρασία	%	Πρόκειται για την μερική πίεση των υδρατμών ως ποσοστό της τιμής στην οποία ο αέρας καθίσταται κορεσμένος. Για θερμοκρασίες άνω των 0°C, υπολογίζεται για κορεσμό πάνω από υδάτινη επιφάνεια. Για θερμοκρασίες κάτω από -23°C υπολογίζεται για κορεσμό πάνω από παγωμένη επιφάνεια. Μεταξύ -23°C και 0°C υπολογίζεται από παρεμβολή μεταξύ των τιμών για υγρή και παγωμένη επιφάνεια.
Ειδική υγρασία	kg kg ⁻¹	Αυτή η παράμετρος είναι η μάζα των υδρατμών ανά χιλιόγραμμο υγρού αέρα. Η ολική μάζα του υγρού αέρα, είναι το άθροισμα του ξηρού αέρα, των υδρατμών, της υγρασίας των νεφών, του πάγου των νεφών, της βροχής και του χιονιού
Θερμοκρασία	K	Πρόκειται για τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε μονάδες Kelvin.
U-συνιστώσα του ανέμου	m s ⁻¹	Αυτή η παράμετρος, είναι η ζωνική ταχύτητα του ανέμου στη διεύθυνση δύσης ανατολής. Αρνητικές τιμές αυτής της παραμέτρου δείχνουν φορά του ανέμου προς τα δυτικά, δηλαδή ανατολικό άνεμο.
V- συνιστώσα του ανέμου	m s ⁻¹	Αυτή η παράμετρος, είναι η μεσημβρινή ταχύτητα του ανέμου στη διεύθυνση βορρά νότου. Αρνητικές τιμές αυτής της παραμέτρου δείχνουν φορά του ανέμου προς τα νότια, δηλαδή βόρειο άνεμο.

2.3. Βοηθητικά δεδομένα

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των δεδομένων και με στόχο την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, υπήρξε η απαίτηση για χρήση κάποιων βοηθητικών δεδομένων. Ένας από τους στόχους της εργασίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι να εντοπιστεί η ακριβής θέση των εντοπισμένων contrails. Όπως έχει επίσης αναφερθεί, οι δορυφορικές εικόνες καταγράφονται σε πλέγμα εικονοστοιχείων και δεν περιλαμβάνουν γεωγραφική πληροφορία. Συνεπώς, όταν θα εντοπίζεται ένα contrail, η θέση του θα καταγράφεται σε αριθμό εικονοστοιχείων επί του πλέγματος της εικόνας. Προκειμένου λοιπόν να μεταφραστεί η θέση σε γεωγραφικές συντεταγμένες, απαιτείται γνώση των συντεταγμένων του κέντρου κάθε εικονοστοιχείου. Η πληροφορία αυτή δόθηκε σαν δεδομένο από τον Luca Bugliaro, DLR.

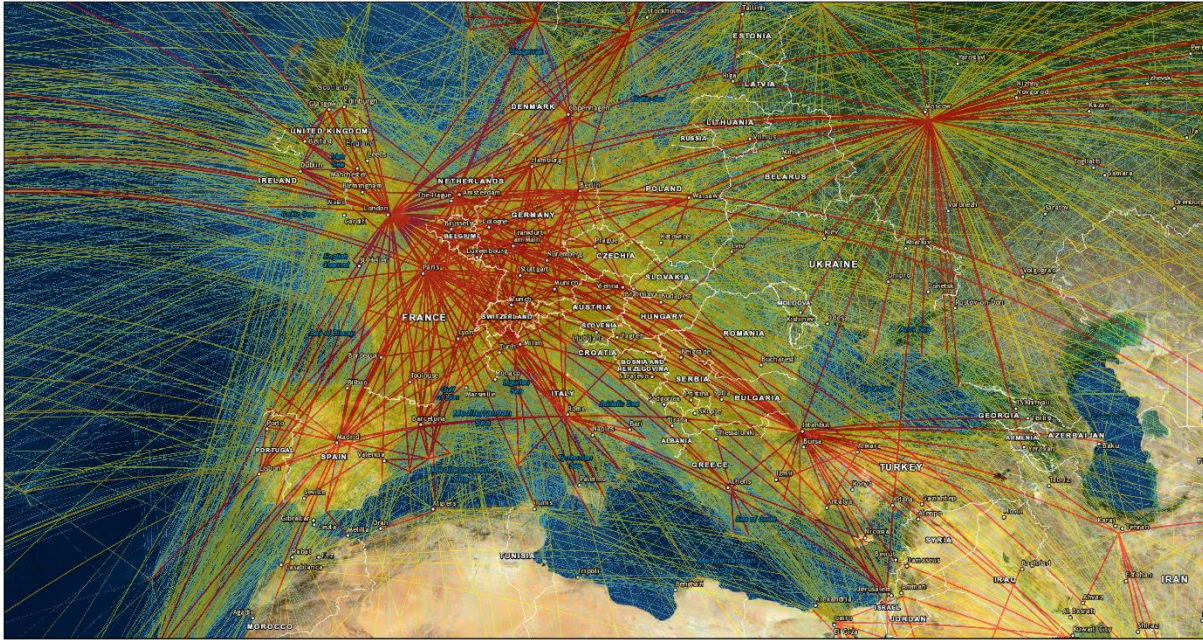
Ο εντοπισμός της καθαυτής τοποθεσίας των contrails, οδηγεί στην εξαγωγή πολλών χρήσιμων συμπερασμάτων. Κρίνεται όμως εξαιρετικά χρήσιμο να αντιπαρατεθεί και με δεδομένα που αποτυπώνουν την πυκνότητα πτήσεων, πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα πυκνότητας αεροπορικής κυκλοφορίας του International Civil Aviation Organization (ICAO), παρέχονται από τον Official Aviation Guide (OAG). Πρόκειται για δεδομένα ροής κυκλοφορίας στις αεροπορικές συνδέσεις μεταξύ πόλεων. Λόγω απουσίας δεδομένων για το έτος 2016, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του έτους 2015. Η κατασκευή των χαρτών πραγματοποιήθηκε μέσω διαδικτύου, αξιοποιώντας το λογισμικό ArcGIS του Gilbert Lasnier, ICAO (<https://gis.icao.int/gallery/>). Ο χάρτης αεροπορικής ροής κυκλοφορίας παρατίθεται στην Εικόνα 7.

Η εύρεση του συνολικού εμβαδού των contrails αποτελεί επίσης στόχο αυτής της εργασίας. Το μέγεθος των εντοπισμένων contrails καταγράφεται και αυτό σε αριθμό εικονοστοιχείων του πλέγματος. Τα εικονοστοιχεία αυτά, έχουν διαφορετικά μεγέθη, λόγω της καμπυλότητας της γης. Επομένως απαιτείται γνώση των διαστάσεων των εικονοστοιχείων σε διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Η πληροφορία αυτή δόθηκε σαν δεδομένο και πάλι από τον Luca Bugliaro, DLR.

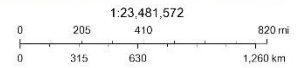
Τέλος, στην διαδικασία της ανάλυσης των δεδομένων κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η διαφορά μεταξύ ημέρας και νύχτας. Για την διάκριση των εντοπισμένων contrail σε ημέρα και νύχτα χρησιμοποιήθηκε η ζενίθεια γωνία του ήλιου, με μία

διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. Ο υπολογισμός της γωνίας αυτής έγινε αξιοποιώντας την εφαρμογή του National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

ArcGIS Web Map



Ροή Κυκλοφορίας



Esri, HERE, Garmin (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community, Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Web AppBuilder for ArcGIS
Earthstar Geographics | Esri, HERE, Garmin |

Εικόνα 7: Χάρτης ροής αεροπορικής κυκλοφορίας για το έτος 2015. ArcGIS, Gilbert Lasnier, ICAO. Με τα διαφορετικά χρώματα ορίζεται το πτητικό έργο, δηλαδή η συχνότητα με την οποία εκτελέστηκε κάθε αεροπορική σύνδεση.



3. Μεθοδολογία

Πρώτο βήμα για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, είναι ο εντοπισμός των contrails στις δορυφορικές εικόνες. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται βασίζεται στον CDA (Mannstein et al., 1999). Η περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων, μετά τον εντοπισμό των contrails, πραγματοποιήθηκε επίσης με την ανάπτυξη αντίστοιχων αλγορίθμων.

3.1. Αλγόριθμος εντοπισμού ιχνών αεροσκαφών

Ο εντοπισμός των contrails δια οφθαλμού, βασίζεται σε τρία βασικά χαρακτηριστικά τους, τη λαμπρότητα στις εικόνες του υπέρυθρου, τη γραμμική τους μορφή και την μορφολογία τους. Ο αλγόριθμος εντοπισμού contrails, αξιοποιεί και αυτός αυτά τα χαρακτηριστικά για να πετύχει το στόχο του. Έτσι η διαδικασία εντοπισμού των contrails μπορεί να διακριθεί σε τρία στάδια. Το πρώτο είναι ο έλεγχος της λαμπρότητας, έπειτα ο έλεγχος της γραμμικότητας και τέλος ο μορφολογικός έλεγχος.

Οι δυνατότητες του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, δεν περιορίζονται, όμως, μόνο στον εντοπισμό των contrails. Παρέχεται επιπλέον η δυνατότητα εντοπισμού της ακριβούς γεωγραφικής θέσης των contrails, της μορφολογίας τους (μήκος, μέσο πλάτος και γραμμικότητα) και υπολογισμού της κάλυψης της σκηνής από contrails.

3.1.1. Λειτουργία αλγορίθμου – Παράδειγμα

Ο αλγόριθμος εντοπισμού contrails, αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας, καθώς με βάση αυτόν κατασκευάζεται η βάση δεδομένων που αναλύεται έπειτα, προς εξαγωγή αποτελεσμάτων. Είναι, επομένως, σημαντική η κατανόηση της λειτουργίας του. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά, μέσω παραδείγματος, η διαδικασία που ακολουθείται από τον αλγόριθμο για τον εντοπισμό των contrails σε μία δορυφορική εικόνα, και την εξαγωγή των αρχικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα έχει επιλεγεί η 11/08/2016, 03:30 UTC, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εντοπισμού contrails μεγάλου μήκους και σε σχετικά ανέφελη περιοχή, για ευκολότερη οπτικοποίηση.

Αρχικά ο χρήστης του αλγορίθμου ορίζει κάποιες αρχικές συνθήκες. Αυτές αφορούν κυρίως το είδος και την ποσότητα των αποτελεσμάτων που θα παραχθούν.

Επίσης επιλέγεται αν θα χρησιμοποιηθεί ή όχι, το κανάλι των υδρατμών και αν θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες των contrails. Ο υπολογισμός των συντεταγμένων απαιτεί μεγάλο μέρος του υπολογιστικού χρόνου που χρειάζεται ο αλγόριθμος και για αυτό δίνεται η επιλογή απενεργοποίησης της διαδικασίας. Ο σχεδιασμός του αλγορίθμου επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει το χρονικό βήμα και τη συνολική διάρκεια υπολογισμού. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ημερομηνία έναρξης υπολογισμών η 1/1/2016, 00:00 και λήξης η 31/12/2016, 23:45, δηλαδή ολόκληρο το έτος 2016. Το χρονικό βήμα ορίστηκε στα 15 λεπτά ώστε να έρχεται σε ταύτιση με τα παρεχόμενα δορυφορικά δεδομένα.

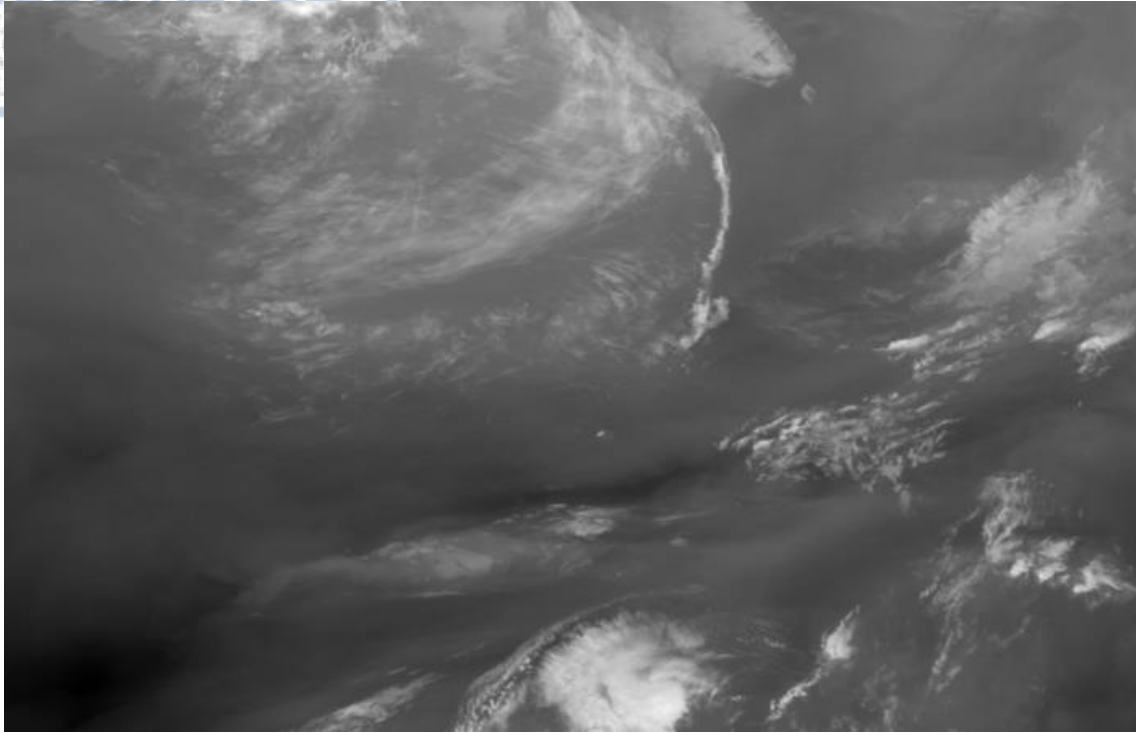
Μετά τον ορισμό των αρχικών συνθηκών και την επιλογή χρόνου, μπορεί να γίνει έναρξη των υπολογισμών. Πρώτα εντοπίζεται η επιλεγμένη ημερομηνία και επιλέγονται τα κατάλληλα δορυφορικά δεδομένα, εφόσον είναι διαθέσιμα και δεν έχουν φθορές. Σε περίπτωση που το έχει επιλέξει ο χρήστης, δημιουργούνται και τα αρχεία στα οποία θα γραφούν τα αποτελέσματα.

Ακολουθώντας την βασική μέθοδο εντοπισμού των contrails δια οφθαλμού, επιλέγονται σαν αρχικά δεδομένα εισόδου, οι εικόνες που καταγράφει το SEVIRI στα κανάλια του υπέρυθρου, Ch09 στα 10,8 μ m και Ch10 στα 12,0 μ m. Επιπλέον, σαν δεδομένο εισόδου, επιλέχθηκε και η εικόνα στο κανάλι των υδρατμών, Ch06 στα 7.3 μ m. Από το σύνολο λοιπόν των διαθέσιμων δορυφορικών δεδομένων χρησιμοποιούνται, ως δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου μόνο, τα τρία αυτά κανάλια. Με βάση αυτά τα κανάλια υπολογίζεται στην συνέχεια η διαφορά θερμοκρασίας TD = 10,8 μ m-12 μ m, στην οποία τα contrails εμφανίζουν τη μέγιστη λαμπρότητά τους (Εικόνα 8). Στην εικόνα της διαφοράς θερμοκρασίας εμφανίζονται πολύ λαμπρά και διάφορα στοιχεία του εδάφους, καθώς και όρια νεφικών σχηματισμών και άλλα στοιχεία, που θα μπορούσαν λανθασμένα να αναγνωριστούν στη συνέχεια ως contrails. Στο κανάλι Ch10 στα 10.8 μ m, αυτά τα σφάλματα είναι πιο περιορισμένα. Για αυτό το λόγο το κανάλι Ch10, συνεχίζει να χρησιμοποιείται αυτούσιο στους περαιτέρω υπολογισμούς. Αντίθετα, το κανάλι Ch09 στα 10,8 μ m αξιοποιείται μόνο για τον υπολογισμό της διαφοράς θερμοκρασίας TD και στη συνέχεια δεν χρησιμοποιείται. Επομένως τα αρχικά δεδομένα για τους υπολογισμούς είναι πλέον το κανάλι των υδρατμών Ch06, το κανάλι του υπέρυθρου Ch10 και η διαφορά θερμοκρασίας TD (10,8 μ m -12 μ m).

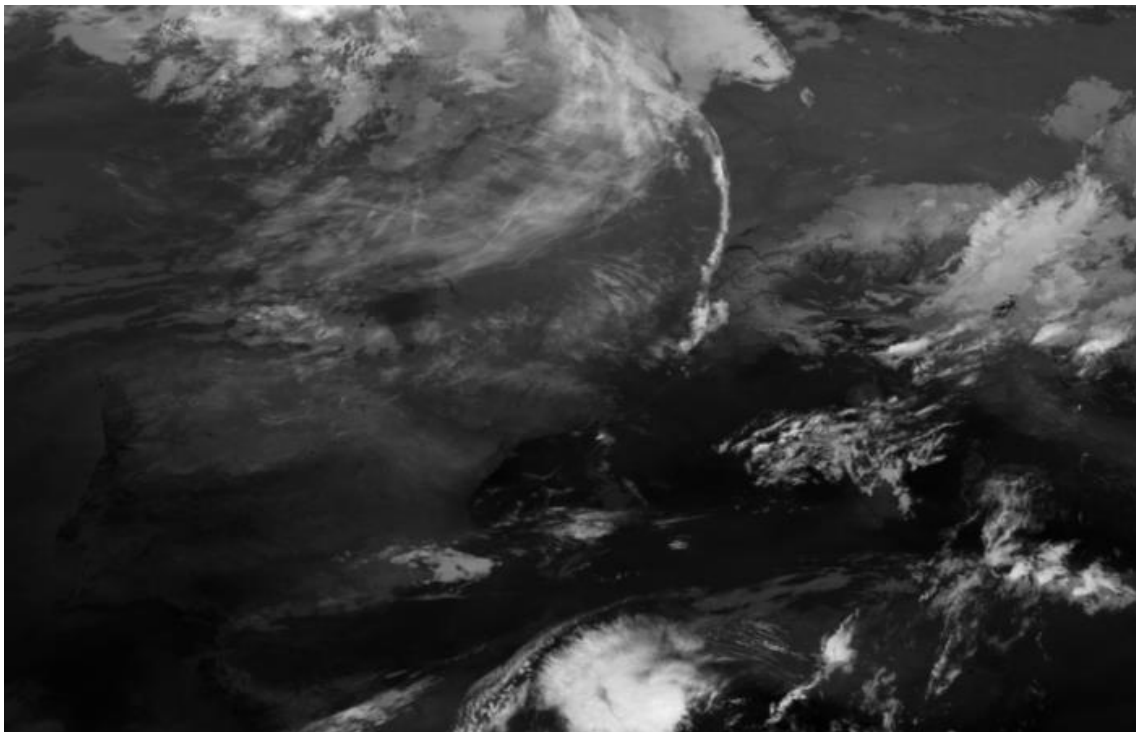
Τα αρχικά αυτά δεδομένα περιλαμβάνουν ολόκληρη την πλευρά του δίσκου της Γης που, μπορεί να αποτυπώσει ο δορυφόρος (Εικόνα 4). Μάλιστα λόγω του τρόπου με τον οποίο περιστρέφεται το SEVIRI, η εικόνα είναι ανεστραμμένη. Επομένως είναι απαραίτητο οι αρχικές εικόνες να περιστραφούν, καθώς και να περικοπούν στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στις αρχικές εικόνες των υδρατμών στα 7.3 μm και του υπέρυθρου στα 12,0 μm , τα νέφη και συνεπώς και τα contrails, εμφανίζονται με σκούρες αποχρώσεις του γκρι καθώς είναι ψυχρά. Προκειμένου όμως να μπορούν να συγκριθούν με την εικόνα TD (10,8 μm – 12 μm), πραγματοποιείται αναστροφή των τιμών, ώστε τα προηγούμενες σκούρα νέφη να εμφανίζονται τώρα φωτεινά. Προκύπτουν έτσι οι εικόνες Ch06i και Ch10i (Εικόνα 9, Εικόνα 10).



Εικόνα 8: Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας των καναλιών Ch09 στα 10,8 μm και Ch10 στα 12,0 μm TD = 10,8 μm -12 μm . 11/08/2016, 03:30 UTC.

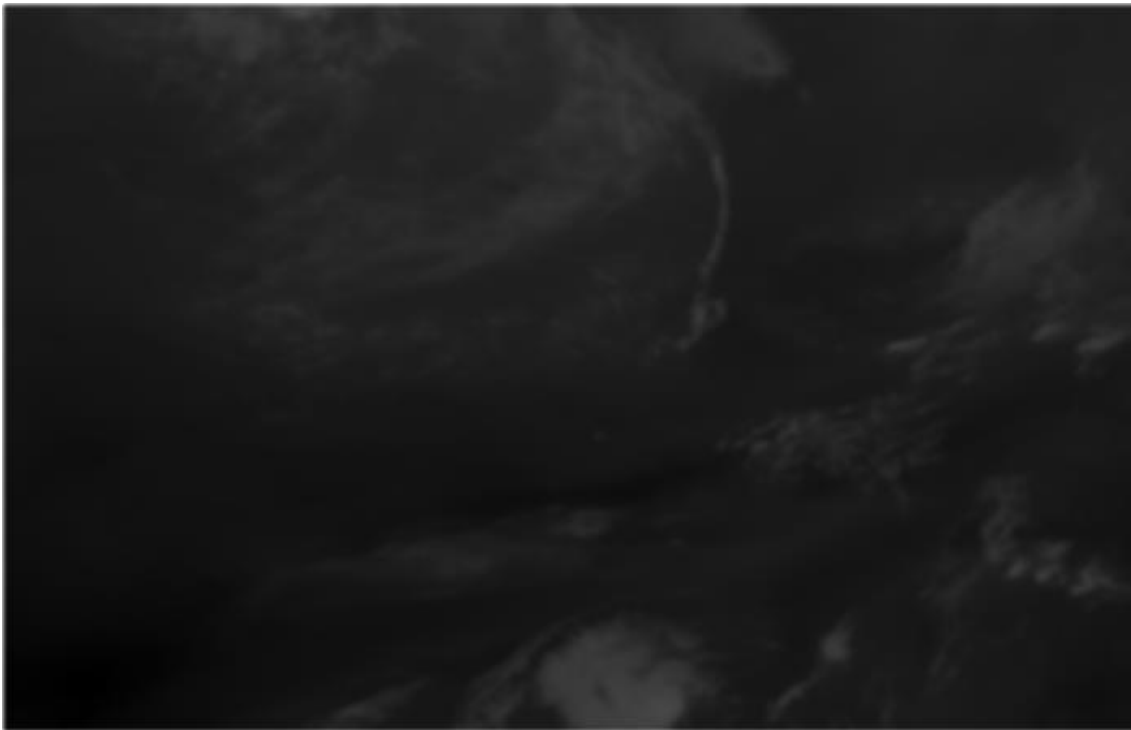


Εικόνα 9: Ανεστραμμένο κανάλι υδρατμών CH_{06} inverted, στα 7.3μm. 11/08/2016, 03:30 UTC

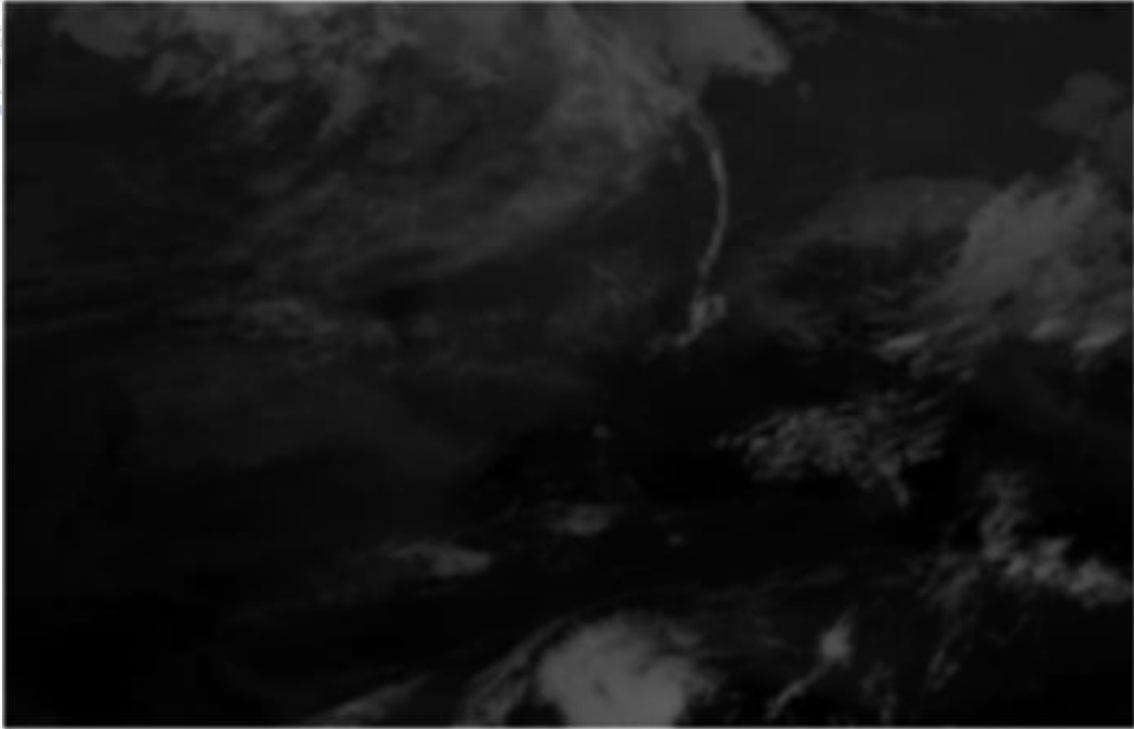


Εικόνα 10: Ανεστραμμένο κανάλι υπεριώθρου CH_{10} inverted, στα 12.0μm. 11/08/2016, 03:30 UTC

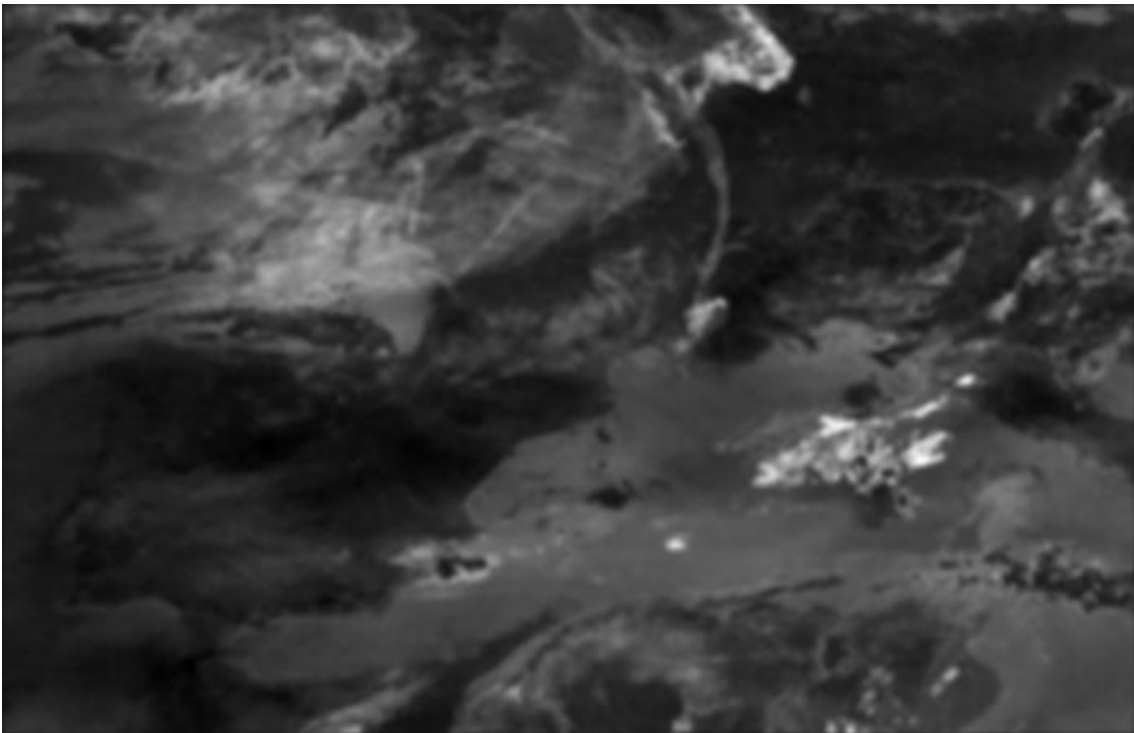
Τόσο κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, όσο και εποχιακά, η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους και της θάλασσας, οδηγεί σε μεταβολές στην αντίθεση των δορυφορικών εικόνων. Προκειμένου να μπορούν να έχουν οι δορυφορικές εικόνες παρόμοια αντίθεση και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια κατώφλια για κάθε ώρα και εποχή, γίνεται κανονικοποίηση των αρχικών εικόνων. Αρχικά γίνεται μια διαδικασία εξομάλυνσης των εικόνων μέσω συνέλιξης τους με συμμετρικό, χαμηλοπερατό πυρήνα Gauss μεγέθους 8x8 εικονοστοιχεία. Από την συνέλιξη της εικόνας της διαφοράς θερμοκρασίας TD (10,8 μ m -12 μ m) με τον πυρήνα Gauss παράγεται η εικόνα \overline{TD} και από τη συνέλιξη της ανεστραμμένης εικόνας του καναλιού των υδρατμών Ch06i και της ανεστραμμένης εικόνας του υπέρυθρου Ch10i παράγονται οι $\overline{Ch06i}$ και $\overline{Ch10i}$, αντίστοιχα. (Εικόνα 11, Εικόνα 12, Εικόνα 13).



Εικόνα 11: $\overline{Ch06i}$ έπειτα από εξομάλυνση μέσω συνέλιξης με συμμετρικό, χαμηλοπερατό πυρήνα Gauss. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 12: $\overline{Ch10i}$ έπειτα από εξομάλυνση μέσω συνέλιξης με συμμετρικό, χαμηλοπερατό πυρήνα Gauss.
11/08/2016, 03:30 UTC.

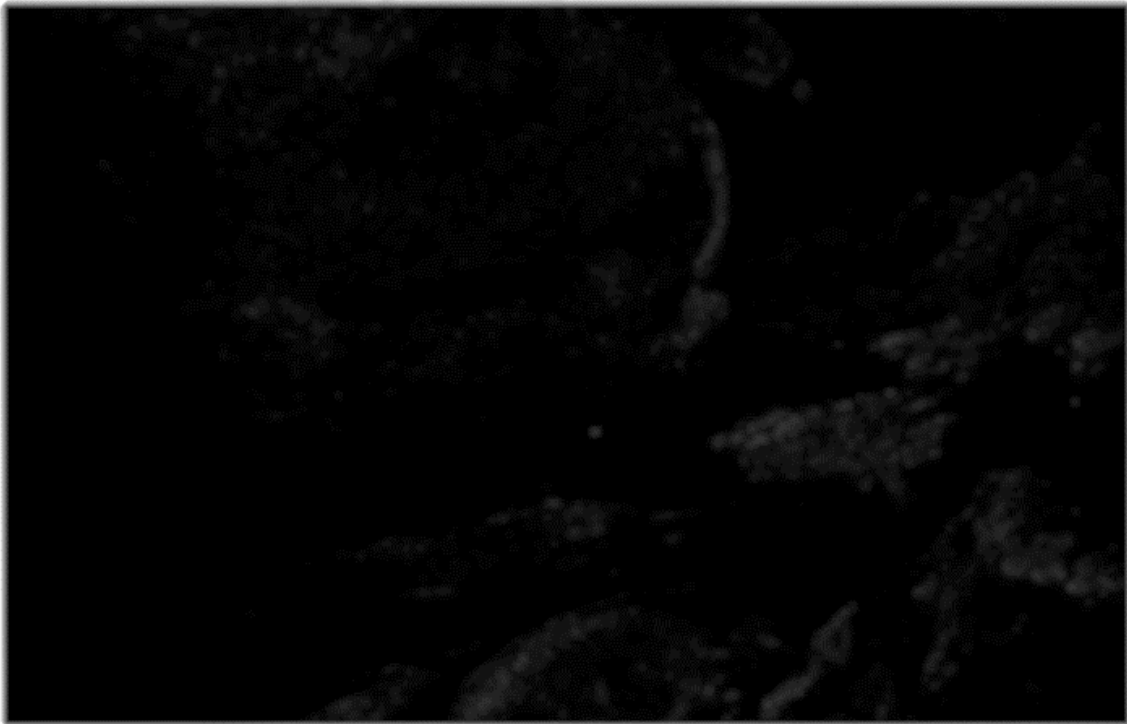


Εικόνα 13: $\overline{T\overline{D}}$ έπειτα από εξομάλυνση μέσω συνέλιξης με συμμετρικό, χαμηλοπερατό πυρήνα Gauss.
11/08/2016, 03:30 UTC.

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση των αρχικών εικόνων από τις φιλτραρισμένες και φιλτράρεται και η ίδια,

$$\overline{SDTD} = \overline{(TD - \overline{TD})^2}$$

και αντίστοιχα για Ch06 και Ch10 (Εικόνα 14, Εικόνα 15, Εικόνα 16).



Εικόνα 14: $\overline{SDCh06}$ τυπική απόκλιση αρχικής εικόνας από φιλτραρισμένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.

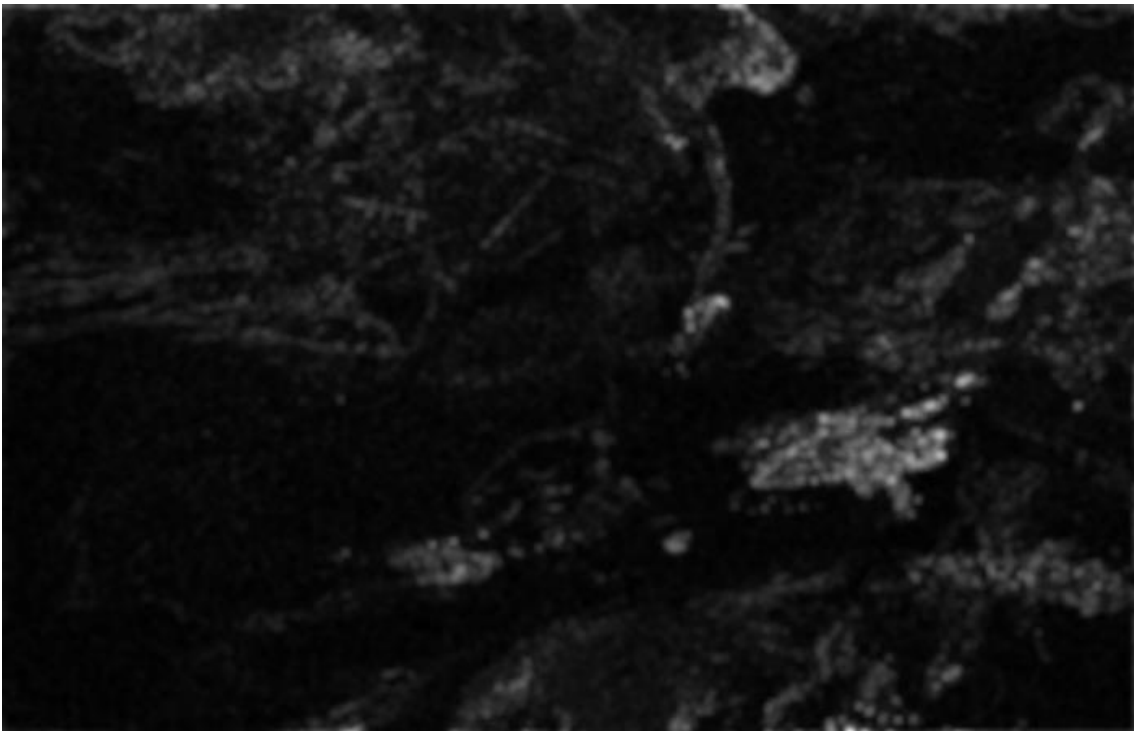
Έχοντας και την τυπική απόκλιση υπολογίζονται τέλος οι κανονικοποιημένες εικόνες. Όπως προκύπτει και από τις εικόνες, σε πολλά σημεία η τυπική απόκλιση είναι μηδενική. Προκειμένου κατά την κανονικοποίηση να μην υπάρχει περίπτωση διαίρεσης με το μηδέν, προστίθεται στον παρονομαστή ποσότητα 0,1K,

$$NTD = \frac{(TD - \overline{TD})}{(\overline{SDTD} + 0.1)}$$

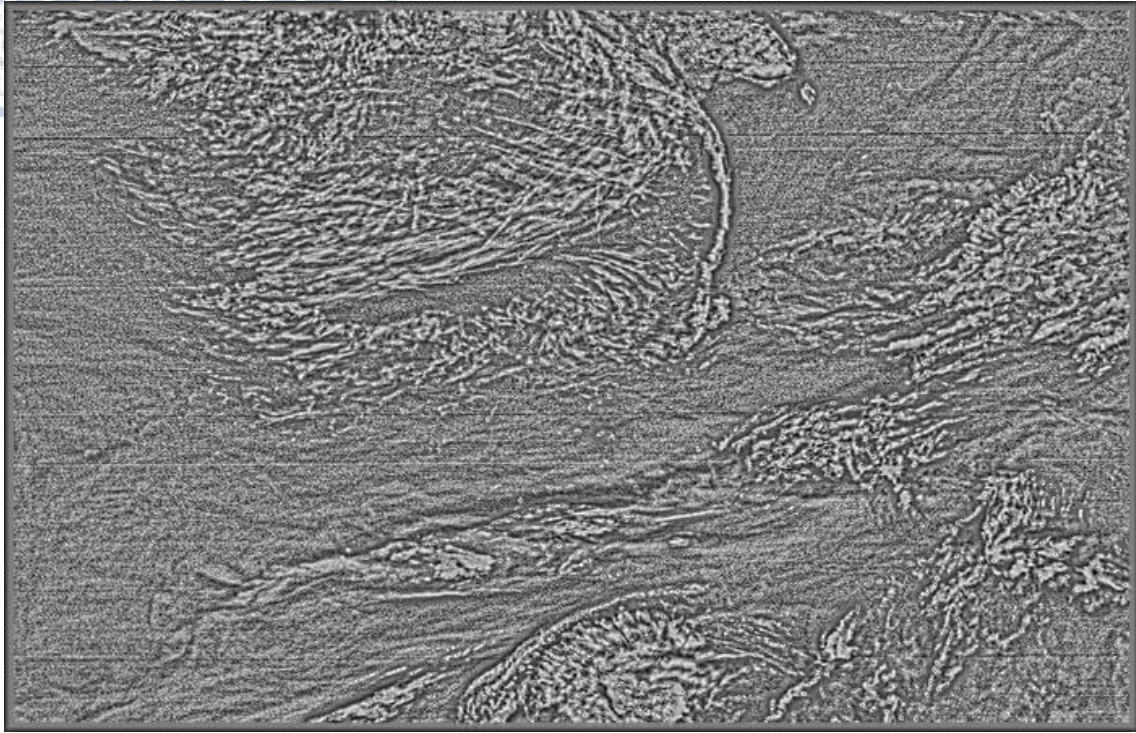
Όμοια και για τα κανάλια Ch06 και Ch10 (Εικόνα 17, Εικόνα 18, Εικόνα 19). Για την αποφυγή παράτυπων σημείων επιλέγονται τα όρια της κανονικοποίησης να είναι από -2 έως 2.



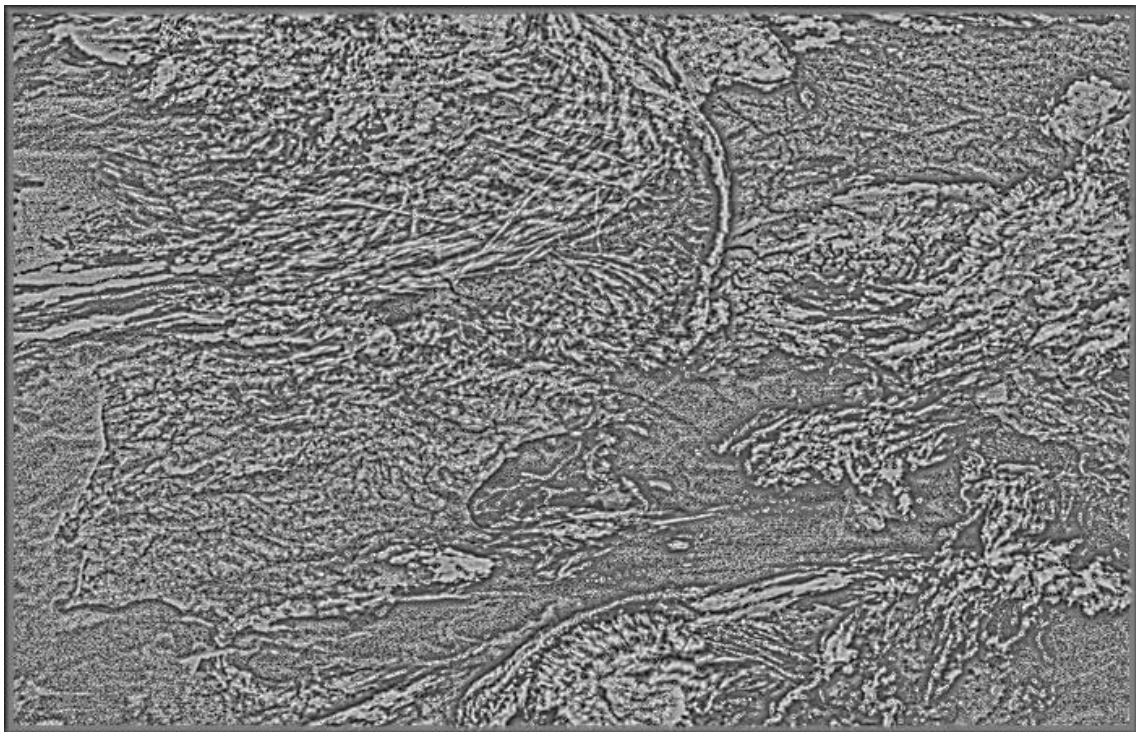
Εικόνα 15: $\overline{SDCh10i}$ τυπική απόκλιση αρχικής εικόνες από φιλτραρισμένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.



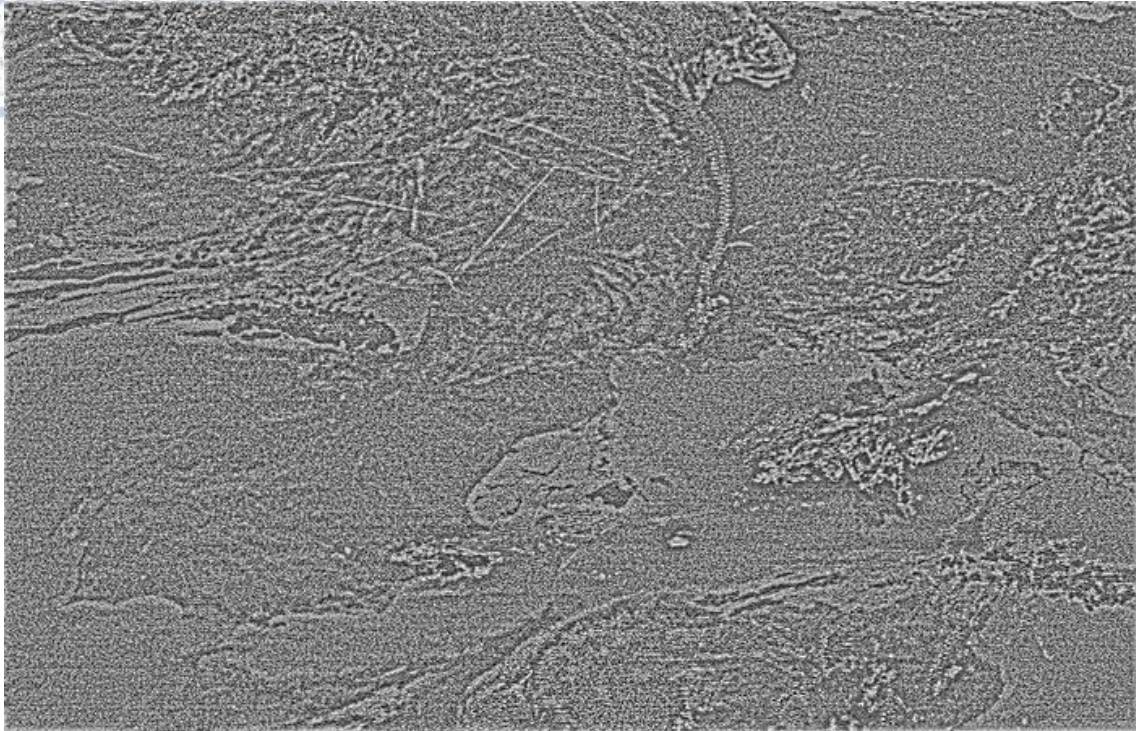
Εικόνα 16: \overline{SDTD} τυπική απόκλιση αρχικής εικόνες από φιλτραρισμένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 17: N06 κανονικοποιημένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 18: N10 κανονικοποιημένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 19: NTD κανονικοποιημένη. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Η διαδικασία της κανονικοποίησης έχει την αρνητική συνέπεια να τονίζει και να παρουσιάζει ως γραμμές, στοιχεία που δεν είναι contrails. Τέτοια είναι για παράδειγμα, οι ακτογραμμές και τα όρια μεγάλων νεφικών σχηματισμών, όπως νεφικών οδών. Για την απαλοιφή αυτού του προβλήματος αθροίζονται οι δύο κανονικοποιημένες εικόνες της διαφοράς θερμοκρασίας και της εικόνας του υπέρυθρου, ενώ η κανονικοποιημένη εικόνα των υδρατμών χρησιμοποιείται ανεξάρτητα.

$$N = N10 + NTD$$

Ως ένα επιπλέον εργαλείο για τον εντοπισμό των contrails, υπολογίζεται για τις αρχικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών 7,3μm και του υπέρυθρου 12,0μm, η μέγιστη κλίση της θερμοκρασίας, σε περιοχή 2x2 εικονοστοιχεία. Ο υπολογισμός γίνεται και πάλι με συνέλιξη των εικόνων με πυρήνα Gauss (Εικόνα 20, Εικόνα 21).

Σε αυτό το σημείο, τα αρχικά δεδομένα, που ήταν οι εικόνες στο κανάλι των υδρατμών Ch06, 7,3μm, στο κανάλι του υπέρυθρου Ch10, 12,0μm, και η διαφορά θερμοκρασίας TD (10,8μm – 12μm) έχουν υποστεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας. Έχουν έρθει σε κατάλληλη μορφή και έχουν παραχθεί χρήσιμες παράγωγες εικόνες, ώστε να



κατασκευαστεί η πρώτη μάσκα. Όπως έχει αναφερθεί, το πρώτο στάδιο στο εντοπισμό των contrails βασίζεται στην λαμπρότητά τους. Έτσι η μάσκα αυτή θα χρησιμοποιηθεί για να φιλτράρει τις εικόνες με βάση τη λαμπρότητα των εικονοστοιχείων τους. Πρόκειται για δυαδική μάσκα, που αξιοποιεί την αρχική εικόνα της διαφοράς θερμοκρασίας TD, την κανονικοποιημένη εικόνα N, την κανονικοποιημένη εικόνα του καναλιού των υδρατμών NO6, καθώς και τις δυο εικόνες μέγιστης κλίσης της θερμοκρασίας, G06 και G10. Τα κριτήρια της μάσκας συνοψίζονται ως εξής:

$$\text{Διαφορά θερμοκρασίας } TD > 1,75 K$$

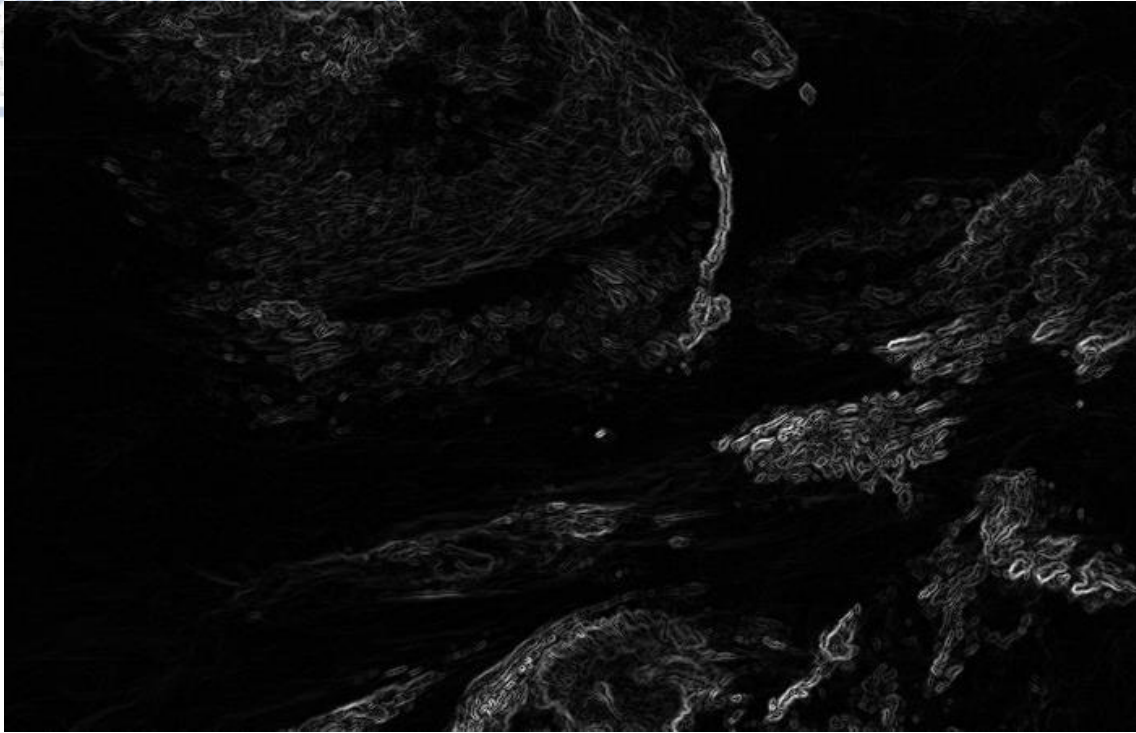
$$\text{Κανονικοποιημένη εικόνα } N > 2,5 K$$

$$\text{Κανονικοποιημένη εικόνα υδρατμών } N > 0,35 K$$

$$\text{Μέγιστη κλίση θερμοκρασίας } < (2 * \text{τυπική απόκλιση}) + 1 K$$

Το όρια επιλέχθηκαν για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του αλγορίθμου, μετά από τη διαδικασία της αξιολόγησης. Η σημασία των ορίων για τη διαφορά θερμοκρασίας TD, την κανονικοποιημένη εικόνα N και την κανονικοποιημένη εικόνα των υδρατμών NO6, είναι να επιλέγονται εικονοστοιχεία που είναι πιο λαμπρά από τα γειτονικά τους. Το τελευταίο κριτήριο ορίζεται για να περιορίσει τον λανθασμένο εντοπισμό ακτογραμμών και άλλων στοιχείων που δεν είναι contrails αλλά φαίνονται λαμπρά στις εικόνες του υπέρυθρου.

Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μάσκα λαμπρότητας, εξετάζει αν κάθε εικονοστοιχείο πληροί τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί, και δίνει την τιμή 1 αν αυτό το εικονοστοιχείο έχει τα χαρακτηριστικά λαμπρότητας ενός contrail, και την τιμή 0 στην αντίθετη περίπτωση. Για την συγκεκριμένη σκηνή η μάσκα που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 20: $\overline{G06}$ εικόνα μέγιστης κλίσης θερμοκρασίας έπειτα από εξομάλνιση. 11/08/2016, 03:30 UTC.



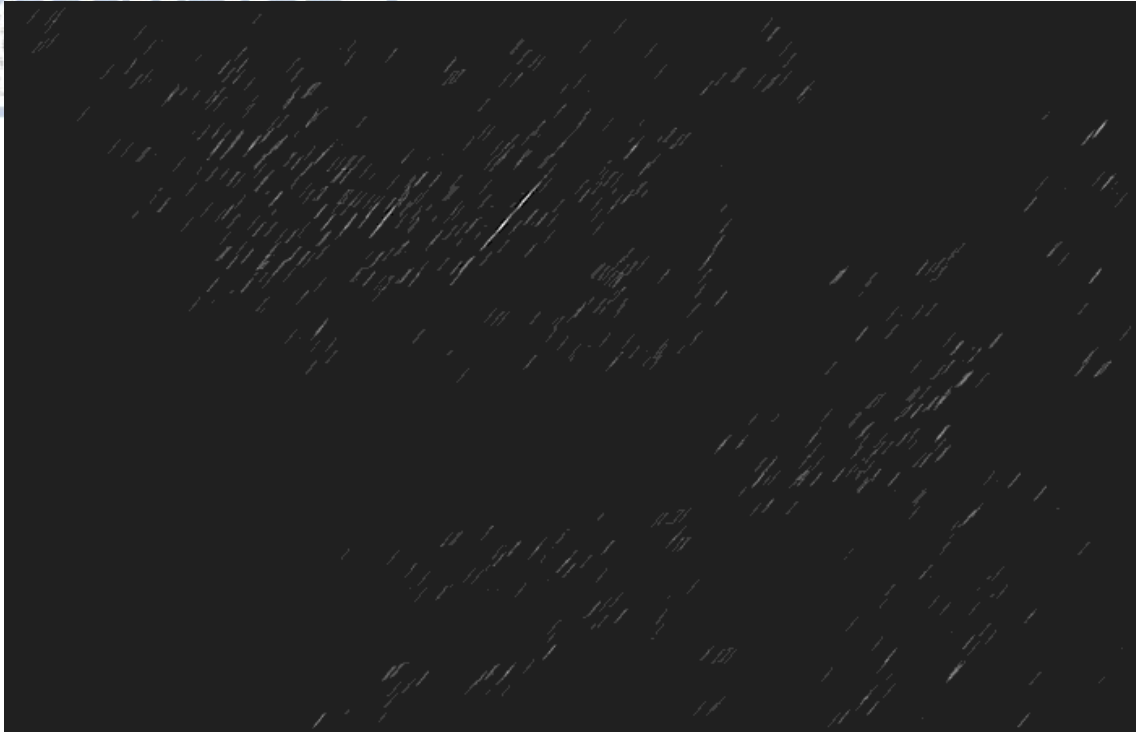
Εικόνα 21: $\overline{G10}$ εικόνα μέγιστης κλίσης θερμοκρασίας έπειτα από εξομάλνιση. 11/08/2016, 03:30 UTC.



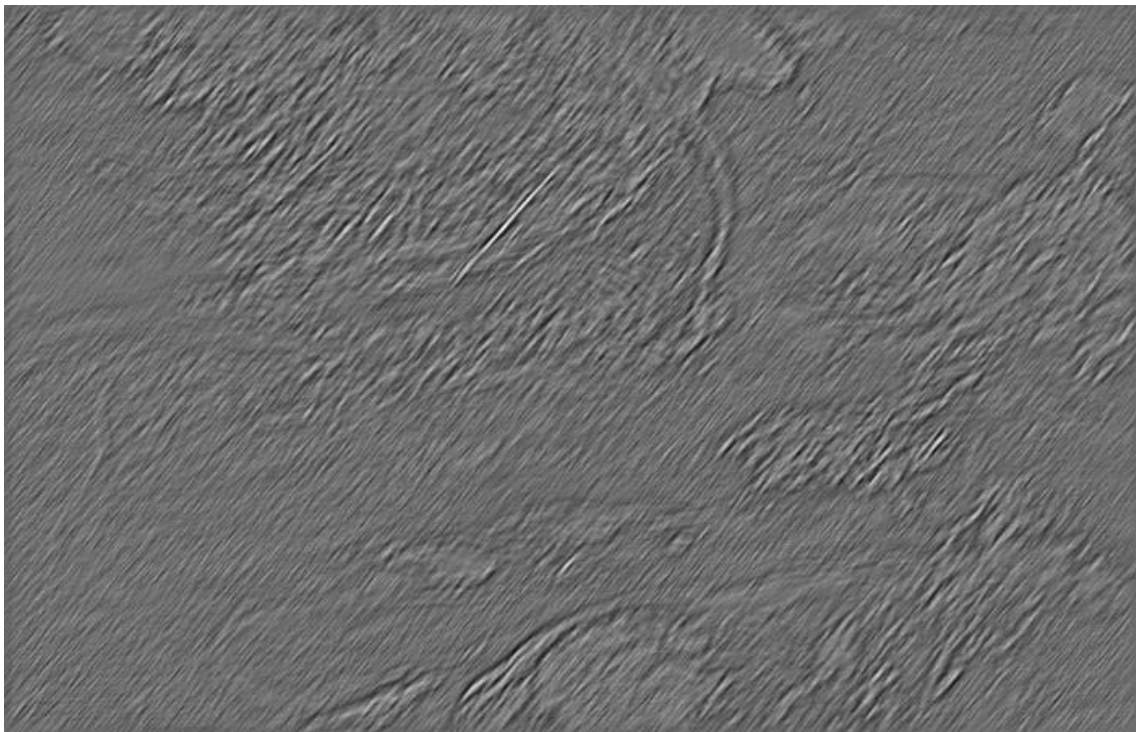
Εικόνα 22: Μάσκα λαμπρότητας. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο εντοπισμού, το στάδιο της λαμπρότητας. Αυτό σημαίνει ότι έχει κατασκευαστεί η μάσκα που περιλαμβάνει τα εικονοστοιχεία που πληρούν τα κριτήρια λαμπρότητας, και πλέον μπορεί να ξεκινήσει το στάδιο της γραμμικότητας. Σε αυτό ελέγχεται, κατά πόσο τα εικονοστοιχεία που σημειώθηκαν από τη μάσκα λαμπρότητας, μπορούν να σχηματίσουν γραμμικά στοιχεία.

Για το σκοπό αυτό κατασκευάζονται γραμμικά φίλτρα μεγέθους 13x13 εικονοστοιχεία σε 32 διαφορετικές διευθύνσεις, από 0° έως 180° με βήμα 5,625°. Κάθε ένα από αυτά τα φίλτρα εφαρμόζεται στο κανονικοποιημένο αρχείο N και στη μάσκα λαμπρότητας. Κατά την εφαρμογή του φίλτρου, εξετάζεται αν τα στοιχεία των εικόνων μπορούν να προσεγγιστούν με την γραμμή του εκάστοτε φίλτρου. Για παράδειγμα στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 23, Εικόνα 24) φαίνεται το αποτέλεσμα της συνέλιξης αυτών των εικόνων με το γραμμικό φίλτρο γωνίας 39.375°. Σε αυτή τη γωνία εντοπίζεται ένα από τα δύο contrails της σκηνης. Το αποτέλεσμα είναι να σημειώνονται όλα τα στοιχεία που προσεγγίζουν την γραμμικότητα του φίλτρου στην εν λόγω γωνία.



Εικόνα 23: Έλεγχος γραμμικότητας στις 39,375° στη μάσκα λαμπρότητας. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 24: Έλεγχος γραμμικότητας στις 39,375° στην κανονικοποιημένη Ν. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Το επόμενο βήμα αποτελεί στην ουσία συνδυασμό των δύο σταδίων, λαμπρότητας και γραμμικότητας. Μέχρι αυτό το σημείο όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με βάση μεμονωμένα εικονοστοιχεία. Τα contrails όμως είναι διδιάστατα αντικείμενα με μήκος και πλάτος. Επομένως θα πρέπει τα εικονοστοιχεία που έχουν σημειωθεί, να ενωθούν σε μεγαλύτερα αντικείμενα. Προκειμένου να γίνει αυτή η ένωση, εφαρμόζεται ο κανόνας της συνδεσιμότητας των οχτώ. Με βάση αυτό το κριτήριο, αν έχει περάσει τα κριτήρια ένα από τα οχτώ γειτονικά εικονοστοιχεία, ενός εικονοστοιχείου που έχει περάσει επίσης τα κριτήρια, αυτά τα εικονοστοιχεία ενώνονται και σχηματίζουν πλέον ένα αντικείμενο που θεωρείται δυνητικό contrail (Εικόνα 25). Ο κανόνας των 8 εφαρμόζεται ξεχωριστά σε κάθε μία από τις διευθύνσεις του γραμμικού φίλτρου.

Η εικόνα που προκύπτει για κάθε διεύθυνση, φιλτράρεται και πάλι με τη μάσκα λαμπρότητας, ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν προστέθηκαν σφάλματα (Εικόνα 26). Καθώς όμως η μάσκα αφορά μεμονωμένα εικονοστοιχεία, είναι πιθανό κάποια από τα αντικείμενα που σχηματίστηκαν από την συνδεσιμότητα των 8, να έχουν τεμαχιστεί και πάλι. Προκειμένου να συνδεθούν τα τμήματα αυτών των αντικειμένων, κατασκευάζεται πυρήνας Gauss διαστάσεων 3×3 εικονοστοιχεία και πραγματοποιείται συνέλιξη αυτού με τις εικόνες σε κάθε διεύθυνση.

Μετά από την ολοκλήρωση αυτού του ελέγχου, προκύπτει για κάθε διεύθυνση μια εικόνα που περιλαμβάνει μόνο αντικείμενα που μπορούν να θεωρηθούν contrails, και όχι μεμονωμένα εικονοστοιχεία (Εικόνα 27). Μετά από κάθε βήμα της διαδικασίας, καταγράφεται αυτόματα ο αριθμός των αντικειμένων, που είναι δυνητικά contrail, ώστε να μπορεί στο τέλος να εντοπιστεί το σημείο της επεξεργασίας που εισάγει λάθη και να παρουσιάζεται πιο κατανοητά η ακολουθία των υπολογισμών.



Εικόνα 25: Σχηματισμένα αντικείμενα μετά τη σύνδεση των 8 γειτόνων στις 39,375°. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 26: Εφαρμογή μάσκας λαμπρότητας στα αντικείμενα που σχηματίστηκαν από τη σύνδεση των 8 γειτόνων στις 39,375°. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 27: Αντικείμενα μετά την επανασύνδεση στις 39,375°. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Μετά τον έλεγχο λαμπρότητας των εικονοστοιχείων, τον έλεγχο της γραμμικότητας και τον σχηματισμό αντικειμένων, το τελευταίο στάδιο για την πλήρη αναγνώριση ενός contrail είναι ο έλεγχος της μορφολογίας του. Για κάθε αντικείμενο που έχει εντοπιστεί και σε κάθε μία από τις 32 διευθύνσεις, υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων που το αποτελούν, το μήκος του σε εικονοστοιχεία και ο συντελεστής γραμμικότητας r . Το μήκος του εκάστοτε contrail ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των πιο απομακρυσμένων εικονοστοιχείων του και ο συντελεστής γραμμικότητας υπολογίζεται από τη σχέση του Pearson:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

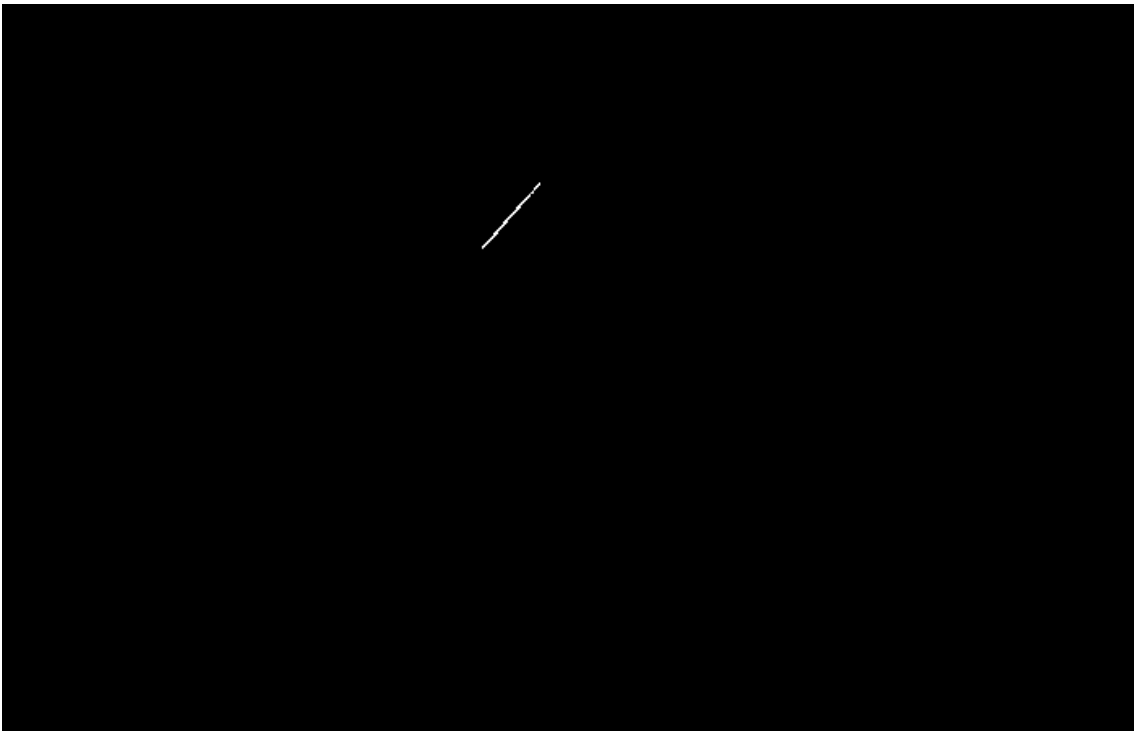
Μετά τον υπολογισμό αυτών των μορφολογικών χαρακτηριστικών του κάθε αντικειμένου εφαρμόζονται τα εξής κριτήρια:

Συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων αντικειμένου >30 και <90

Μήκος στοιχείου > 50 εικονοστοιχεία

Συντελεστής γραμμικότητας $r > 0,975$

Με τα πρώτα δύο κριτήρια απορρίπτονται μικρά γραμμικά στοιχεία, καθώς μπορεί να πρόκειται για νεφικούς σχηματισμούς ή άλλα αντικείμενα που δεν είναι contrails. Η τελευταία συνθήκη ελέγχει κατά πόσο τα εικονοστοιχεία που αποτελούν το αντικείμενο, μπορεί να θεωρηθούν ότι σχηματίζουν ευθεία γραμμή. Αυτό το κριτήριο θέτει έναν ακόμη περιορισμό στο σχήμα του αντικειμένου, πέραν του γραμμικού ελέγχου που έχει ήδη πραγματοποιηθεί. Μετά τον μορφολογικό έλεγχο, προκύπτει για κάθε διεύθυνση μια εικόνα που περιλαμβάνει αντικείμενα που θεωρούνται ότι είναι contrails (Εικόνα 28).



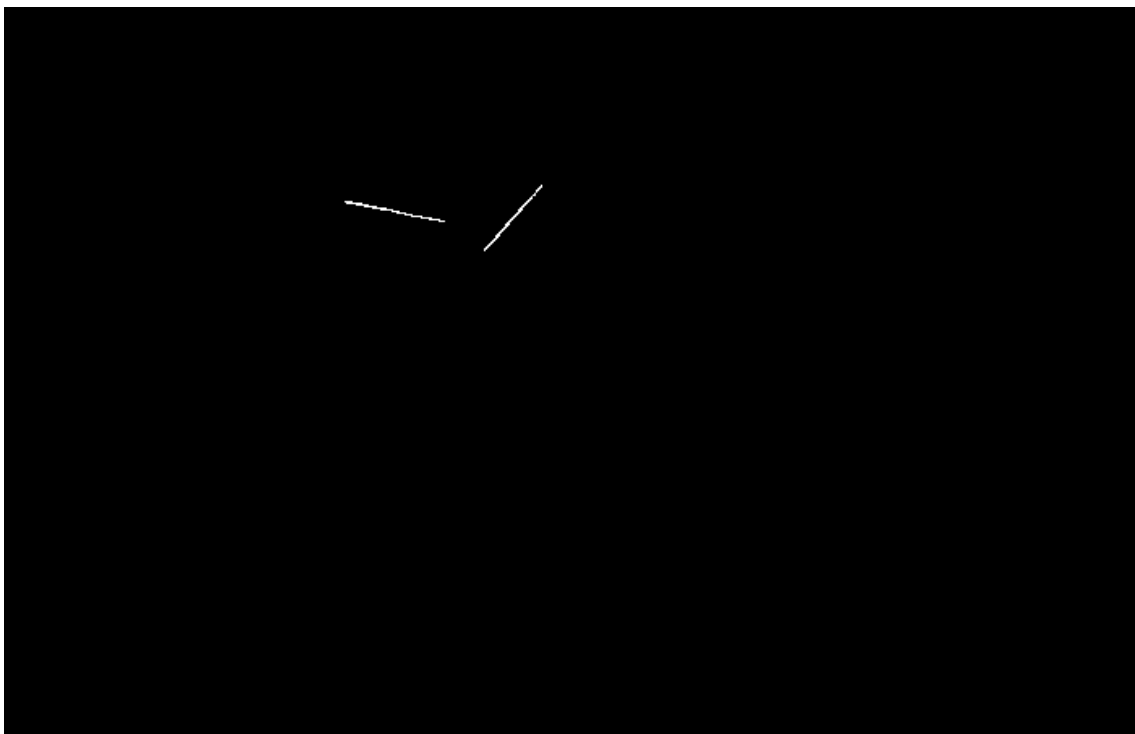
Εικόνα 28: Αντικείμενα μετά το μορφολογικό έλεγχο στις 39,375°. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των σταδίων ελέγχου για όλες τις διευθύνσεις ξεχωριστά, κατασκευάζεται η τελική εικόνα που περιέχει συνολικά τα αντικείμενα που έχουν εντοπιστεί, για την εκάστοτε σκηνή, σε κάθε διεύθυνση (Εικόνα 29). Για τον ευκολότερο εντοπισμό των contrails και τη διευκόλυνση της διαδικασίας αξιολόγησης, κατασκευάζεται επίσης εικόνα που αποτελεί υπέρθεση όλων των εντοπισμένων contrail πάνω στην αρχική εικόνα διαφοράς θερμοκρασίας TD (Εικόνα 30).

Στο σημείο αυτό ο εντοπισμός των contrails έχει ολοκληρωθεί. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν και να καταγραφούν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους, που θα φανούν χρήσιμα στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και την ανάλυσή τους. Επιπροσθέτως

κατασκευάζονται και τυχόν εικόνες rgb που έχει επιλέξει ο χρήστης και θα βοηθήσουν εν συνεχεία στην αξιολόγηση του αλγορίθμου.

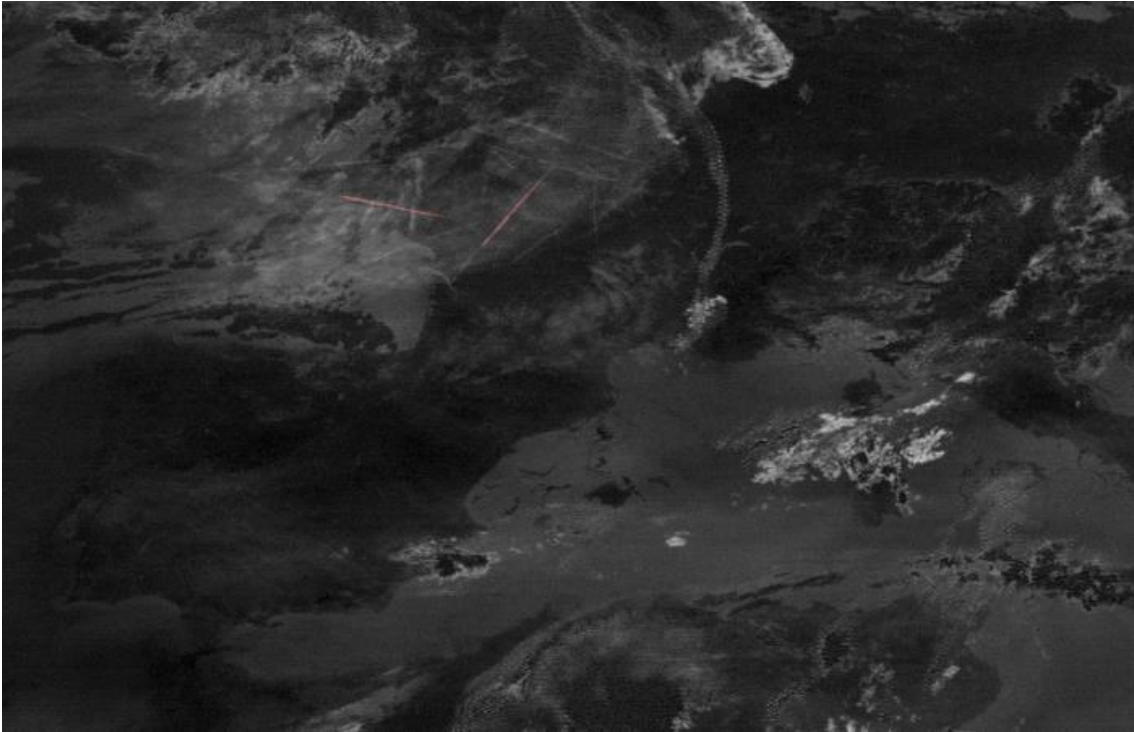
Για κάθε διεύθυνση υπολογίζεται και καταγράφεται σε αρχεία, ο συνολικός αριθμός των contrails που έχουν εντοπιστεί. Για κάθε contrail, έπειτα, υπολογίζονται, τα μορφολογικά του χαρακτηριστικά. Αριθμός εικονοστοιχείων που το αποτελούν, μήκος, μέσο πλάτος και συντελεστής γραμμικότητας. Τέλος σημειώνεται για κάθε χρονική στιγμή ο συνολικός αριθμός των contrails που εντοπίστηκαν καθώς και το ποσοστό κάλυψης της σκηνής από contrails.



Εικόνα 29: Αντικείμενα που έχουν εντοπιστεί σε όλες τις διευθύνσεις. 11/08/2016, 03:30 UTC.

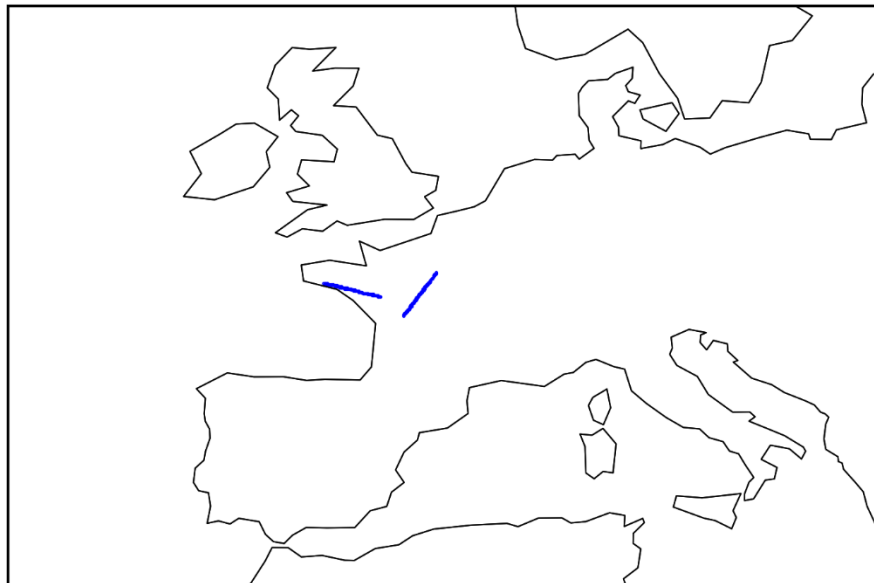
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, μία επιπλέον από τις δυνατότητες του κώδικα, είναι ότι μπορεί να υπολογίζει τις ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε εικονοστοιχείου που ανήκει σε αντικείμενο που έχει αναγνωριστεί ως contrail. Κατ' επέκταση αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπολογίσει την ακριβή θέση του κάθε contrail. Πρώτο βήμα προς αυτή τη κατεύθυνση, είναι να βρεθούν οι συντεταγμένες των ίδιων των εικονοστοιχείων, όπως αυτά αποτυπώνονται στη δορυφορική εικόνα. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το πλέγμα πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν τα εικονοστοιχεία των contrails. Στη συνέχεια για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζονται οι γεωγραφικές

συντεταγμένες και αποτυπώνονται πάνω στο χάρτη (Εικόνα 31). Τέλος οι γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε εικονοστοιχείου που ανήκει σε contrail καταγράφονται και σε αρχείο. Συνοπτικά η λειτουργία του αλγορίθμου παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.

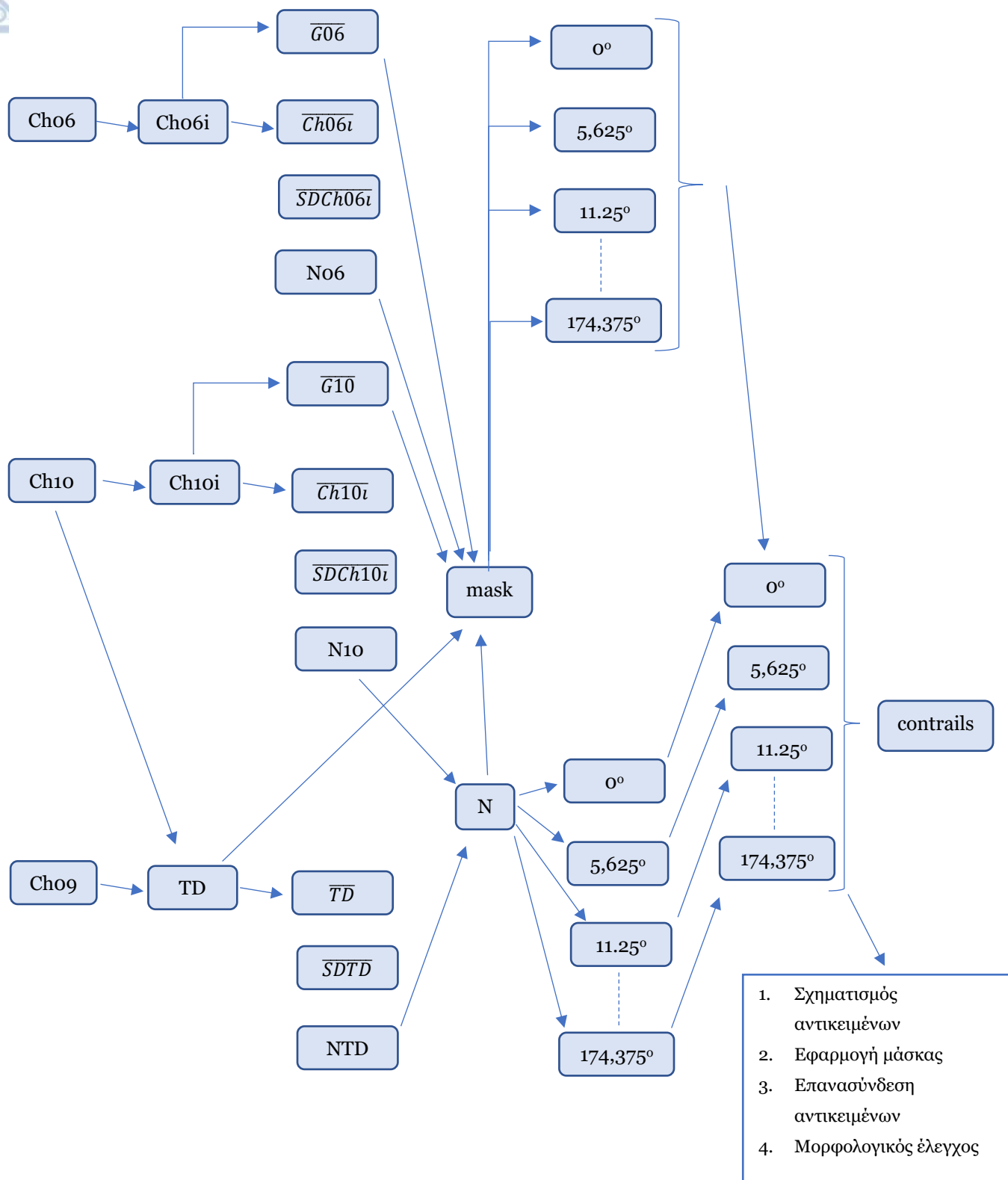


Εικόνα 30: Υπέρθυση εντοπισμένων αντικειμένων πάνω στην εικόνα TD. 11/08/2016, 03:30 UTC.

Contrails on: 2016/8/11 3:30



Εικόνα 31: Αποτύπωση θέσεως contrails στο χάρτη. 11/08/2016, 03:30 UTC.



Εικόνα 32: Λογικό διάγραμμα λειτουργίας αλγορίθμου

3.1.2. Αξιολόγηση αλγορίθμου

Η αξιολόγηση του αλγορίθμου εντοπισμού contrails, βασίστηκε σε ένα σετ από 51 σκηνές που επιλέχθηκαν τυχαία. Οι σκηνές αυτές αναλύθηκαν από τον αλγόριθμο εντοπισμού contrails και στη συνέχεια τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις σκηνές, εξετάστηκαν προσεκτικά δια οφθαλμού. Κατά την δια οφθαλμού εξέταση αξιοποιήθηκαν, εκτός από τις εικόνες που παρατίθενται στο παράδειγμα παραπάνω, και εικόνες rgb. Η δια οφθαλμού ανάλυση των σκηνών είναι μεν αρκετά υποκειμενική, όμως ο ανθρώπινος παρατηρητής μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα στις διαφορές της αντίθεσης κι έτσι να εντοπίσει contrails σε όλες τις συνθήκες και εποχές. Επιπλέον η καλύτερη γνώση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, που προκύπτει από την εξέταση των εικόνων rgb, βοηθάει στον διαχωρισμό φυσικών cirrus από contrails. Τέλος χρήσιμη είναι και η γνώση του ανάγλυφου και της γεωγραφίας, ώστε να μπορούν να σημειωθούν στοιχεία στην επιφάνεια της Γης που δυνητικά καταγράφονται ως contrails, αλλά δεν είναι.

Για την ποσοτικοποίηση της αξιολόγησης ακολουθήθηκαν οι οδηγίες και οι ποσότητες από το «Glossary of Forecast Verification Metrics», του NOAA. Έτσι, για κάθε μία σκηνή που ελέγχθηκε, κατασκευάστηκε ο πίνακας ενδεχομένων (Πίνακας III).

Πίνακας III: Πίνακας ενδεχομένων για την αξιολόγηση του αλγορίθμου εντοπισμού contrails

2x2 Πίνακας ενδεχομένων		Εντοπισμός contrail δια οφθαλμού	
		Ναι	Όχι
Εντοπισμός contrail από αλγόριθμο	Ναι	a (επιτυχία/ορθά θετικά)	b (άκυρος συναγερμός/εσφαλμένα θετικά)
	Όχι	c (παράλειψη/εσφαλμένα αρνητικά)	d (ορθά αρνητικά)

Οι επιτυχίες, ή ορθά θετικά, είναι contrails τα οποία εντοπίστηκαν τόσο από τον αλγόριθμο, όσο και από την δια οφθαλμού εξέταση των εικόνων. Πρόκειται επομένως για πραγματικά contrail που ορθά εντόπισε ο αλγόριθμος. Οι άκυροι συναγερμοί ή εσφαλμένα θετικά, είναι περιπτώσεις που contrails εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο, αλλά δεν επιβεβαιώθηκαν από την δια οφθαλμού εξέταση. Συνεπώς πρόκειται για

αντικείμενα που θεωρήθηκαν από τον αλγόριθμο contrails, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι. Οι παραλείψεις ή εσφαλμένα αρνητικά, είναι περιπτώσεις όπου contrails εντοπίστηκαν δια οφθαλμού, αλλά ο αλγόριθμος δεν κατάφερε να τα εντοπίσει. Τέλος τα ορθά αρνητικά δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην παρούσα εργασία.

Στο σύνολο των 51 σκηνών που αναλύθηκαν για την αξιολόγηση, ο αλγόριθμος εντόπισε 58 contrails. Από αυτά, τα 49 ήταν επιτυχίες, μόλις 9 ήταν άκυροι συναγερμοί, ενώ υπήρξαν και 79 παραλείψεις. Συνεπώς το 84.5% των contrails που εντόπισε ο αλγόριθμος, ήταν πράγματι contrails και το υπόλοιπο 15,5% των contrails που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο ήταν σφάλματα. Στον Πίνακα IV, φαίνεται πώς διαμορφώθηκε ο πίνακας ενδεχομένων για το σύνολο της αξιολόγησης.

Πίνακας IV: Τιμές πίνακα ενδεχομένων για τις σκηνές της αξιολόγησης

2x2 Πίνακας ενδεχομένων		Εντοπισμός contrail δια οφθαλμού	
		Ναι	Όχι
Εντοπισμός contrail από αλγόριθμο	Ναι	49	9
	Όχι	79	-

Από τα στοιχεία του πίνακα ενδεχομένων υπολογίζονται έπειτα η πιθανότητα ορθού εντοπισμού (Probability of detection) ή ποσοστό επιτυχίας (hit rate), καθώς και το ποσοστό άκυρων συναγερμών (False alarm ratio), όπως προτείνεται και πάλι στο «Glossary of Forecast Verification Metrics», του NOAA. Οι ποσότητες αυτές υπολογίζονται με βάση τα στοιχεία του πίνακα δεδομένων και ισχύουν τα εξής:

- Probability of Detection (POD) ή Hit Rate: Πρόκειται για τον αριθμό των ορθά εντοπισμένων contrails ως προς το σύνολο των contrails των σκηνών.

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

- False Alarm Ratio (FAR): Πρόκειται για τον αριθμό των άκυρων συναγερμών (αντικείμενα που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο αλλά δεν



είναι στην πραγματικότητα contrails), προς το σύνολο των αντικειμένων που εντόπισε ο αλγόριθμος.

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

Οι τιμές των παραπάνω ποσοτήτων βρέθηκαν:

$$POD = 38\%$$

$$FAR = 15.5\%$$

Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος εντόπισε ορθά το 38% των συνολικών contrails που υπήρχαν στις σκηνές, ενώ το 15,5% των αντικειμένων που εντοπίζει ο αλγόριθμος δεν είναι στην πραγματικότητα contrails.

Η διαδικασία της αξιολόγησης πραγματοποιήθηκε πολλές φορές για διάφορους συνδυασμούς στις τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου. Στόχος ήταν να μειωθεί όσο ήταν δυνατό το FAR, διατηρώντας αξιοπρεπές POD. Με αυτό το τρόπο, μειώθηκε ο αριθμός των αντικειμένων που εντοπίζονται, όμως καθίσταται πιο βέβαιο ότι τα εντοπισμένα αντικείμενα είναι contrails και περιέχουν χρήσιμη πληροφορία.

3.1.3. Σύγκριση με άλλους αλγορίθμους

Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι εντοπισμού contrails. Οι αλγόριθμοι αυτοί αφορούν διαφορετικούς δορυφόρους και ακολουθούν διαφορετικές διαδικασίες. Έχουν όμως κοινή βάση τις θερμοκρασίες λαμπρότητας στα κανάλια του υπέρυθρου. Άμεση σύγκριση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για την παρούσα εργασία, μπορεί να γίνει με αντίστοιχο αλγόριθμο που αναπτύχθηκε επίσης για λογαριασμό της DLR (Mannstein et al., 1999). Ο αλγόριθμος αυτός, αποτελεί στην ουσία τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε ο αντίστοιχος για την παρούσα εργασία.

Αρχικά ο αλγόριθμος είχε κατασκευαστεί ώστε να δουλεύει με δεδομένα από το ραδιόμετρο AVHRR του δορυφόρου NOAA-14 του NOAA και ήταν γραμμένος σε γλώσσα IDL. Η αξιολόγηση του αλγορίθμου έδωσε $POD = 30-50\%$ και $FAR = 0.1\%$ (Mannstein et al., 1999). Ο δορυφόρος NOAA-14 είναι πολικής τροχιάς, επομένως βρίσκεται πολύ πιο κοντά στην επιφάνεια της γης και έτσι μπορεί να έχει πολύ καλύτερη ανάλυση. Συνεπώς, διαφοροποιείται σημαντικά από τον δορυφόρο MSG3 της EUMETSAT τον οποίο



αξιοποιεί ο αλγόριθμος της παρούσας εργασίας και για αυτό το λόγο δε μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των δύο.

Στις 15/01/2008, ο αλγόριθμος του Hermann Mannstein ενημερώθηκε, ώστε να μπορεί να δουλέψει και με δεδομένα του δορυφόρου MSG3. Έπειτα από αξιολόγηση του εν λόγω αλγορίθμου, προέκυψε POD >95% αλλά και FAR >85%. Αυτό σημαίνει ότι εντοπίζονται σχεδόν όλα τα contrails της εκάστοτε σκηνής, αλλά εντοπίζονται και πάρα πολλά αντικείμενα τα οποία δεν είναι contrails.

3.2. Ανάλυση χαρακτηριστικών των ιχνών αεροσκαφών

Με βάση την μεθοδολογία που αναφέρθηκε παραπάνω, κατασκευάστηκαν βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν πληθώρα στοιχείων για τα εντοπισμένα contrails. Πρώτο βήμα στην ανάλυση των βάσεων δεδομένων είναι η στατιστική τους επεξεργασία. Από αυτή την επεξεργασία μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των contrails. Για την στατιστική ανάλυση των παραχθέντων δεδομένων αναπτύχθηκε αλγόριθμος γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

Από το σύνολο των σκηνών που επεξεργάστηκαν, δεν εντοπίστηκαν σε όλες contrails. Προκειμένου λοιπόν να μικρύνει η βάση δεδομένων και να επιταχυνθεί έτσι η στατιστική επεξεργασία, πραγματοποιήθηκε αρχικά επιλογή των σκηνών στις οποίες είχαν εντοπιστεί contrails. Οι ακριβείς ημερομηνίες και ώρες των σκηνών αυτών καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν από τον αλγόριθμο στατιστικής ανάλυσης, ώστε να γίνει ακριβής επιλογή των δεδομένων εισόδου. Για κάθε μία τέτοια σκηνή, τα δεδομένα εισόδου είναι τρία αρχεία που περιέχουν:

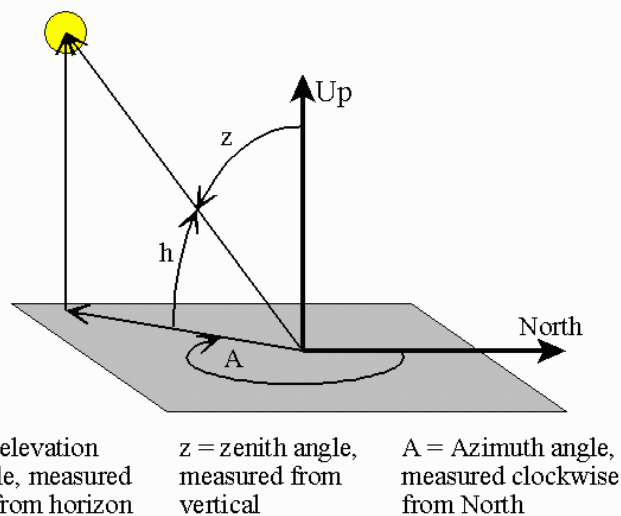
- a) τις ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες των contrails,
- b) γενικά χαρακτηριστικά των contrails, όπως το συνολικό αριθμό εικονοστοιχείων τους, το μήκος και πλάτος τους, και τον συντελεστή γραμμικότητάς τους,
- c) το συνολικό ποσοστό κάλυψης της σκηνής από contrails.

Και τα τρία αυτά αρχεία είναι προϊόντα του αλγορίθμου εντοπισμού contrails και αναλύθηκαν με τη σειρά που παρατέθηκαν παραπάνω. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε αρχικά για το σύνολο των δεδομένων και στη συνέχεια έγινε ανάλυση σε εποχιακή,

μηγναία και ωριαία κλίμακα. Τέλος κρίθηκε ότι θα είναι χρήσιμο να μελετηθούν οι διαφορές ανάμεσα σε ημέρα και νύχτα. Όπως είναι προφανές δεν μπορούσαν να επιλεγθούν συγκεκριμένες ώρες που θα όριζαν την ημέρα και τη νύχτα για όλη τη διάρκεια του έτους και για όλη τη περιοχή. Αναφορικά με την περιοχή πάρθηκε μία προσέγγιση. Θεωρήθηκε ότι το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος DO1 μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα σημείο που βρίσκεται στο κέντρο της. Για το σημείο αυτό έπεται έπρεπε να υπολογιστεί η ώρα έναρξης της ημέρας και της νύχτας αντίστοιχα. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε η ζενίθεια γωνία του ήλιου, sza (Εικόνα 33). Σε περίπτωση που ισχύει:

$$0^\circ \leq sza \leq 90^\circ$$

θεωρείται ότι στον εκάστοτε τόπο έχει ανατείλει ο ήλιος, άρα είναι μέρα. Αξιοποιώντας την εφαρμογή του National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), για τον αυτόματο υπολογισμό της ζενίθειας γωνίας του ήλιου, βρέθηκαν για κάθε μήνα οι ώρες για τις οποίες η ζενίθεια γωνία του ήλιου ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη στο κέντρο της περιοχής ενδιαφέροντος DO1. Οι ώρες αυτές θεωρήθηκαν ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου και χρησιμοποιήθηκαν για τον διαχωρισμό των δεδομένων σε ημέρα και νύχτα. Οι τιμές δίδονται στον Πίνακα V.



Εικόνα 33: Γωνίες για εντοπισμό ακριβούς θέσης του ήλιου. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL), Global Monitoring Division, Solar Calculator Glossary

Πίνακας V: Ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου στο κέντρο της περιοχής ενδιαφέροντος D01, για τον ορισμό ημέρας και νύχτας με βάση τη ζενίθεια γωνία του ήλιου.

month		Start of month			End of month		
		Time UTC	azimuth	sza	Time UTC	azimuth	sza
1	sunrise	8:00	4.44	85.56	8:00	7.3	82.7
	sunset	16:00	2.03	87.97	16:00	7.67	82.33
2	sunrise	8:00	7.49	82.51	8:00	14.95	75.05
	sunset	16:00	7.91	82.09	16:00	15.08	74.92
3	sunrise	7:00	5.44	84.56	7:00	15.21	74.79
	sunset	17:00	5.53	84.47	17:00	12.41	77.59
4	sunrise	6:00	5	85	6:00	13.15	76.85
	sunset	18:00	2.2	87.8	18:00	8	82
5	sunrise	5:00	3.17	86.83	5:00	7.78	82.22
	sunset	18:00	8.19	81.81	18:00	12.91	77.09
6	sunrise	5:00	7.85	82.15	5:00	7.64	82.36
	sunset	19:00	3.41	86.59	19:00	4.99	85.01
7	sunrise	5:00	7.56	82.44	5:00	3.71	86.29
	sunset	19:00	4.92	85.08	19:00	1.78	88.22
8	sunrise	6:00	13.58	76.42	6:00	8.19	81.81
	sunset	18:00	11.42	78.58	18:00	3.86	86.14
9	sunrise	6:00	7.99	82.01	6:00	2.17	87.83
	sunset	17:00	14.07	75.93	17:00	4.58	85.42
10	sunrise	7:00	12.15	77.85	7:00	5.15	84.85
	sunset	16:00	14.46	75.54	16:00	5.45	84.55
11	sunrise	8:00	13.88	76.12	8:00	7.41	82.59
	sunset	16:00	5.21	84.79	16:00	0.94	89.06
12	sunrise	8:00	7.24	82.76	8:00	4.44	85.56
	sunset	16:00	0.89	89.11	16:00	2	88

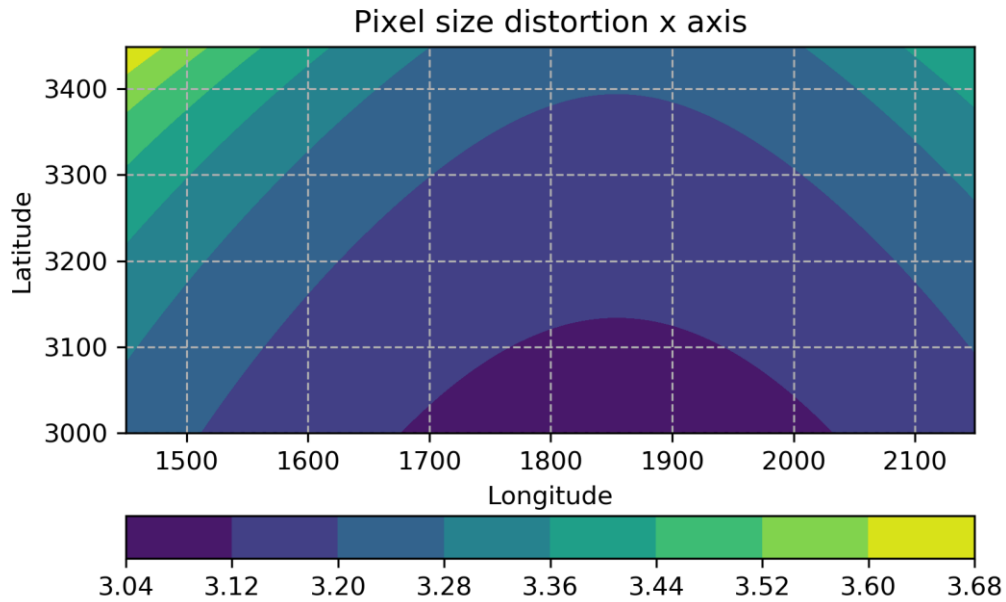


Από το πρώτο αρχείο, a), εξήχθησαν οι πληροφορίες για το γεωγραφικό μήκος και πλάτος στο οποίο εντοπίστηκαν τα contrails και κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ιστογράμματα. Συνδυάζοντας έπειτα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη κατασκευάστηκαν χάρτες πυκνότητας εμφάνισης contrails, που αποτυπώνουν επάνω στο χάρτη τα σημεία, όπου εντοπίστηκαν contrails με τη μεγαλύτερη συχνότητα.

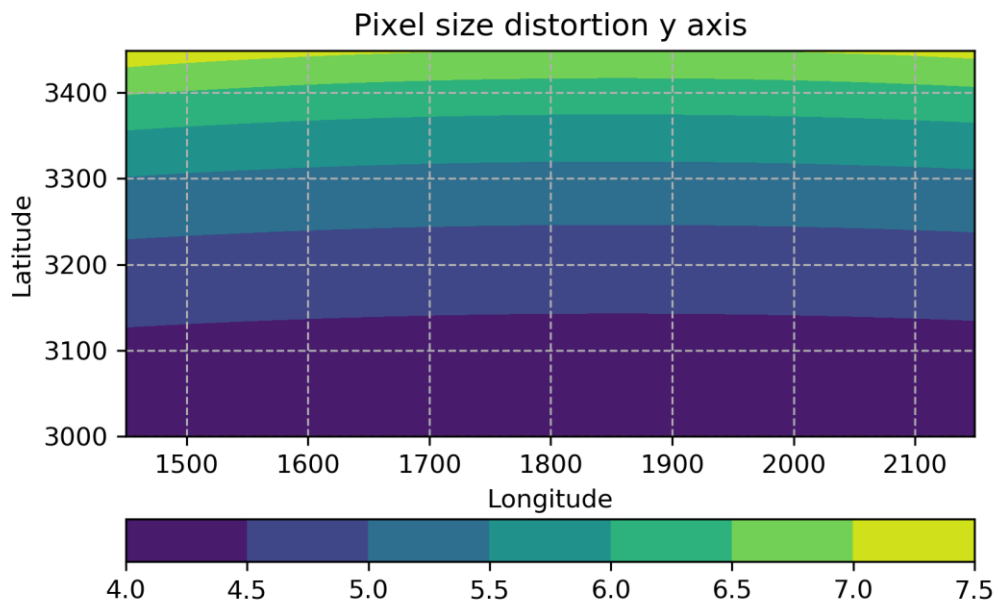
Από το δεύτερο αρχείο, b), εξήχθησαν οι πληροφορίες για το συνολικό αριθμό εικονοστοιχείων κάθε contrail, το μήκος και το πλάτος. Ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το εμβαδό που καλύπτει κάθε contrail. Για ευκολότερη κατανόηση της φυσικής σημασίας, κρίθηκε σκόπιμο να μετατραπεί αυτή η ποσότητα σε km². Η έκταση, όμως, κάθε εικονοστοιχείου δεν είναι ίδια σε όλη την έκταση της περιοχής.

Πάνω από τον ισημερινό οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων είναι 3x3 km. Λόγω της καμπυλότητας της Γης, τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται μακριά από τον ισημερινό υπόκεινται σε παραμόρφωση. Η παραμόρφωση στα γεωγραφικά πλάτη είναι πολύ πιο ισχυρή από ότι στα γεωγραφικά μήκη. Κατά τη διεύθυνση του γεωγραφικού μήκους, οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων στην περιοχή ενδιαφέροντος κυμαίνονται από 3,17 km έως 3,67 km (Εικόνα 34). Στη διεύθυνση του γεωγραφικού πλάτους αντίστοιχα, τα μεγέθη των εικονοστοιχείων της περιοχής ενδιαφέροντος κυμαίνονται από 4,05 km, έως 7,36 km (Εικόνα 35). Συνυπολογίζοντας με αυτές τις τιμές και τις περιοχές μέγιστης εμφάνισης contrails, επιλέχθηκε ένα μέσο μέγεθος εικονοστοιχείου για όλη την περιοχή με διαστάσεις 3,25 x 5 km. Με βάση αυτές τις τιμές, μετατράπηκε το εμβαδόν των contrails από αριθμό εικονοστοιχείων σε km². Ακολουθώντας, υπολογίστηκαν οι συχνότητες για την έκταση, το μήκος και το πλάτος των contrails και κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα ιστογράμματα.

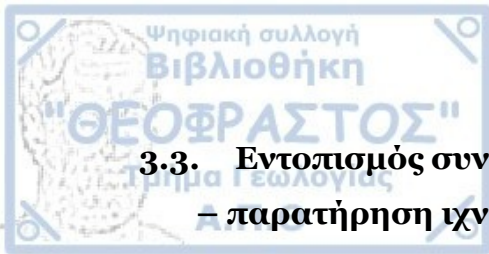
Τέλος από το τρίτο αρχείο, c), εξήχθη η πληροφορία για το συνολικό ποσοστό κάλυψης κάθε σκηνης από contrails, και κατασκευάστηκε και πάλι το αντίστοιχο ιστόγραμμα. Το ποσοστό κάλυψης μελετήθηκε εκτενέστερα και ως προς την μεταβολή του ανά ώρα και μήνα, με την κατασκευή αντίστοιχων διαγραμμάτων.



Εικόνα 34: Παραμόρφωση διαστάσεων εικονοστοιχείων στη διεύθυνση του γεωγραφικού μήκους. Οι άξονες είναι σε αριθμούς εικονοστοιχείων του πλέγματος του SEVIRI.



Εικόνα 35: Παραμόρφωση διαστάσεων εικονοστοιχείων στη διεύθυνση του γεωγραφικού πλάτους. Οι άξονες είναι σε αριθμούς εικονοστοιχείων του πλέγματος του SEVIRI.



3.3. Εντοπισμός συνθηκών ατμόσφαιρας που ευνοούν τον σχηματισμό – παρατήρηση ιχνών αεροσκαφών

Η στατιστική ανάλυση θα δώσει μια εικόνα για τα χαρακτηριστικά των contrails και τη συμπεριφορά τους ως προς το χρόνο, σε μηνιαία, ωριαία και εποχιακή κλίμακα. Η ανάλυση που πραγματοποιείται στη συνέχεια στοχεύει στον εντοπισμό των ατμοσφαιρικών παραμέτρων που ευνοούν την ανάπτυξη και τον εντοπισμό των contrails. Οι ατμοσφαιρικές παράμετροι που επιλέχθηκε να μελετηθούν, είναι:

- Θερμοκρασία (K)
- Σχετική υγρασία (%)
- Ειδική υγρασία (kg/kg)
- Ταχύτητες ανέμου σε συνιστώσες u (m/s) και v (m/s)
- Διεύθυνση ανέμου (deg)

οι τρεις πρώτες παράμετροι αναλύθηκαν σαν ομάδα, καθώς περιέχονταν σε κοινό αρχείο. Αντίστοιχα και οι τελευταίες δύο παράμετροι. Η ανάλυση που ακολουθήθηκε είναι όμοια και για τις δύο ομάδες παραμέτρων. Η κεντρική ιδέα είναι να συγκριθούν, η βάση δεδομένων των contrails, με τα μετεωρολογικά δεδομένα από αρχεία reanalysis. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες των εικονοστοιχείων κάθε contrail, μπορεί να γίνει ταύτιση με την τιμή που έχει κάθε παράμετρος στις αντίστοιχες συντεταγμένες.

Πρώτο βήμα είναι και πάλι να απομονωθούν από το σύνολο των σκηνών που αναλύθηκαν, εκείνες στις οποίες έχουν εντοπιστεί contrails. Οι σκηνές αυτές, προέκυψαν από τον αλγόριθμο εντοπισμού contrails και κατά συνέπεια έχουν βήμα 15 λεπτών. Τα δεδομένα reanalysis, όμως, έχουν χρονικό βήμα μίας ώρας. Για αυτό το λόγο από το σύνολο των σκηνών στις οποίες εντοπίστηκαν contrails, χρησιμοποιούνται μόνο εκείνες που έχουν αντιστοιχία με τα αρχεία reanalysis.

Για κάθε σκηνή εντοπίστηκε το αντίστοιχο αρχείο reanalysis και εξήχθησαν τα δεδομένα, θερμοκρασίας, σχετικής και ειδικής υγρασίας. Ακολούθησε περικοπή και περιστροφή των πινάκων δεδομένων, προκειμένου να έρθουν σε μορφή που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και μπορεί να επεξεργαστεί πιο εύκολα. Έλεπτα,

διαβάστηκαν για κάθε σκηνή οι γεωγραφικές συντεταγμένες των εικονοστοιχείων των contrails. Τα δεδομένα reanalysis βρίσκονται σε πλέγμα με ανάλυση $0,25^\circ$. Επομένως, προκειμένου να μπορεί να γίνει η ταύτιση των συντεταγμένων των contrails, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο εντοπισμού, με τις συντεταγμένες των δεδομένων reanalysis, πραγματοποιήθηκε μετατροπή των συντεταγμένων των contrails. Οι συντεταγμένες των contrails μεταφέρθηκαν στις κοντινότερες συντεταγμένες στο πλέγμα των δεδομένων reanalysis. Αν για παράδειγμα ένα contrail είχε εντοπιστεί στη θέση (45.8613 , -3.46396), θα ταυτιστεί με τα κλιματικά δεδομένα του σημείου (45.75 , -3.5).

Μετά την αντιστοίχιση των συντεταγμένων μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, εξήχθησαν οι ατμοσφαιρικές παράμετροι για κάθε εικονοστοιχείο contrail. Από τις βάσεις δεδομένων που σχηματίστηκαν, κατασκευάστηκαν τα ιστογράμματα για κάθε μία παράμετρο. Η ανάλυση έγινε και πάλι επί του συνόλου των δεδομένων, καθώς και σε σχέση με το χρόνο, σε εποχιακή μηνιαία και ωριαία κλίμακα.

Όμοια διαδικασία με τις τρεις πρώτες παραμέτρους, θερμοκρασία, σχετική και ειδική υγρασία, ακολουθήθηκε και για τις δύο που σχετίζονται με τον άνεμο: ένταση στις δύο συνιστώσες και διεύθυνση. Συνεπώς, εντοπίστηκαν οι σκηνές που έχουν contrails, διατηρήθηκαν αυτές που είναι στις ακριβώς κάθε ώρας και έγινε εξαγωγή των δεδομένων από τα κατάλληλα αρχεία reanalysis. Στα δεδομένα reanalysis παρέχεται πληροφορία μόνο για την ταχύτητα του ανέμου στις συνιστώσες u στη διεύθυνση Ανατολή – Δύση και v στη διεύθυνση Βορράς – Νότος. Μετά την αντιστοίχιση, και πάλι, των συντεταγμένων, ανάμεσα στις δύο βάσεις δεδομένων (θέση των contrails και ταχύτητες ανέμου) σημειώθηκαν οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου για κάθε εικονοστοιχείο contrail.

Από τις δύο συνιστώσες της έντασης του ανέμου, μπορεί να υπολογιστεί η διεύθυνσή του. Στην γλώσσα προγραμματισμού Python, αυτό γίνεται μέσω της σχέσης:

$$\text{wind direction} = (270 - \text{np.rad2deg}(\text{np.arctan2}(v, u)))\%360$$

- Η εντολή `arctan2()`, επιστρέφει την γωνία μεταξύ των δύο διανυσμάτων σε ακτίνια. Επιπλέον επιλέγει από μόνη της το κατάλληλο τεταρτημόριο για τον υπολογισμό. Αναλυτικά είναι:



$$\arctan2(y, x) = \begin{cases} \arctan \frac{y}{x} & x > 0 \\ \arctan \frac{y}{x} + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan \frac{y}{x} - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \text{αόριστο} & y = 0, x = 0 \end{cases}$$

- Η εντολή `rad2deg()` μετατρέπει τη γωνία που υπολογίζεται από ακτίνια σε μοίρες.
- Στη μετεωρολογία ως 0° λαμβάνονται οι βόρειοι άνεμοι, δηλαδή αυτοί που έρχονται από το βορρά. Επομένως υπάρχει ασυμφωνία με τον τριγωνομετρικό κύκλο. Αυτή διορθώνεται με την αφαίρεση της υπολογισμένης διεύθυνσης από το 270 .
- Τέλος με το `%360` εξασφαλίζεται ότι η γωνία 360° θα μετριέται ως 0° , καθώς πρόκειται για την ίδια γωνία.

Τέλος από τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου, υπολογίστηκε η ολική ένταση του ανέμου με την εντολή,

$$\text{wind speed} = \text{np.sqrt}(\text{np.square}(\text{con_u}) + \text{np.square}(\text{con_v}))$$

που δεν είναι άλλο από τη ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων, όπως προκύπτει από τον κανόνα του παραλληλογράμμου. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιήθηκε προκειμένου να μπορέσει παρασταθεί η ταχύτητα μαζί με την διεύθυνση του ανέμου σε διάγραμμα τύπου ροδογράμματος (wind rose).

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατασκευάζονται τα ιστογράμματα για τις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου, όπως και για την διεύθυνσή του. Η ανάλυση και παραγωγή γραφημάτων γίνεται και πάλι στο σύνολο των δεδομένων, καθώς και σε συνάρτηση με το χρόνο, σε εποχιακή μηνιαία και ωριαία κλίμακα.



4. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ακολουθώντας την μεθοδολογία του κεφαλαίου 3. Γίνεται επίσης προσπάθεια να απαντηθούν τα βασικά ερωτήματα και στόχοι της εργασίας, δηλαδή η μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών των contrails, και ο εντοπισμός των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας που ευνοούν την δημιουργία και τον εντοπισμό τους. Όπως και η μεθοδολογία, έτσι και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται σε δύο άξονες. Ο πρώτος αφορά μια στατιστική ανάλυση των contrails για το έτος 2016. Οι βασικές παράμετροι που περιλαμβάνει είναι: η γεωγραφική κατανομή των contrails, το μήκος, το μέσο πλάτος και το εμβαδό τους, καθώς και η συνολική κάλυψη της περιοχής D01 από contrails. Ο δεύτερος άξονας αφορά την ανάλυση των ατμοσφαιρικών παραμέτρων που ευνοούν τη δημιουργία και τον εντοπισμό των contrails. Αυτές είναι: η θερμοκρασία, η σχετική και ειδική υγρασία, η ένταση και διεύθυνση του ανέμου. Η ανάλυση για κάθε παράμετρο γίνεται επί του συνόλου των δεδομένων, καθώς και σε εποχιακή και ενδοημερήσια βάση.

4.1. Γενικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου

Κάποια γενικά αποτελέσματα προκύπτουν άμεσα από τον αλγόριθμο εντοπισμού contrails. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για όλο το έτος 2016. Συνολικά εξετάστηκαν 34975 σκηνές – δορυφορικές εικόνες. Όλο το έτος 2016 χωρισμένο σε βήματα των 15 λεπτών, περιλαμβάνει κανονικά 35136 σκηνές, όμως για κάποιες από αυτές τα δεδομένα ήταν είτε ελλιπή είτε κατεστραμμένα και έτσι δεν ολοκληρώθηκαν οι υπολογισμοί. Από τις 34975 σκηνές που εξετάστηκαν, μόλις στις 4239 εντοπίστηκε τουλάχιστον ένα contrail. Ο συνολικός αριθμός των contrails που εντοπίστηκαν είναι 6636. Λόγω της ελαφριάς κλίσης κάποιων contrails, καθώς και άλλων παραγόντων που οδηγούν σε ασυνέχειες της γραμμικότητας και της λαμπρότητας, κάποια contrails που με το ανθρώπινο μάτι εντοπίζονται ως ένα στοιχείο, αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο ως δύο γραμμικά στοιχεία. Συνεπώς ο πραγματικός αριθμός των contrails δεν είναι γνωστός. Βρίσκεται όμως μεταξύ 4239, αν σε κάθε σκηνή υπάρχει μόλις ένα contrail, και 6636, αν θεωρηθεί ότι κάθε στοιχείο που εντοπίστηκε από τον αλγόριθμο είναι πράγματι ένα contrail. Με μεγαλύτερη βεβαιότητα βρίσκεται ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων των contrails, που είναι 541489. Και για αυτό τον αριθμό υπάρχει όμως μια μικρή

αβεβαιότητα, που προέρχεται από το γεγονός ότι ένα εικονοστοιχείο θεωρείται ότι ανήκει στο contrail ακόμη και αν δε το καλύπτει ολόκληρο. Το γεγονός αυτό οδηγεί άλλοτε σε υπερεκτίμηση και άλλοτε σε υποεκτίμηση του αριθμού των εικονοστοιχείων του contrail, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών του, όπως το μήκος, το πλάτος και το εμβαδόν.

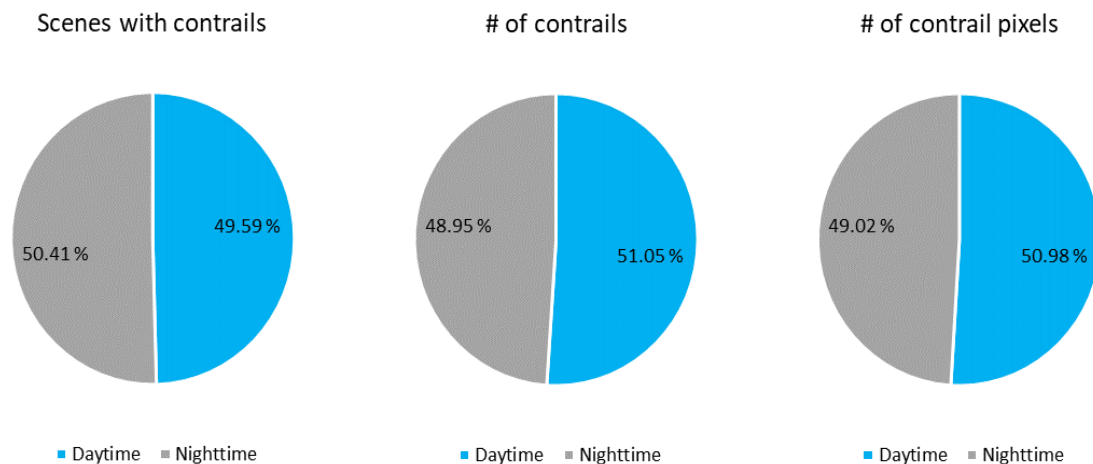
- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Στα επόμενα εξετάζονται τα αποτελέσματα από τον διαχωρισμό των εντοπισμένων contrails με βάση τον χρόνο εντοπισμού τους (ημέρα ή νύχτα). Αναλυτικά η διαδικασία του διαχωρισμού παρουσιάζεται στη Μεθοδολογία τους Κεφαλαίου 3. Στον Πίνακα VI παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διάκριση του συνόλου των δεδομένων σε σκηνές ημέρας και νύχτας. Στην Εικόνα 36, παρατίθενται τα αντίστοιχα γραφήματα.

Άμεσα γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ ημέρας – νύχτας. Αναφορικά με τον αριθμό των σκηνών στις οποίες εντοπίστηκαν contrails, αυτές είναι αμυδρά περισσότερες τη νύχτα (50,41 % του συνόλου). Αντίθετα όμως, ο αριθμός των contrails καθώς και ο αριθμός των εικονοστοιχείων τους είναι ελαφρά μεγαλύτερος την ημέρα (51,05% και 50,98 % του συνόλου αντίστοιχα). Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της ημέρας εντοπίστηκαν λιγότερες σκηνές που περιλάμβαναν contrails, όμως κάθε σκηνή είχε περισσότερα ή μεγαλύτερων διαστάσεων contrails. Τονίζεται όμως και πάλι ότι οι διαφορές είναι πολύ μικρές για να θεωρηθούν σημαντικές. Στο εξής θα θεωρηθεί ότι υπάρχει ισορροπία ημέρας – νύχτας.

Πίνακας VI: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου εντοπισμού contrails. Σύγκριση ημέρας - νύχτας.

Χρονική Περίοδος	Αριθμός σκηνών με τουλάχιστον ένα contrail (% του συνόλου)	Ολικός Αριθμός Εντοπισμένων contrails (% του συνόλου)	Αριθμός εικονοστοιχείων contrails (% του συνόλου)
Ημέρα	2102 (49,59 %)	3388 (51,05 %)	276028 (50,98 %)
Νύχτα	2137 (50,41 %)	3248 (48,95 %)	265461 (49,02 %)
Σύνολο	4239	6636	541489



Εικόνα 36: Κατανομή εντοπισμένων contrails σε ημέρα και νύχτα. Ποσοστά επί των συνολικά εντοπισμένων.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

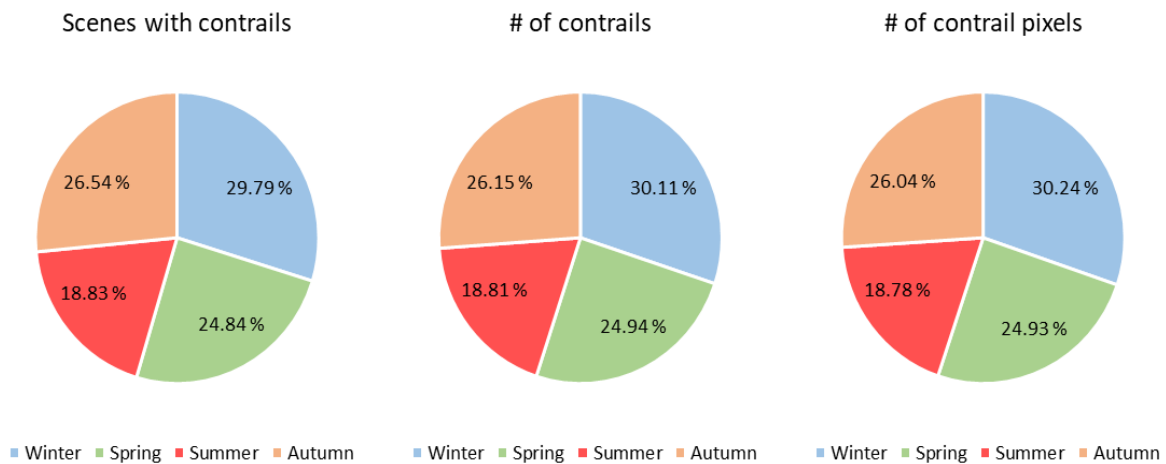
Τα αποτελέσματα από την εποχιακή κατανομή των σκηνών και των contrails παρατίθενται στον Πίνακα VII και παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 37. Σε αντίθεση με τον διαχωρισμό ημέρας – νύχτας, ο διαχωρισμός σε εποχές παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Όσον αφορά τον αριθμό των σκηνών στις οποίες εντοπίστηκε τουλάχιστον ένα contrail, το καλοκαίρι περιλαμβάνει τη λιγότερες (18,83 % του συνόλου) και ο χειμώνας τις περισσότερες (29,79 % του συνόλου). Τους τρεις μήνες του χειμώνα υπήρξαν 465 περισσότερες σκηνές με τουλάχιστον ένα contrail, από ότι τους μήνες του καλοκαιριού. Οι μεταβατικές εποχές, άνοιξη και φθινόπωρο, βρίσκονται μεταξύ των άλλων δύο και έχουν μικρότερη διαφορά μεταξύ τους: 24,84% του συνόλου εντοπίστηκαν την άνοιξη και 26,54 % του συνόλου, το φθινόπωρο.

Ο ολικός αριθμός των εντοπισμένων contrails, καθώς και ο αριθμός των εικονοστοιχείων που τα συνθέτουν, ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά δηλ. μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Μάλιστα η διαφορά χειμώνα καλοκαιριού μεγαλώνει πολύ αμυδρά, με το χειμώνα να ευνοείται.

Συνολικά προκύπτει ότι τα περισσότερα contrails εντοπίζονται τον χειμώνα και λιγότερα το καλοκαίρι. Ο αριθμός εντοπισμένων contrails ανά σκηνή είναι με μικρές διαφορές ίδιος σε όλες τις εποχές.

Πίνακας VII: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου εντοπισμού contrails. Σύγκριση εποχών.

Χρονική Περίοδος	Αριθμός σκηνών με τουλάχιστον ένα contrail (% του συνόλου)	Ολικός Αριθμός Εντοπισμένων contrails (% του συνόλου)	Αριθμός εικονοστοιχείων contrails (% του συνόλου)
Χειμώνας	1263 (29,79 %)	1998 (30,11 %)	163761 (30,24 %)
Άνοιξη	1053 (24,84 %)	1655 (24,94 %)	135013 (24,93 %)
Καλοκαίρι	798 (18,83 %)	1248 (18,81 %)	101694 (18,78 %)
Φθινόπωρο	1125 (26,54 %)	1735 (26,15 %)	141021 (26,04 %)
Σύνολο	4239	6636	541489



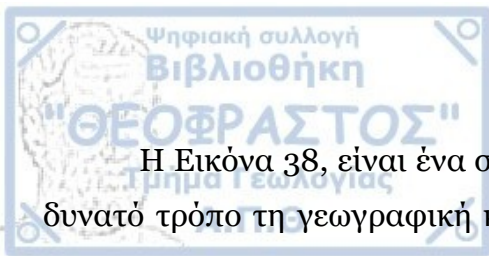
Εικόνα 37: Κατανομή εντοπισμένων contrails κατά εποχές. Ποσοστά επί των συνολικά εντοπισμένων.

4.2. Χαρακτηριστικά ιχνών αεροσκαφών

4.2.1. Γεωγραφική κατανομή των contrails

Με τον όρο γεωγραφική κατανομή των contrails, εννοείται ο εντοπισμός περιοχών στις οποίες αυτά εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα. Ο εντοπισμός αυτών των περιοχών είναι σημαντικός, λόγω της μεγάλης επίδρασης που μπορούν να έχουν τα contrails στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας και κατ' επέκταση στο κλίμα των περιοχών αυτών. Μετά τον εντοπισμό τους, γίνεται σύγκριση με τον χάρτη αεροπορικής ροής κυκλοφορίας (Εικόνα 7), για διασταύρωση των αποτελεσμάτων.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

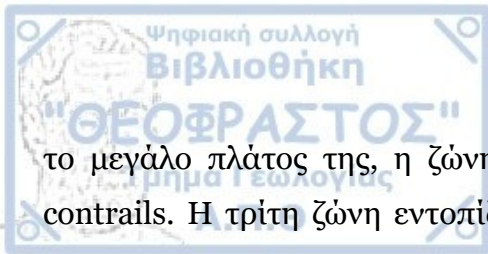


Η Εικόνα 38, είναι ένα σύμπλεγμα γραφημάτων που αποδίδουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη γεωγραφική κατανομή των εντοπισμένων contrails, τόσο ως προς το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, όσο και συνολικά. Στο επάνω μέρος της, δίδεται ιστόγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή των εντοπισμένων contrails ως προς το γεωγραφικό μήκος. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ο αριθμός των εικονοστοιχείων που είναι contrails, σε κάθε ζώνη γεωγραφικών μηκών. Εύκολα γίνεται φανερό ότι υπάρχει μία ζώνη γεωγραφικών μηκών στην οποία εντοπίστηκαν περισσότερα contrails ή η συχνότητα εντοπισμού είναι μεγαλύτερη. Η ζώνη αυτή εκτείνεται περίπου από τις 10° Δ έως τις 7° Δ. Στα άκρα της περιοχή ενδιαφέροντος D01, εντοπίζονται τα λιγότερα contrails. Αυτό σχετίζεται φυσικά και με το γεγονός ότι τα δεδομένα είναι σε σφαιρική προβολή, ενώ η ανάλυσή τους και το ιστόγραμμα είναι σε ορθογώνια. Στα υπόλοιπα γεωγραφικά μήκη της περιοχής D01, η κατανομή των contrails είναι αρκετά ομαλή. Στα ανατολικά της προαναφερθείσας κορυφής σχηματίζεται ένα πλατό με τιμή λίγο πάνω από τα 3000 εικονοστοιχεία. Μικρές κορυφές, δηλαδή ζώνες με μεγαλύτερες τιμές συχνότητας εντοπισμού, εντοπίζονται και στις 2° Α και 14° Α περίπου.

Συνολικά από την ανάλυση της κατανομής των contrails ως προς το γεωγραφικό μήκος, προκύπτει, ότι υπάρχει προτίμηση στον εντοπισμό των contrails στις δυτικές περιοχές της D01 και κυρίως σε μία ζώνη μεταξύ 5° Δ και 10° Δ. Άλλες ζώνες με σχετικά μεγαλύτερη συχνότητα εντοπισμού από το πλατό, βρίσκονται περίπου στις 1° Α με 3° Α και στις 12° Α με 14° Α.

Στο δεξιό τμήμα της Εικόνας 38, παρουσιάζεται το αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατανομή των εντοπισμένων contrails, με βάση το γεωγραφικό τους πλάτος. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στην προβολή των δεδομένων και της ανάλυσης (σφαιρική και ορθογώνια) μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό περισσότερων contrails βορειότερα.

Το πλατό σε αυτό το ιστόγραμμα σχηματίζεται περίπου στα 6000 εικονοστοιχεία. Δηλαδή σε κάθε ζώνη γεωγραφικών πλατών υπάρχουν 6000 εικονοστοιχεία contrail. Από το πλατό ξεχωρίζουν τέσσερις κορυφές, δηλαδή τέσσερις ζώνες γεωγραφικών πλατών στις οποίες εντοπίζονται περισσότερα contrails. Ξεκινώντας από τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, εντοπίζεται μία κορυφή περίπου στις 53° Β. Η επόμενη κορυφή έχει μεγάλο πλάτος και καλύπτει την έκταση περίπου από τις 50° Β έως τις 44° Β. Εκτός από



το μεγάλο πλάτος της, η ζώνη αυτή έχει και μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails. Η τρίτη ζώνη εντοπίζεται περίπου στις 42° Β. Ο αριθμός των εντοπισμένων contrails στη ζώνη αυτή, δεν είναι πολύ μεγαλύτερος από το πλατό, όμως ξεχωρίζει από τι γειτονικές της ζώνες. Τέλος μία αρκετά αιχμηρή κορυφή με μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails, εντοπίζεται περίπου στις 37° Β. Αναλυτικά η κατανομή των contrails ως προς το γεωγραφικό πλάτος και μήκος παρουσιάζεται στο Παράρτημα 6.1.

Από την ανάλυση της κατανομής των contrails ως προς το γεωγραφικό τους πλάτος και μήκος, προκύπτει ότι γενικότερα στην περιοχή D01 υπάρχει μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των contrails. Ως προς το γεωγραφικό μήκος εμφανίζεται πλατό περίπου στα 3000 εικονοστοιχεία και ως προς το γεωγραφικό πλάτος πλατό περίπου στα 6000 εικονοστοιχεία. Υπάρχουν όμως κάποιες ζώνες στις οποίες εντοπίστηκαν περισσότερα contrails, από ότι σε άλλες. Η πληροφορία από τα δύο ιστογράμματα συνδυάζεται στον χάρτη στο κέντρο της Εικόνας 38. Στον χάρτη αυτόν, κάθε εικονοστοιχείο αποδίδεται με ένα χρώμα, ανάλογα με τον αριθμό των σκηνών, που εντοπίστηκε σε αυτό contrail. Σε περιοχές με έντονο κίτρινο χρώμα, έχουν εντοπιστεί περισσότερα contrails.

Με βάση τα παραπάνω, στο χάρτη της Εικόνας 38, μπορούν να εντοπιστούν κάποιες περιοχές (subdomains) στις οποίες είναι πιο συχνός ο εντοπισμός των contrails από τον αλγόριθμο εντοπισμού. Κυριότερη από αυτές τις περιοχές, καθώς περιλαμβάνει και τον μεγαλύτερο αριθμό από contrails, είναι η περιοχή του Βισκαϊκού κόλπου και της Κελτικής θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή ορίζεται κατά προσέγγιση από τα βόρεια παράλια της Ισπανίας, τα δυτικά παράλια της Γαλλίας, και στο βορρά τα νότια παράλια της Ιρλανδίας. Στο εξής η περιοχή αυτή θα αναφέρεται ως περιοχή SDO1. Χαρακτηριστικά μέσα σε αυτή την περιοχή υψηλής συχνότητας εντοπισμού, διακρίνεται μία λωρίδα με τις ιδιαίτερα μεγάλες τιμές. Η λωρίδα αυτή φαίνεται να ξεκινάει πάνω από το ΒΔ άκρο της Ιβηρικής χερσονήσου και να εκτείνεται με διεύθυνση προς τα βορειοανατολικά, μέχρι τα ΒΔ παράλια της Γαλλίας. Συγκρίνοντας με τα δεδομένα ροής αεροπορικής κυκλοφορίας, προκύπτει ότι από εκείνη την περιοχή διέρχονται πτήσεις που συνδέουν την Ευρώπη με τις Κανάριες νήσους και τη Βραζιλία. Στο εξής θα αναφέρεται σαν διάδρομος Ε.Κ.Β. (Ευρώπη, Κανάρια, Βραζιλία). Η θαλάσσια περιοχή δυτικά των ΒΔ παραλίων της Ιβηρικής χερσονήσου αποτελεί επίσης περιοχή με μεγάλη συχνότητα

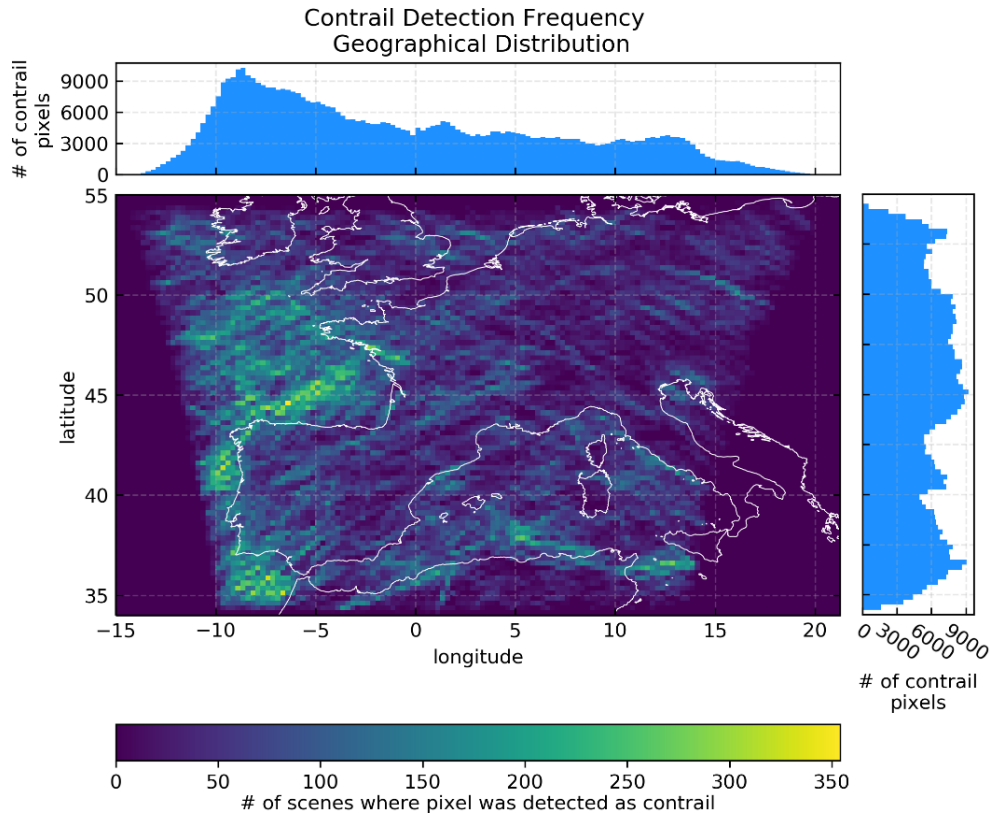
εντοπισμού contrails. Η περιοχή αυτή, στο εξής SDO2, έχει περιορισμένη έκταση και μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί προέκταση της λωρίδας υψηλών τιμών συχνότητας εντοπισμού της περιοχής SDO1. Όπως θα φανεί, όμως, στα επόμενα, είναι ανεξάρτητη.

Η περιοχή που ορίζεται από το στενό του Γιβραλτάρ και το ΝΔ άκρο της Ιβηρικής χερσονήσου, περιλαμβάνει επίσης μεγάλο αριθμό contrails. Στη συνέχεια αυτή η περιοχή θα αναφέρεται ως SDO3. Τέλος δύο περιοχές με μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails εμφανίζονται στη λεκάνη της Μεσογείου. Και οι δύο αυτές περιοχές έχουν σχετικά μικρή έκταση, όπως και μικρότερες τιμές συχνότητας εντοπισμού, σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η πρώτη εξ' αυτών, SDO4, βρίσκεται στη θαλάσσια περιοχή που ορίζεται από τα ΒΔ παράλια της Αλγερίας, μέχρι τις ΝΑ περιοχές των Βαλεαρίδων νήσων. Η τελευταία περιοχή, SDO5, βρίσκεται ανάμεσα στις Δ ακτές της Τυνησίας και τις Ν ακτές της Σικελίας, με το νότιο όριό της να ορίζεται από τις Πελάγους νήσους και τη Μάλτα. Οι πέντε υποπεριοχές υψηλής συχνότητας εντοπισμού contrail παρουσιάζονται στον χάρτη της Εικόνας 39.

Οι πέντε περιοχές υψηλής συχνότητας εντοπισμού contrails, εμφανίζουν μεταξύ τους το κοινό χαρακτηριστικό ότι βρίσκονται πάνω από θάλασσα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικά αίτια είτε στον αλγόριθμο εντοπισμού. Εκτός της SDO4, οι υπόλοιπες βρίσκονται επίσης στα δυτικά παράλια ξηράς. Οι περιοχές SDO1, SDO2 και SDO3, εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές εντοπισμού contrails και βρίσκονται και οι τρεις πάνω από τον Ατλαντικό ωκεανό. Συνολικά, είναι περισσότερα τα εντοπισμένα contrails στις δυτικές περιοχές της Ευρώπης, Ισπανία και Γαλλία, ενώ τα νότια τμήματα της κεντρικής Ευρώπης, Νότια Γερμανία, Ελβετία, Αυστρία και βόρεια Ιταλία, είναι περιοχές με πολύ μικρή συχνότητα εντοπισμού contrails. Τέλος άξια προσοχής είναι μια περιοχή στην Πολωνία, όπου εντοπίζεται μια λωρίδα με τιμές εντοπισμού contrails μεγαλύτερες από τις γύρω περιοχές, όχι όμως αρκετά σημαντικές, ώστε να θεωρηθεί περιοχή ενδιαφέροντος.

Για τον σχηματισμό των contrails απαιτείται εξ ορισμού να υπάρχει αεροπορική κυκλοφορία. Παρά την ύπαρξη ενός ομοιόμορφου πλατό στην Εικόνα 38, παρατηρούνται ξεκάθαρα κάποιοι αεροπορικοί διάδρομοι. Γεννιέται, λοιπόν το ερώτημα, μήπως η γεωγραφική κατανομή των contrails προκύπτει αποκλειστικά από την πυκνότητα

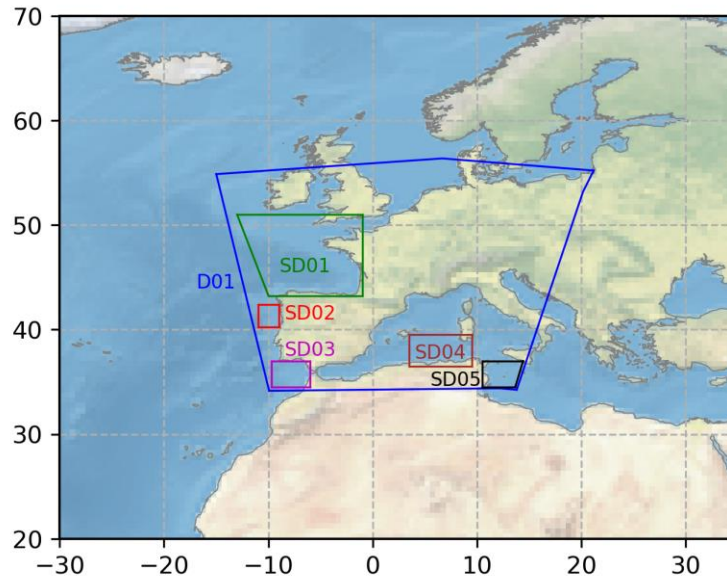
πτήσεων και δεν σχετίζεται με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα, γίνεται σύγκριση της γεωγραφικής κατανομής των contrails (Εικόνα 38) με τον χάρτη της ροής αεροπορικής κυκλοφορίας (Εικόνα 7).



Εικόνα 38: **Κέντρο:** Χάρτης με την γεωγραφική κατανομή συχνότητας εντοπισμού contrails της συνολικής περιοχής, το έτος 2016. Η χρωματική κλίμακα, δείχνει τον αριθμό των εικόνων στις οποίες το εκάστοτε εικονοστοιχείο θεωρήθηκε ότι είναι contrail. Για παράδειγμα σε ένα φωτεινό κίτρινο εικονοστοιχείο εντοπίστηκε contrail περίπου 350 φορές στη διάρκεια του έτους. **Δεξιά:** Ιστόγραμμα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος. Υπολογίστηκε από το γεωγραφικό πλάτος κάθε εικονοστοιχείου που αποτελούσε μέρος contrail σε κάθε σκηνή. **Επάνω:** Αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατανομή ως προς το γεωγραφικό μήκος.

Η κατανομή της ροής αεροπορικής κυκλοφορίας φαίνεται να αποτελεί ένα πυκνό πλέγμα πάνω από την Ευρώπη. Υπάρχουν περιοχές με πιο συχνές πτήσεις από άλλες, όμως υπάρχει ένα εμφανές πλάτος, που σημαίνει ότι σχεδόν από κάθε σημείο διέρχεται κάποια πτήση στη διάρκεια του έτους. Έτσι, μπορεί να δικαιολογηθεί, η ύπαρξη πλάτος και η ομοιόμορφη κατανομή και στον εντοπισμό των contrails. Η μέγιστη πυκνότητα της ροής αεροπορικής κυκλοφορίας, φαίνεται να εντοπίζεται σε έναν νοητό άξονα που συνδέει την Κωνσταντινούπολη με το Λονδίνο. Ιδίως η περιοχή μεταξύ Γερμανίας και Γαλλίας φαίνεται να εξυπηρετεί πολύ μεγάλο αριθμό πτήσεων. Παρά το γεγονός αυτό, στην εν λόγω περιοχή, δεν έχει εντοπιστεί αντίστοιχα μεγάλος αριθμός από contrails.

Συνεπώς δεν καθορίζει αποκλειστικά η πυκνότητα των πτήσεων, την πυκνότητα εντοπισμού των contrails. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο σχηματισμό και τον εντοπισμό των contrails.



Εικόνα 39: Υποπεριοχές (subdomains) όπου εντοπίζονται τα περισσότερα contrails.

Η σύγκριση των πτήσεων με τα εντοπισμένα contrails, κατά περιοχές υψηλού εντοπισμού contrails, παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον. Οι περιοχές SD01 και SD02, περιλαμβάνουν σημαντικό αριθμό πτήσεων. Στην περιοχή SD01 μάλιστα, εντοπίζονται διαδρομές με πολύ μεγάλο πτητικό έργο, δηλαδή διαδρομές που εξυπηρετούνται με μεγαλύτερη συχνότητα. Αντίθετα στην περιοχή SD02 εντοπίζονται διαδρομές με μικρότερο πτητικό έργο αλλά περισσότερες σε αριθμό. Από την κατανομή των πτήσεων φαίνεται επίσης ότι, παρόλο που οι δύο περιοχές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, τις διατρέχουν διαφορετικές πτήσεις, οπότε μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες. Η περιοχή SD03 περιλαμβάνει αεροπορικές συνδέσεις, πολλές σε αριθμό, αλλά και με μεγάλο πτητικό έργο. Τέλος οι περιοχές SD04 και SD05, δεν φαίνεται να διατρέχονται από μεγάλο αριθμό αεροπορικών διαδρομών, αλλά έχουν πτήσεις με μεγάλο πτητικό έργο.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Η μετάβαση από την ημέρα στη νύχτα, μπορεί να επηρεάσει την κατανομή των contrails με ποικίλους τρόπους. Για παράδειγμα μεταβάλλεται η κατανομή πτήσεων, τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, καθώς και οι ακτινοβολίες που ανιχνεύονται από το

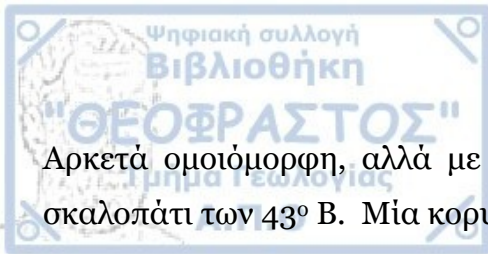


ραδιόμετρο του δορυφόρου. Επομένως είναι σημαντικό να μελετηθεί η πιθανή μεταβολή στην κατανομή των contrails μεταξύ ημέρας και νύχτας.

Στην Εικόνα 40 παρατίθενται οι γεωγραφικές κατανομές των contrails που εντοπίστηκαν τη διάρκεια της ημέρας (αριστερά) και αυτών που εντοπίστηκαν τη νύχτα (δεξιά). Οι δύο χάρτες συνοδεύονται από τα ιστογράμματα των κατανομών των contrails ως προς το γεωγραφικό πλάτος (στα δεξιά) και το γεωγραφικό μήκος (επάνω).

Ξεκινώντας από την κατανομή των εντοπισμένων contrails ως προς το γεωγραφικό μήκος τους, δεν εντοπίζονται σημαντικές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας. Και στις δύο περιπτώσεις, τα περισσότερα contrails εντοπίζονται σε μία ζώνη μεταξύ 5° Δ και 10° Δ. Τη διάρκεια της ημέρας, εντοπίζονται και άλλες δύο κορυφές στις οποίες εντοπίζονται περισσότερα contrails από ότι στις γειτονικές. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται περίπου στις 1° Α με 3° Α και στις 12° Α με 14° Α. Τη διάρκεια της νύχτας οι κορυφές αυτές στην συχνότητα εντοπισμού contrails δεν εμφανίζονται. Αντιθέτως υπάρχει μόνο η μία κορυφή στα δυτικά της D01 και τα υπόλοιπα γεωγραφικά μήκη έχουν ομοιόμορφο αριθμό εντοπισμένων contrails.

Η κατανομή των contrails ως προς το γεωγραφικό τους πλάτος, παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατανομή είναι ισορροπημένη μεταξύ νότου και βορρά. Εμφανίζονται όμως τέσσερις κορυφές – ζώνες υψηλής συχνότητας εντοπισμού. Η πρώτη από αυτές, εντοπίζεται περίπου στις 53° Β. Είναι αρκετά αιχμηρή, αλλά δεν περιλαμβάνει πολύ μεγάλο αριθμό εντοπισμένων contrails. Η επόμενη κορυφή καλύπτει μεγάλη έκταση περίπου από τις 50° Β έως τις 44° Β. Χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος της, αλλά και τις μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails. Άλλη μία περιοχή εντοπίζεται περίπου στις 42° Β, που όμως δεν έχει μεγάλες συχνότητες εντοπισμού contrails. Τέλος μία αρκετά αιχμηρή κορυφή εντοπίζεται περίπου στις 37° Β. Η κορυφή αυτή περιλαμβάνει τα περισσότερα εντοπισμένα contrails. Η κατανομή των contrails που εντοπίστηκαν την νύχτα, ως προς το γεωγραφικό πλάτος, είναι αρκετά διαφορετική από την ημέρα. Τη νύχτα η κατανομή εμφανίζει ένα απότομο σκαλοπάτι περίπου στις 43° Β. Από εκείνο το σημείο και βόρεια, εντοπίζεται ο μεγαλύτερος αριθμός των εντοπισμένων contrails, έχοντας ομοιόμορφη κατανομή.



Αρκετά ομοιόμορφη, αλλά με μικρότερες τιμές είναι η κατανομή νοτιότερα από το σκαλοπάτι των 43° Β. Μία κορυφή που ξεχωρίζει, βρίσκεται περίπου στις 37° Β.

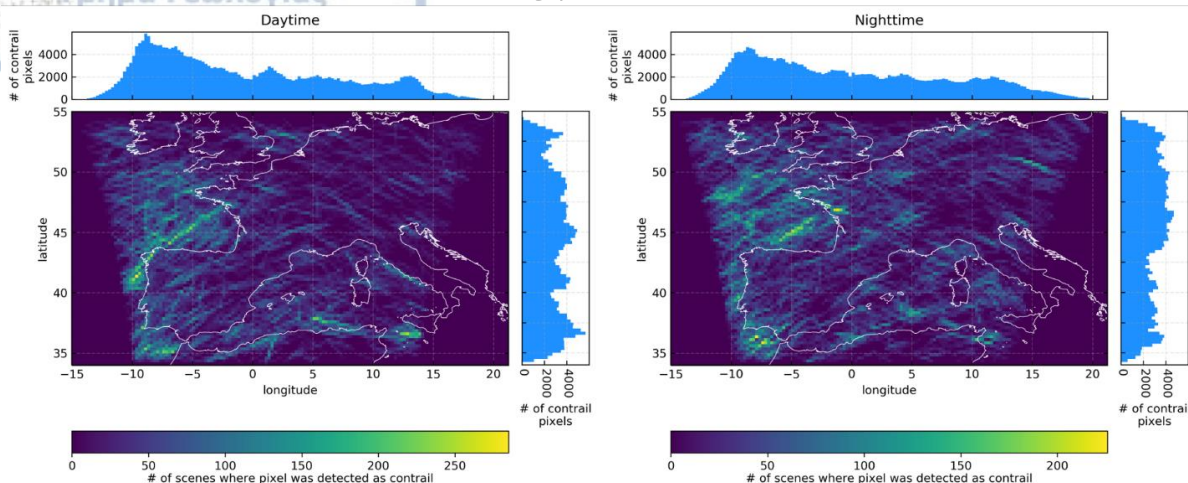
Συμπερασματικά, για τις κατανομές των εντοπισμένων contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος και μήκος, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα στη σύγκριση ημέρας – νύχτας. Τα περισσότερα contrails εντοπίζονται στα δυτικά της Δο1 τόσο τη μέρα όσο και τη νύχτα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όμως, εντοπίζονται και δύο περιοχές με μεγάλο αριθμό contrails στα ανατολικά. Ως προς το γεωγραφικό πλάτος, την ημέρα, εντοπίζονται διακριτές κορυφές σε όλο το εύρος των πλατών, ενώ τη νύχτα δεν εντοπίζονται τόσες μεμονωμένες κορυφές, παρά υπάρχει γενικότερα ισχυρή προτίμηση στον εντοπισμό των contrails βόρεια των 43°Β, με εξαίρεση μία περιοχή περίπου στις 37° Β. Αναλυτικά η κατανομή των contrails ως προς το γεωγραφικό πλάτος και μήκος για την ημέρα και τη νύχτα παρουσιάζεται στο Παράρτημα 6.1.

Οι πληροφορίες για τις κατανομές των εντοπισμένων contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος και μήκος συνδυάζονται στους χάρτες της Εικόνας 40. Τόσο την ημέρα όσο και την νύχτα, μπορούν και πάλι να εντοπιστούν οι πέντε υποπεριοχές με την μέγιστη συχνότητα εντοπισμού contrails.

Η υποπεριοχή SD01, έχει σχετικά παρόμοια συμπεριφορά. Κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι αρκετά πιο έντονη η ζώνη υψηλών τιμών εντοπισμού contrails που τη διαπερνά, διάδρομος E.K.B.). Κατά τη διάρκεια της νύχτας αντίθετα, είναι γενικώς υψηλότερες οι τιμές εντοπισμού στην περιοχή, με αποτέλεσμα να μην ξεχωρίζει τόσο έντονα ο διάδρομος αυτός. Επίσης τη διάρκεια της νύχτας στην υποπεριοχή SD01, εμφανίζεται ένα έντονο, μικρής έκτασης μέγιστο στον εντοπισμό των contrails στη Δ. Γαλλία πάνω από την ξηρά, το οποίο δεν εμφανίζεται καθόλου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η υποπεριοχή SD02, περιλαμβάνει μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ δεν είναι εμφανής τη νύχτα. Αντίθετη είναι η συμπεριφορά της υποπεριοχής SD03. Τη διάρκεια της νύχτας εντοπίζονται εκεί πολλά contrails, ενώ τη διάρκεια της ημέρας όχι. Τέλος οι υποπεριοχές SD04 και SD05 περιλαμβάνουν μεγαλύτερο αριθμό εντοπισμένων contrails την ημέρα. Η διαφορά ημέρας- νύχτας είναι πιο εμφανής στην υποπεριοχή SD05.

Contrail Detection Frequency
Geographical Distribution



Εικόνα 40: Χάρτες με την γεωγραφική κατανομή συχνότητας εντοπισμού contrails της συνολικής περιοχής τη ημέρα (αριστερά) και τη νύχτα (δεξιά), το έτος 2016. Η χρωματική κλίμακα, δείχνει τον αριθμό των εικόνων στις οποίες το εκάστοτε εικονοστοιχείο θεωρήθηκε ότι είναι contrail. Στα δεξιά κάθε χάρτη βρίσκεται ιστόγραμμα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος. Επάνω από κάθε χάρτη βρίσκεται αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατανομή ως προς το γεωγραφικό μήκος.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα από την σύγκριση της κατανομής των contrails την ημέρα και τη νύχτα, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η περιοχή SDO1 περιλαμβάνει μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails, με τον διάδρομο E.K.B. να σχηματίζεται ξεκάθαρα. Ο διάδρομος συνεχίζει μέχρι την περιοχή SDO2, στην οποία και εντοπίζονται τα περισσότερα contrails, για την ημέρα. Τη νύχτα, η περιοχή SDO1 περιλαμβάνει και πάλι πολύ μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrail, με το διάδρομο E.K.B. να είναι και πάλι εμφανής αν και δεν συνεχίζεται στην υποπεριοχή SDO2. Τη νύχτα η περιοχή SDO2 περιλαμβάνει μικρό αριθμό εντοπισμένων contrails και διακρίνεται με δυσκολία. Στην περιοχή SDO3, εμφανίζονται σημεία με πολύ μεγάλους αριθμούς εντοπισμένων contrails, μόνο τη νύχτα. Οι υπόλοιπες υποπεριοχές, SDO4 και SDO5, είναι εμφανείς την ημέρα, ενώ τη νύχτα περιλαμβάνουν μικρό αριθμό εντοπισμένων contrails, με αποτέλεσμα να διακρίνονται με δυσκολία. Τη διάρκεια της νύχτας, χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση μία μικρής περιοχής στα δυτικά παράλια της Γαλλίας με πολύ μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού contrail πάνω από τη ξηρά.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

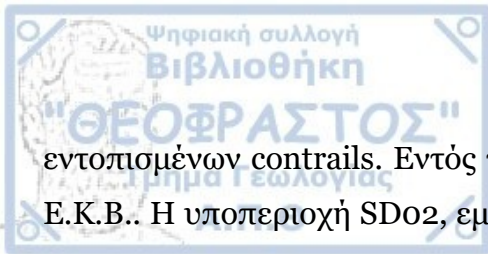
Η αλλαγή των εποχών, όπως και η μετάβαση από τη μέρα στη νύχτα, φανερώνει διαφορετικά χαρακτηριστικά και πτυχές των contrails. Από εποχή σε εποχή

μεταβάλλονται, τόσο οι πτήσεις, όσο και παράμετροι στην ατμόσφαιρα, όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η γωνία με την οποία οι ηλιακές ακτίνες φτάνουν στην επιφάνεια της γης και ανακλώνται προς τον μετεωρολογικό δορυφόρο. Είναι συνεπώς χρήσιμο να μελετηθούν οι τυχόν εποχιακές μεταβολές στην κατανομή των εντοπισμένων contrails. Στην Εικόνα 41, παρουσιάζεται για κάθε εποχή χάρτης με τη γεωγραφική κατανομή των εντοπισμένων contrails σε συνδυασμό με ιστόγραμμα της κατανομής των εντοπισμένων contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος.

Ας εξεταστούν αρχικά τα ιστογράμματα της κατανομής ως προς το γεωγραφικό μήκος. Κοινό χαρακτηριστικό σε όλες τις εποχές, είναι η μεγαλύτερη συχνότητα εντοπισμού contrails στα δυτικά της περιοχής D01. Η ζώνη αυτή, υψηλής συχνότητας εντοπισμού, είναι πιο στενή κατά την άνοιξη περίπου στις 7° Δ. Τις υπόλοιπες εποχές έχει μεγαλύτερη έκταση περίπου από τις 9° Δ έως τις 4° Δ. Το καλοκαίρι και περισσότερο την άνοιξη, πέρα από την κορυφή στα δυτικά, δεν εμφανίζεται κάποια άλλη ζώνη με σημαντικό αριθμό εντοπισμένων contrails. Επομένως η κατανομή είναι ομοιόμορφη. Αντίθετα, το χειμώνα και το φθινόπωρο εντοπίζονται διάφορες μικρές κορυφές.

Οι κατανομές ως προς το γεωγραφικό πλάτος παρουσιάζουν μία πιο ενδιαφέρουσα εικόνα. Τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες η κατανομή είναι αρκετά ομοιόμορφη. Μεγάλος αριθμός contrails εντοπίζεται σε μία ζώνη περίπου στις 45° Β. Το φθινόπωρο εντοπίζεται και μία κορυφή πιο νότια στις 37° περίπου. Η κορυφή αυτή είναι εμφανής και την άνοιξη. Τους ανοιξιάτικους μήνες μάλιστα, σε αυτή τη περιοχή εντοπίζονται τα περισσότερα contrails. Η εικόνα αλλάζει σημαντικά μεταβαίνοντας από την άνοιξη στο καλοκαίρι. Τους καλοκαιρινούς μήνες τα περισσότερα contrails εντοπίζονται βόρεια με την μέγιστη συχνότητα εντοπισμού να βρίσκεται στις 47° Β περίπου. Συνολικά, ξεκινώντας από τον χειμώνα, η κατανομή είναι αρκετά ομοιόμορφη. Την άνοιξη τα περισσότερα contrails εντοπίζονται νότια (37° Β), ενώ το καλοκαίρι βορειότερα, περίπου στις 47° Β. Το φθινόπωρο παραμένουν οι μεγάλες τιμές συχνότητας εντοπισμού στις 47° Β, αλλά εμφανίζεται και πάλι η κορυφή στις 37° Β.

Η συνολική εικόνα για την γεωγραφική κατανομή των εντοπισμένων contrails προκύπτει εστιάζοντας στις υποπεριοχές που ορίστηκαν παραπάνω (Εικόνα 39). Για το χειμώνα, η υποπεριοχή SDO1, είναι αυτή που περιέχει τον μεγαλύτερο αριθμό



εντοπισμένων contrails. Εντός της, οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται πάνω στον διάδρομο E.K.B.. Η υποπεριοχή SDO2, εμφανίζει επίσης σημαντικές τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails, αρκετά μικρότερες όμως από την SDO1. Φαίνεται και εδώ να αποτελεί τη συνέχεια του διαδρόμου E.K.B. που εντοπίζεται στην SDO1. Η υποπεριοχή SDO3, περιλαμβάνει και αυτή αρκετά εντοπισμένα contrails με ομοιόμορφη κατανομή σε όλη της την έκταση. Τέλος, το χειμώνα οι περιοχές SDO4 και SDO5, δεν εμφανίζουν σημαντικές τιμές συχνότητας εντοπισμού contrails, συνεχίζουν όμως να είναι διακριτές.

Την άνοιξη, η κατανομή των εντοπισμένων contrails αλλάζει σημαντικά. Πλέον η περιοχή με τη μεγαλύτερη συχνότητα εντοπισμού contrails, είναι η SDO3. Ο αριθμός των εντοπισμένων contrails στην περιοχή SDO1, μειώνεται, ενώ δεν είναι εμφανής και ο διάδρομος E.K.B.. Στην περιοχή SDO2, εντοπίζεται σχετικά μικρό ποσοστό των contrails της εποχής. Αντίθετα αυξάνονται τα εντοπισμένα contrails στις περιοχές SDO4 και SDO5. Συνεπώς μεταβαίνοντας από το χειμώνα στην άνοιξη παρατηρείται μετατόπιση της περιοχής με αυξημένο εντοπισμό contrails, προς τα νότια.

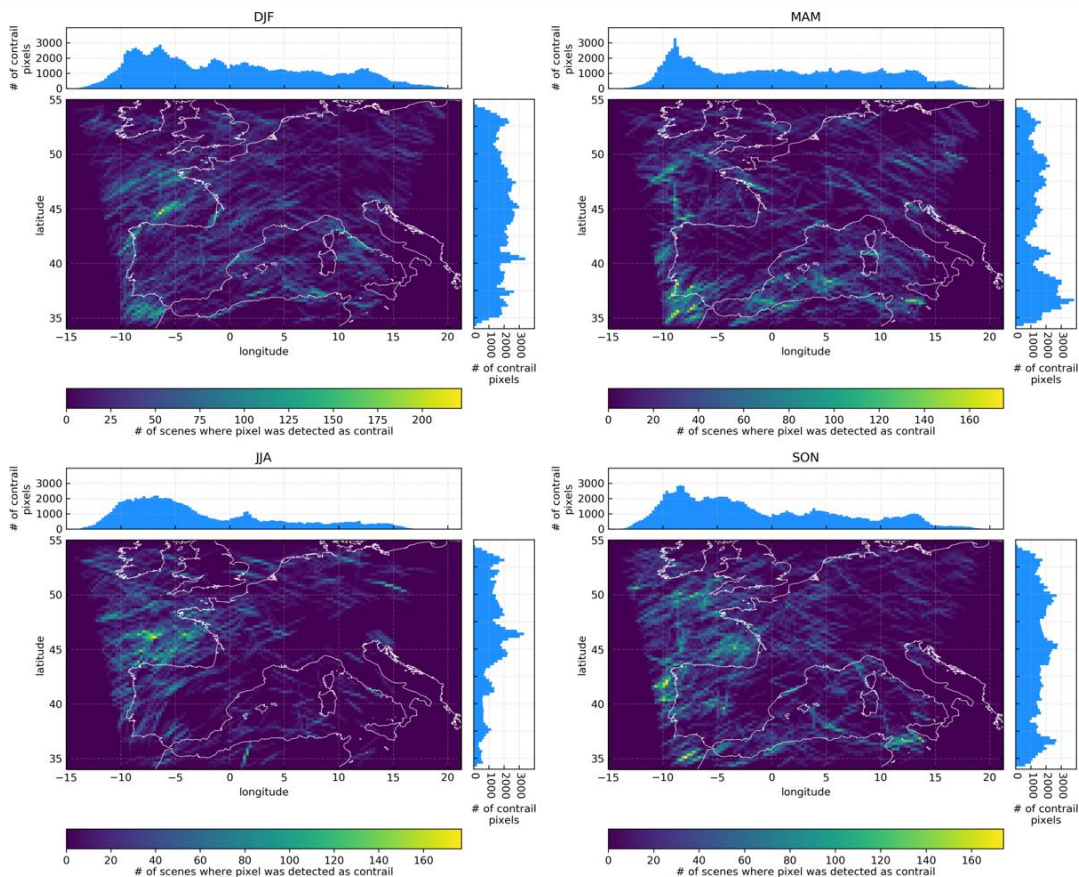
Το καλοκαίρι η κατανομή των εντοπισμένων contrails αλλάζει σημαντικά και πάλι. Η περιοχή SDO1 περιλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό των εντοπισμένων contrails της εποχής σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Εντός της περιοχής SDO1, η κατανομή της συχνότητας εντοπισμού είναι αρκετά ομαλή. Εντοπίζονται όμως κάποια σημεία με περισσότερα εντοπισμένα contrails. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι, το καλοκαίρι εμφανίζεται μία ακόμη περιοχή, όπου εντοπίζονται πολλά contrails. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στα βορειοανατολικά του DO1, στα σύνορα Γερμανίας – Πολωνίας.

Η μετάβαση από το καλοκαίρι στο φθινόπωρο, συνοδεύεται και αυτή από σημαντική μεταβολή στην γεωγραφική κατανομή των εντοπισμένων contrails. Οι σημαντικότερες μεταβολές εμφανίζονται στις πιο νότιες υποπεριοχές SDO3, SDO4 και SDO5. Και στις τρεις αυτές περιοχές παρατηρείται αύξηση των εντοπισμένων contrails πιο έντονη στις SDO3 και SDO5. Η περιοχή SDO1 περιλαμβάνει αριθμό εντοπισμένων contrails συγκρίσιμο με αυτόν του καλοκαιριού, ενώ μεγιστοποιείται ο αριθμός των εντοπισμένων contrails στην περιοχή SDO2.

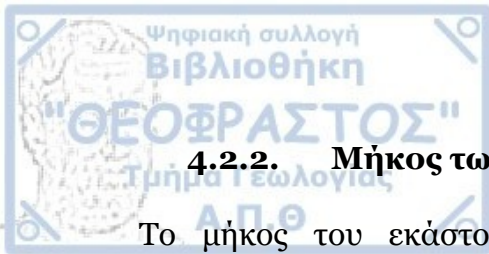
Συνοπτικά για κάθε περιοχή προκύπτουν ποικίλα αποτελέσματα. Τα contrails που εντοπίζονται στην περιοχή SDO1 μεγιστοποιούνται το καλοκαίρι, τόσο σε αριθμό, όσο και

σε κάλυψη της περιοχής. Οι τιμές σταδιακά μειώνονται μέχρι το χειμώνα και ελαχιστοποιούνται την άνοιξη. Το χειμώνα τα περισσότερα contrails της περιοχής βρίσκονται πάνω στο διάδρομο E.K.B.. Στην περιοχή SDO2, ο αριθμός των εντοπισμένων contrails μεγιστοποιείται το φθινόπωρο, ενώ τις υπόλοιπες εποχές παραμένει σχετικά σταθερός. Η περιοχή SDO3, αντίθετα, εμφανίζει δύο μέγιστα, τις μεταβατικές εποχές, άνοιξη και φθινόπωρο. Τον χειμώνα συνεχίζει να περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό εντοπισμένων contrails, ενώ το καλοκαίρι δεν εντοπίζονται σχεδόν καθόλου contrails. Τέλος οι περιοχές SDO4 και SDO5, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, τόσο μεταξύ τους, όσο και με την SDO3. Οι τιμές των εντοπισμένων contrails, είναι μεγάλες την άνοιξη και το φθινόπωρο, μειώνονται το χειμώνα και σχεδόν εκμηδενίζονται το καλοκαίρι.

Contrail Detection Frequency Geographical Distribution



Εικόνα 41: Εποχιακοί χάρτες με την γεωγραφική κατανομή συχνότητας εντοπισμού contrails της συνολικής περιοχής, το έτος 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά. Η χρωματική κλίμακα, δείχνει τον αριθμό των εικόνων στις οποίες το εκάστοτε εικονοστοιχείο θεωρήθηκε ότι είναι contrail. Στα δεξιά κάθε χάρτη βρίσκεται ιστόγραμμα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος. Επάνω από κάθε χάρτη βρίσκεται αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατανομή ως προς το γεωγραφικό μήκος.

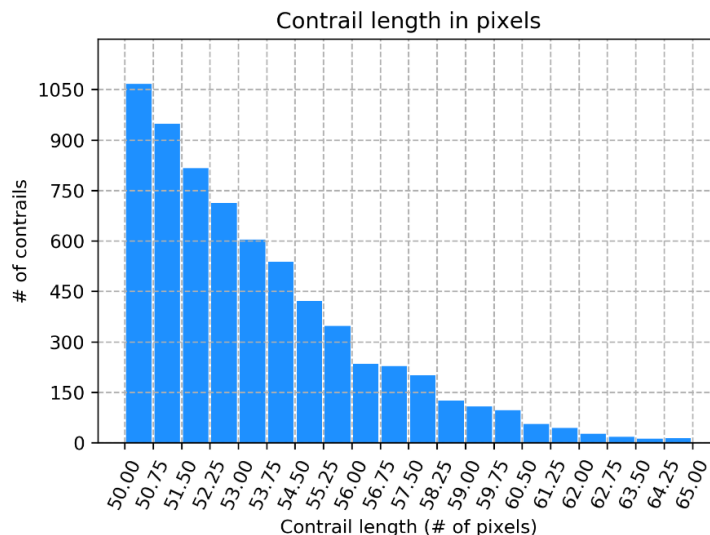


4.2.2. Μήκος των contrails

Το μήκος του εκάστοτε contrail, αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της μορφολογίας του. Contrails με διαφορετικά μήκη, επηρεάζουν διαφορετικά το περιβάλλον τους. Στην Εικόνα 42, παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της κατανομής των εντοπισμένων contrails, ανάλογα με το μήκος τους. Το ελάχιστο μήκος των contrails είναι 50 εικονοστοιχεία. Η συνθήκη αυτή έχει οριστεί στον αλγόριθμο εντοπισμού, ώστε να μειωθούν τα σφάλματα. Το μήκος υπολογίζεται ως η μέγιστη απόσταση μεταξύ των εικονοστοιχείων του εκάστοτε contrail. Αναλυτικά η επεξήγηση δίδεται παραπάνω, στο Κεφάλαιο 3.

Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 42 φαίνεται ότι τα περισσότερα contrails έχουν μήκος κοντά στο κατώφλι των 50 εικονοστοιχείων. Ο αριθμός τους μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους, με τα μεγαλύτερα contrails να φτάνουν σε μέγεθος τα 65 εικονοστοιχεία. Προφανώς, είναι δύσκολο να γίνει κατανοητό το μέγεθος σε εικονοστοιχεία. Είναι όμως εξίσου δύσκολο να οριστεί μετατροπή των εικονοστοιχείων σε χιλιόμετρα. Η δυσκολία εντοπίζεται αφενός στο γεγονός ότι το μέγεθος των εικονοστοιχείων δεν είναι σταθερό σε όλη την περιοχή, και αφετέρου στο γεγονός ότι ανάλογα με τη διεύθυνση του contrail, αλλάζει η διάσταση του εικονοστοιχείου που πρέπει να ληφθεί ως μήκος. Κατά προσέγγιση, μπορούν θεωρηθούν τετράγωνα εικονοστοιχεία με διαστάσεις 4,5 km x 4,5 km, σύμφωνα με τις Εικόνα 34 και Εικόνα 35. Δεχόμενοι αυτή την προσέγγιση, προκύπτει ότι τα εντοπισμένα contrails, έχουν ένα εύρος από 225 km έως 292,5 km. Με τα περισσότερα να βρίσκονται στο κατώτερο άκρο.

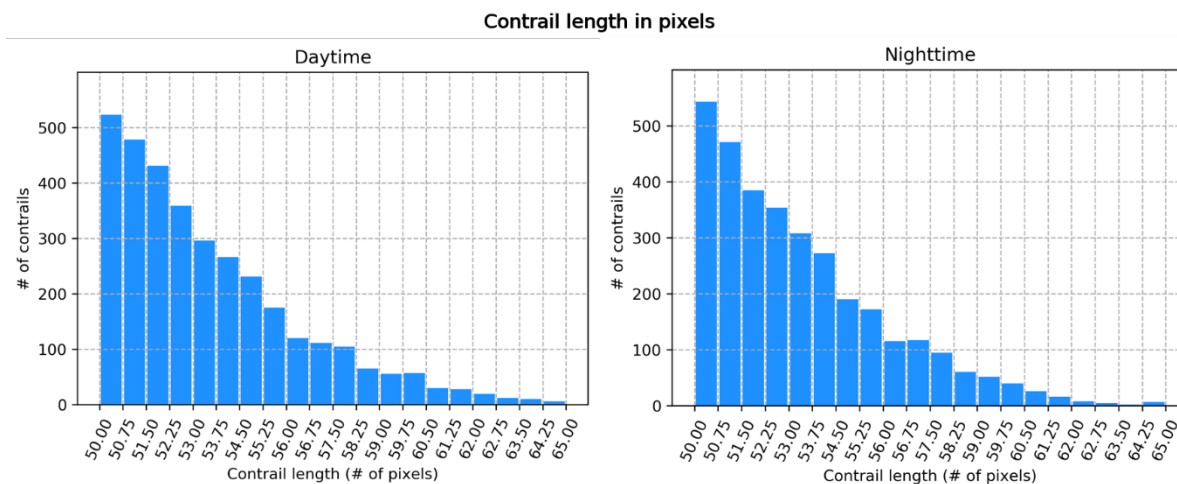
Τα contrails που εντοπίζονται από τον αλγόριθμο, είναι συνεπώς μεγάλα σε μήκος. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο, αν ληφθεί υπόψιν, ότι τα δορυφορικά δεδομένα προέρχονται από δορυφόρο σε γεωστάσιμη τροχιά, που δεν μπορεί να εντοπίσει μικρά στοιχεία. Επιπλέον, πιθανή πηγή σφάλματος αποτελεί το γεγονός ότι δεν είναι γνωστή η κάλυψη του εκάστοτε εικονοστοιχείου από το contrail. Έτσι τυχαίνει να προσμετράται στο μήκος του, ένα εικονοστοιχείο ολόκληρο, ακόμη κι αν υπάρχει μέσα του πολύ μικρό τμήμα του contrail. Υπάρχει συνεπώς μία μικρή τάση υπερεκτίμησης του μήκους.



Εικόνα 42: Κατανομή μηκών των εντοπισμένων contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016. Το κατώφλι των 50 εικονοστοιχείων ορίζεται στον αλγόριθμο, με στόχο την ελάττωση των σφαλμάτων.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Η Εικόνα 43 περιλαμβάνει τα ιστογράμματα με την κατανομή των μηκών των εντοπισμένων contrails την ημέρα και τη νύχτα. Εύκολα γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει κάποια αξιόλογη μεταβολή. Τόσο την ημέρα, όσο και τη νύχτα, τα περισσότερα contrails έχουν μήκος κοντά στο κατώφλι των 50 εικονοστοιχείων με το πλήθος τους να μειώνεται σταδιακά για μεγαλύτερα μήκη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας εντοπίζονται ελαφρώς περισσότερα contrails με μήκη κοντά στο ανώτερο όριο.

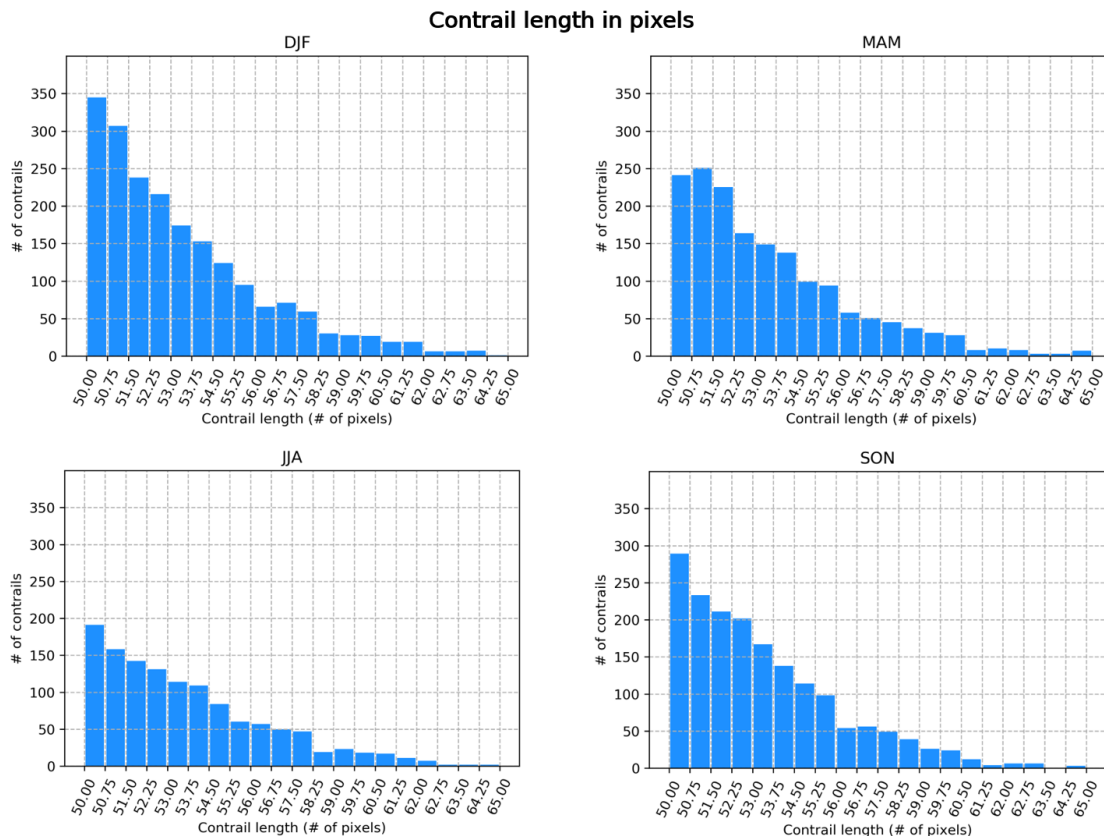


Εικόνα 43: Σύγκριση κατανομής μηκών των εντοπισμένων contrails την ημέρα (αριστερά) και τη νύχτα (δεξιά). Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Το μήκος των εντοπισμένων contrails μπορεί να εμφανίζει μεταβολές και ανάλογα με την εποχή. Αυτό εξετάζεται με τη βοήθεια της Εικόνας 44. Σε αυτή περιλαμβάνονται ιστογράμματα που δείχνουν την κατανομή των contrails ως προς το μήκος τους, για κάθε εποχή. Το πρώτο αποτέλεσμα που φαίνεται στην Εικόνα 44, είναι ότι σε όλες τις εποχές τα περισσότερα contrails έχουν μήκος κοντά στο κατώφλι των πενήντα εικονοστοιχείων. Ο αριθμός των contrails μειώνεται σταδιακά, όσο αυξάνεται το μήκος τους.

Τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, η προτίμηση στα μικρότερα μήκη είναι πιο εμφανής. Ιδιαίτερα το χειμώνα εμφανίζεται πιο απότομη μείωση του αριθμού των contrails με το μήκος. Η σταδιακή αυτή μείωση όσο αυξάνεται το μήκος, διακόπτεται και τις δύο εποχές στα μεγέθη από 56,75 έως 57,5 εικονοστοιχεία. Κατά τους μήνες της άνοιξης φαίνεται να εντοπίζονται περισσότερα contrails με μεγαλύτερα μήκη. Τέλος τους καλοκαιρινούς μήνες, προτιμώνται και πάλι τα μικρότερα μήκη.

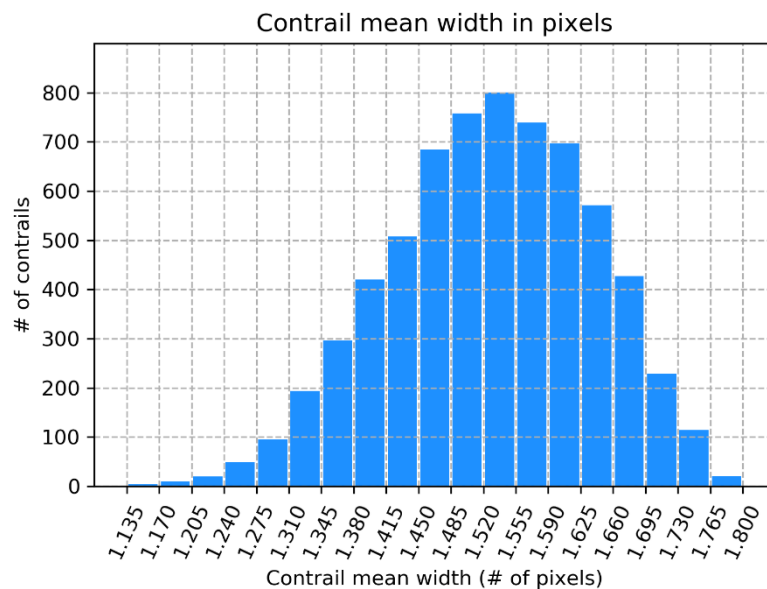


Εικόνα 44: Εποχιακή σύγκριση κατανομής μηκών των εντοπισμένων contrails στην περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

4.2.3. Μέσο πλάτος των contrails

Το μέσο πλάτος των contrails είναι μια ποσότητα που υπολογίζεται έμμεσα, από το μήκος και το εμβαδόν. Για αυτό και ονομάζεται μέσο πλάτος, καθώς θεωρείται ότι παραμένει σταθερό σε όλο το μήκος του contrail. Και σε αυτή την ποσότητα υπάρχουν οι ανάλογες πηγές σφαλμάτων, όπως και στο μήκος. Υπάρχει δηλαδή μία τάση για υπερεκτίμηση του πλάτους. Στην Εικόνα 45, παρατίθεται το ιστόγραμμα της κατανομής των εντοπισμένων contrails ως προς το μέσο πλάτος τους.

Το ιστόγραμμα μπορεί να προσεγγιστεί από την κανονική κατανομή. Τα περισσότερα contrails φαίνεται να έχουν ένα μέσο πλάτος περίπου από 1,45 έως 1,66 εικονοστοιχεία. Συνολικά το εύρος των μέσων πλατών των εντοπισμένων contrails κυμαίνεται από 1,135 έως 1,8 εικονοστοιχεία. Χρησιμοποιώντας και πάλι την παραδοχή ότι η εικόνα αποτελείται από τετράγωνα εικονοστοιχεία μεγέθους 4,5 km x 4,5 km, προκύπτει ότι τα περισσότερα contrails έχουν μέσο πλάτος περίπου 6,525 km έως 7,47 km. Συνολικά τα εντοπισμένα contrails έχουν μέσα πλάτη με εύρος 5,1075 km έως 8,1 km.



Εικόνα 45: Κατανομή των εντοπισμένων contrails ως προς το μέσο πλάτος τους. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

Τα υπολογισμένα μέσα πλάτη φαίνεται να είναι μεγάλα, όμοια με ότι συνέβη στα μήκη. Αυτό οφείλεται στους ίδιους παράγοντες. Αρχικά στην υπερεκτίμηση του αλγορίθμου και επιπλέον λόγω του δορυφόρου. Είναι αναμενόμενο το γεγονός να μη υπάρχουν πλάτη (όπως και μήκη) μικρότερα από ένα εικονοστοιχείο. Προκειμένου να

μπορεί να εντοπιστεί ένα οποιοδήποτε αντικείμενο θα πρέπει να έχει μέγεθος τουλάχιστον ίσο με το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Συνεπώς είναι λογικό να εντοπίζονται contrails με μέγεθος αρκετά μεγάλο. Από φυσικής απόψεως αυτό σημαίνει ότι πρόκειται για ώριμα contrails που έχουν διαχυθεί.

Όμοια με τις υπόλοιπες παραμέτρους, μελετήθηκε και η μεταβολή στο μέσο πλάτος των contrails από την ημέρα στη νύχτα και μεταξύ των εποχών. Προέκυψε ότι δεν υπάρχει κάποια αξιόλογη μεταβολή. Τα αντίστοιχα γραφήματα παρατίθενται στο Παράρτημα 6.2.

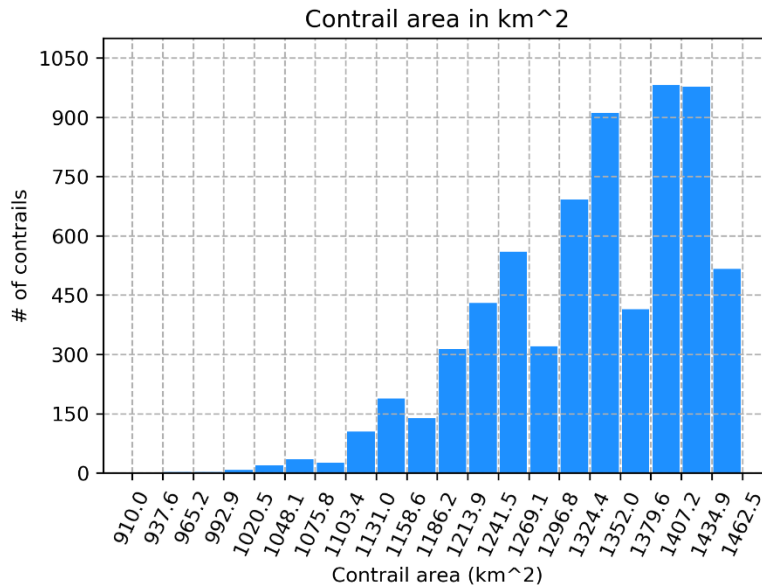
4.2.4. Εμβαδό των contrails

Στα προηγούμενα μελετήθηκαν οι κατανομές των εντοπισμένων contrails ως προς το μήκος και μέσο πλάτος τους. Γνωρίζοντας αυτά τα δύο χαρακτηριστικά για κάθε contrail, μπορεί να υπολογιστεί το εμβαδό του. Το εμβαδόν ενός εκάστοτε contrail είναι μία παράμετρος που καθορίζει την έκταση της περιοχής που καλύπτει και συνεπώς επηρεάζει. Ο υπολογισμός του εμβαδού των contrails γίνεται αρχικά σε αριθμό εικονοστοιχείων και μετατρέπεται έπειτα σε τετραγωνικά χιλιόμετρα. Αναλυτικά η διαδικασία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.

Στην Εικόνα 46, παρουσιάζεται το αντίστοιχο ιστόγραμμα με την κατανομή των contrails ως προς το εμβαδόν τους. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει ότι τα περισσότερα εντοπισμένα contrails, καλύπτουν μία έκταση από 1324 km² έως 1463 km² περίπου. Η κατανομή της Εικόνας 46, δεν είναι η άμεσα αναμενόμενη από τον συνδυασμό του μήκους με το μέσο πλάτος των contrails. Συνολικά το εύρος των εμβαδών των contrails είναι περίπου 993 km² έως 1463 km².

Παρά την γενικότερη τάση να αυξάνονται οι αριθμοί των contrails με το εμβαδόν, σε κάποιες κλάσεις εμφανίζονται λιγότερα contrails από ότι στις γειτονικές τους. Από φυσικής σημασίας το γεγονός αυτό είναι δύσκολο να εξηγηθεί. Πιθανόν πρόκειται για κάποιο μαθηματικό σφάλμα κατά τη διαδικασία εντοπισμού ή μετατροπών του τελικού εμβαδού των contrails.

Αναφορικά με τη σύγκριση της κατανομής των εμβαδών την ημέρα και τη νύχτα, και εποχιακά, αυτή πραγματοποιήθηκε χωρίς όμως να εντοπίζονται σημαντικές μεταβολές. Τα αντίστοιχα ιστογράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα 6.3.



Εικόνα 46: Κατανομή των εντοπισμένων contrails ως προς το εμβαδόν τους. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

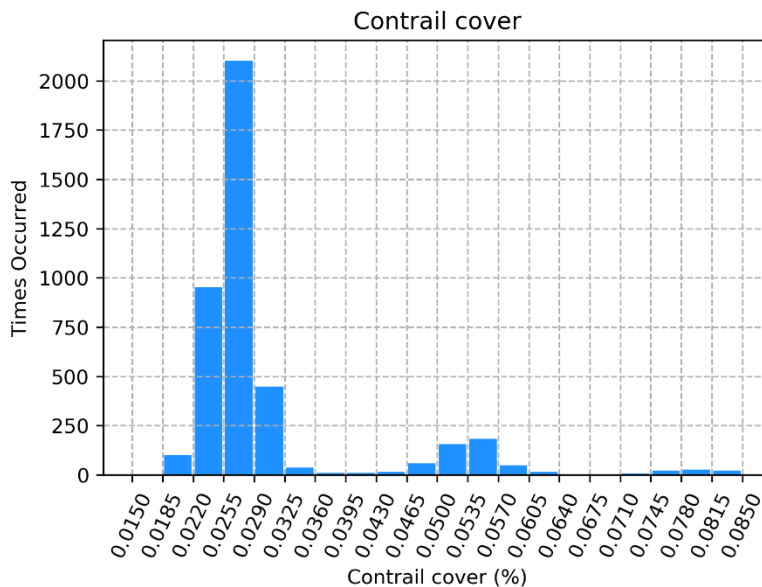
4.2.5. Κάλυψη της σκηνης από contrails

Η τελευταία παράμετρος που μελετάται σε αυτή την υποενότητα είναι η κάλυψη της σκηνης από contrails, δηλαδή το ποσοστό της περιοχής D01, που βρέθηκε να καλύπτεται από contrails, όταν αυτά εντοπίζονταν στη δορυφορική εικόνα. Η παράμετρος αυτή συνδυάζει τις περισσότερες από τις προηγούμενες και δίνει την πλήρη εικόνα για την συνολική έκταση της περιοχής που επηρεάζεται από τα contrails. Μπορεί να θεωρηθεί και ένα μέτρο που δείχνει πόσο σημαντική επίδραση έχουν τα contrails.

Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 47, φαίνεται η κατανομή των σκηνών ανάλογα με την κάλυψή τους από contrails. Η πλειονότητα των σκηνών (περισσότερες από 2000, σχεδόν 50% του συνόλου των σκηνών με τουλάχιστον ένα contrail) καλύπτονταν από contrails σε ποσοστό 0,0255 % – 0,029 % της έκτασής τους. Η μεγαλύτερη κάλυψη που εντοπίστηκε ήταν περίπου 0,085%.

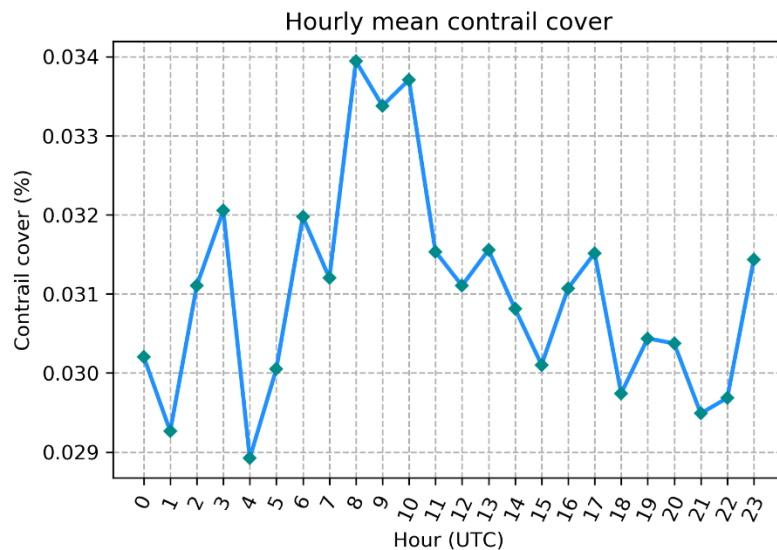
Συνολικά στο ιστόγραμμα μπορούν να εντοπιστούν τρεις ομάδες κάλυψης. Η πρώτη περιλαμβάνει τιμές κάλυψης σκηνης από 0,0185 % έως 0,036 %, η δεύτερη από

0,0465 % έως 0,0605 % και η τρίτη από 0,0745 % έως 0,085 %. Δεχόμενοι ότι το εμβαδό του εκάστοτε contrail, Εικόνα 46, είναι πολύ μικρό σε σχέση με την συνολική έκταση της περιοχής D01, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η πρώτη ομάδα αφορά σκηνές με ένα εντοπισμένο contrail, η δεύτερη με δύο και η τρίτη με τρία ή περισσότερα. Τα ποσοστά κάλυψης των σκηνών είναι αρκετά μικρά ως αριθμοί, όμως αφορούν μεγάλες εκτάσεις. Πιθανό αίτιο για τις μικρές τιμές είναι το γεγονός ότι ο αλγόριθμος έχει μια αδυναμία στον εντοπισμό συμπλεγμάτων contrail, contrail clusters. Από τα δεδομένα του Πίνακα VI, προκύπτει ότι κατά μέσο όρο εντοπίζονται 1,56 contrails ανά σκηνή, ενώ και κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης παρατηρήθηκε επίσης η αδυναμία στον εντοπισμό contrail clusters.

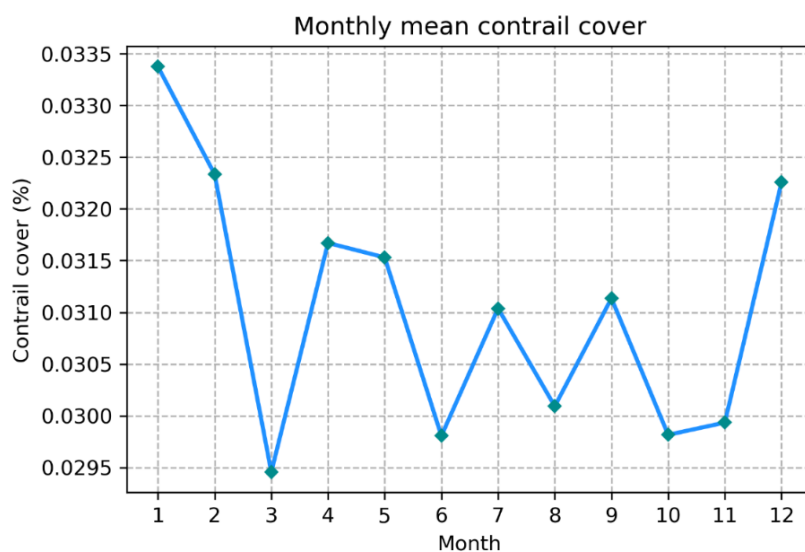


Εικόνα 47: Ιστογράμμα της κατανομής των δορυφορικών εικόνων με βάση την κάλυψή τους από contrails. Περιοχή D01, έτος 2016. Στον άξονα y παρουσιάζεται ο αριθμός των σκηνών – δορυφορικών εικόνων και στον άξονα x κλάσεις καλύψεων σκηνής. Για παράδειγμα βρέθηκαν περισσότερες από 2000 σκηνές με κάλυψη μεταξύ 0,0255 % και 0,029 %.

Στην Εικόνα 48, φαίνεται γραφική παράσταση με το ποσοστό κάλυψης της σκηνής ανάλογα με την ώρα. Παρατηρείται ότι τις ώρες 8 – 11 UTC, οι σκηνές έχουν μεγαλύτερη κάλυψη από contrails. Στην Εικόνα 49, παρουσιάζεται αντίστοιχο γράφημα με την κατανομή ως προς τον μήνα εντοπισμού. Παρατηρείται ότι τους χειμερινούς μήνες η κάλυψη είναι μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό πιθανόν προκύπτει λόγω του μεγαλύτερου αριθμού εντοπισμένων contrails το χειμώνα.



Εικόνα 48: Ποσοστό κάλυψης σκηνής ανάλογα με την ώρα εντοπισμού των contrails. Περιοχή D01, έτος 2016

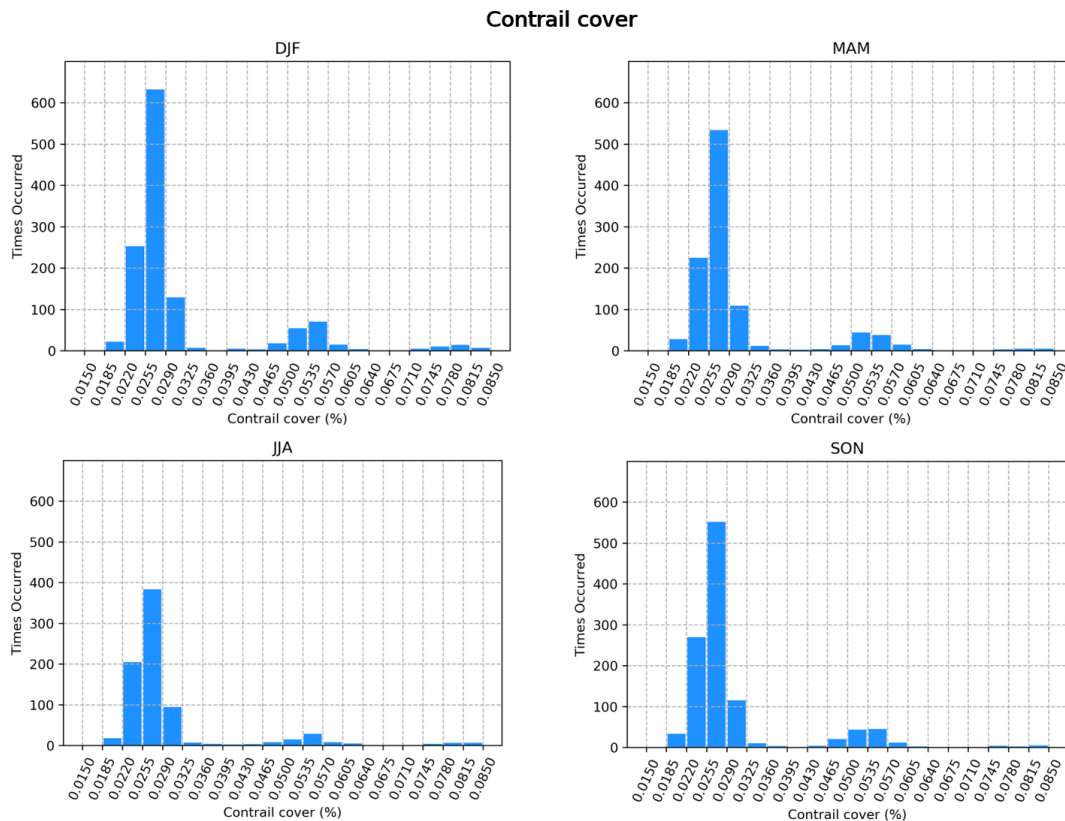


Εικόνα 49: Ποσοστό κάλυψης σκηνής ανάλογα με τον μήνα εντοπισμού των contrails. Περιοχή D01, έτος 2016

Όμοια με τις υπόλοιπες παραμέτρους και για την κάλυψη της σκηνής, μελετήθηκε η πιθανή αλλαγή συμπεριφοράς ανάμεσα στις σκηνές της ημέρας και της νύχτας. Δεν προέκυψε κάποια αξιόλογο αποτέλεσμα. Η κάλυψη της σκηνής από contrails φαίνεται να μην επηρεάζεται σημαντικά από την μετάβαση από τη μέρα στη νύχτα. Τα αντίστοιχα ιστογράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα 6.4.

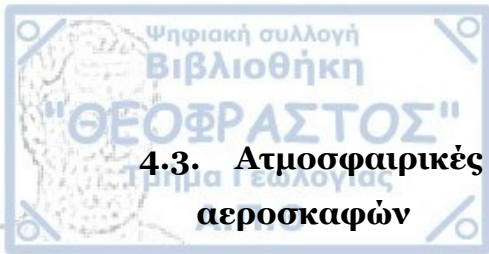
- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Τα ιστογράμματα της Εικόνας 50, προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων κάλυψης της σκηνής, με βάση την εποχή. Παρατηρείται ότι και τις τέσσερις εποχές, οι περισσότερες σκηνές έχουν κάλυψη από contrails, 0,022 % έως 0,0325 %. Επίσης και στις τέσσερις εποχές εντοπίζονται οι τρεις ομάδες στην κάλυψη σκηνής.



Εικόνα 50: Εποχιακή σύγκριση του ποσοστού κάλυψης της σκηνής από contrails. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

Η πρώτη ομάδα, η οποία θεωρείται ότι προκύπτει από σκηνές με ένα μόνο contrail, είναι όμοια σε όλες τις εποχές. Η δεύτερη ομάδα, που θεωρείται ότι προκύπτει από σκηνές με δύο εντοπισμένα contrails, έχει παρόμοια χαρακτηριστικά τις μεταβατικές εποχές, άνοιξη και φθινόπωρο. Αντίθετα τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες, εντοπίζονται κάποιες διαφορές. Τον χειμώνα φαίνεται να είναι πιο πολυπληθής η ομάδα αυτή, συνελπώς υπάρχουν περισσότερες σκηνές με μεγαλύτερη κάλυψη από contrails. Το καλοκαίρι αντιθέτως εντοπίζονται λιγότερες σκηνές σε αυτή την ομάδα κάλυψης. Όμως οι σκηνές αυτές αποτελούν μεγαλύτερο ποσοστό επί των συνολικών της εποχής. Τέλος η τρίτη ομάδα έχει και αυτή παρόμοια χαρακτηριστικά στις τέσσερις εποχές.



4.3. Ατμοσφαιρικές συνθήκες που ευνοούν την εμφάνιση ιχνών αεροσκαφών

Η σύγκριση ανάμεσα στη γεωγραφική κατανομή των contrails που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο και το χάρτη ροής της πραγματικής αεροπορικής κυκλοφορίας (Εικόνα 38 και Εικόνα 7 αντίστοιχα) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα contrails δεν εντοπίζονται μόνο σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα πτήσεων. Επομένως, αν και προφανώς είναι απαραίτητο να υπάρχουν αεροσκάφη για τον σχηματισμό των contrails, η σχέση τους δεν είναι απαραίτητα αναλογική σε όλη την έκταση της περιοχής. Μεγαλύτερη πυκνότητα πτήσεων δεν συνεπάγεται απαραίτητα περισσότερα contrails. Θα πρέπει συνεπώς να συντρέχουν άλλοι παράγοντες που ευνοούν ή αποτρέπουν τον σχηματισμό και τον εντοπισμό των contrails. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται με την κατάσταση της ατμόσφαιρας.

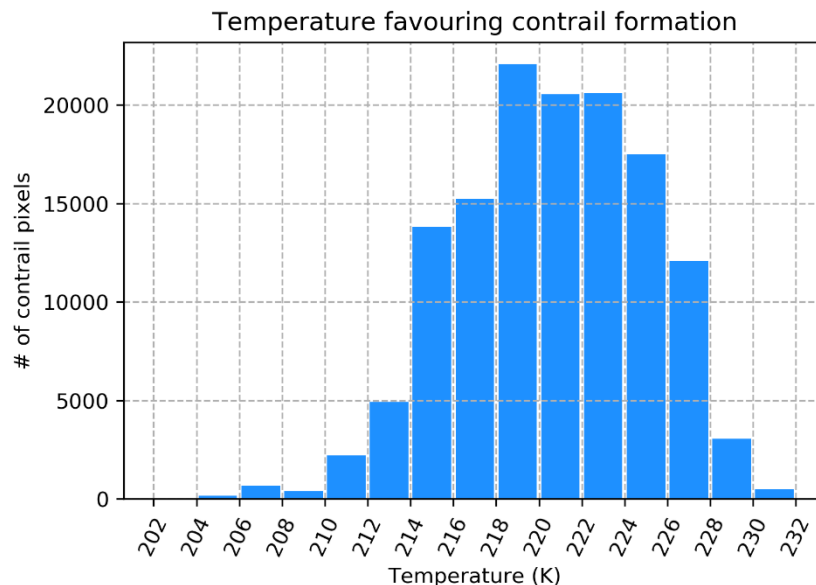
Παρακάτω θα μελετηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον εντοπισμό των τιμών κάποιων ατμοσφαιρικών παραμέτρων στα σημεία όπου εντοπίζονται contrails. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δύσκολο, έως απίθανο, τα δεδομένα reanalysis ERA5, να εντοπίσουν τα contrails, με βάση τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων. Επομένως αν και οι τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων υπολογίστηκαν στα σημεία και τις στιγμές που εντοπίζονταν contrails, θεωρείται ότι αποτυπώνουν την κατάσταση της ατμόσφαιρας ανεξάρτητα από την ύπαρξή τους. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι: Η θερμοκρασία, η σχετική και η ειδική υγρασία, η διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου. Αναλυτικά η διαδικασία εντοπισμού περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

4.3.1. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι η πρώτη ατμοσφαιρική παράμετρος που μελετάται. Καθότι τα contrails είναι τεχνητά νέφη, ο σχηματισμός τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία στο περιβάλλον από το οποίο διέρχεται το αεροσκάφος. Σε αντίθεση με τα φυσικά νέφη στα οποία απαιτείται άνοδος θερμής αέρας μάζας, τα αεροσκάφη εκλύουν θερμά αέρια απευθείας σε ψυχρό περιβάλλον. Η θερμοκρασία του αέρα στον οποίο εκλύονται τα καυσαέρια του αεροσκάφους είναι, συνεπώς, καθοριστικής σημασίας για τον σχηματισμό και τη διάρκεια ζωής των contrails.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Στο κεφάλαιο 3, αναφέρθηκε ότι για κάθε εικονοστοιχείο που αποτελούσε μέρος contrail, εντοπίστηκε η αντίστοιχη θερμοκρασία. Παρακάτω στην Εικόνα 51, δίνεται το ιστόγραμμα της κατανομής των εικονοστοιχείων ως προς τις θερμοκρασίες. Συνολικά προκύπτει ότι τα contrails εντοπίστηκαν σε περιβάλλοντα με θερμοκρασίες από 204 K έως 232 K (-69,15 °C έως -41,15 °C). Οι θερμοκρασίες αυτές είναι φυσιολογικές για το επίπεδο των 250 hPa, στο οποίο και έγινε η ανάλυση. Η κατανομή του ιστογράμματος μπορεί να προσεγγιστεί από την κανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κάποιες θερμοκρασίες οι οποίες ευνοούν περισσότερο τον σχηματισμό των contrails. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι από 218 K έως 226 K (-55,15 °C έως -47,15 °C). Το γεγονός ότι υπάρχουν κάποιες θερμοκρασίες στις οποίες εντοπίζονται περισσότερα contrails, είναι θετικό, καθώς σημαίνει ότι πράγματι υπάρχουν προτιμητέες ατμοσφαιρικές συνθήκες για τον σχηματισμό των contrails.

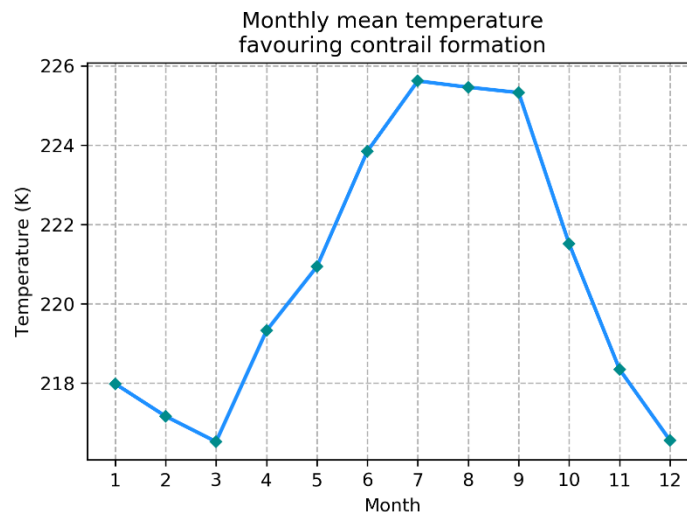


Εικόνα 51: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς τη θερμοκρασία τους. Έτος 2016, Περιοχή: D01.

Στην Εικόνα 52, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των μέσω τιμών της θερμοκρασίας των εικονοστοιχείων των contrails, για κάθε μήνα. Η γραφική παράσταση ακολουθεί την αναμενόμενη φυσική μεταβολή. Αύξηση της θερμοκρασίας τους καλοκαιρινούς μήνες και μείωση τους χειμερινούς. Το εύρος των θερμοκρασιών κυμαίνεται περίπου από 217 K έως 226 K (-56,15 °C έως -41,15 °C). Το εύρος αυτό μπορεί

να αντιστοιχηθεί με την περιοχή θερμοκρασιών στην οποία εντοπίζονται τα περισσότερα contrails, με βάση την Εικόνα 51.

Αντίστοιχο γράφημα με τις μέσες ωριαίες τιμές κατασκευάστηκε και παρατίθεται στο Παράρτημα 6.5. Δεν προσφέρει κάποια σημαντική πληροφορία, παρά μόνο το γεγονός ότι οι υπολογισμένες μέσες τιμές κυμαίνονται από 219 K έως 222 K (-54,15 °C έως -51,15 °C). Το εύρος αυτό αντιστοιχεί και πάλι στις θερμοκρασίες με τον μέγιστον αριθμό εντοπισμένων contrails.

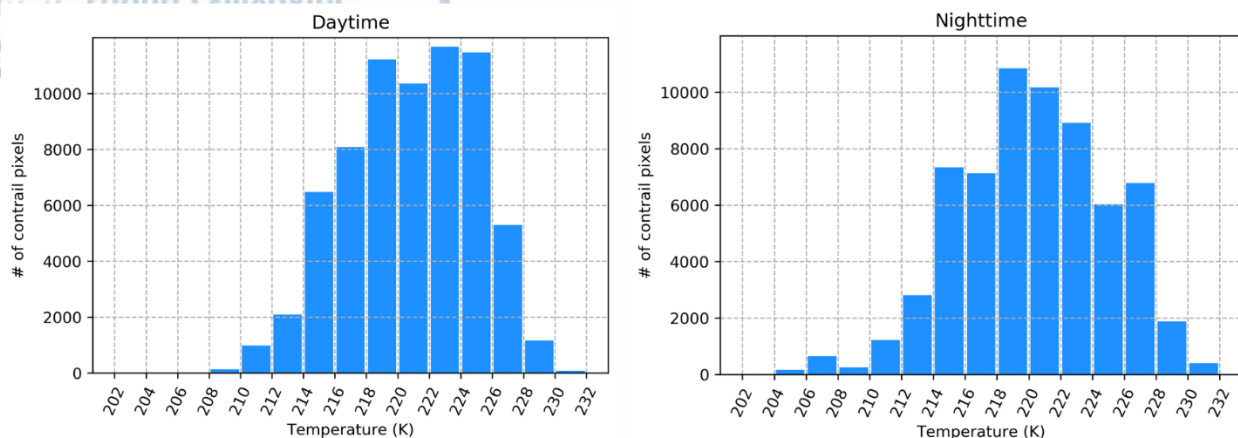


Εικόνα 52: Θερμοκρασία των εικονοστοιχείων των contrails. Μέσες μηνιαίες τιμές. Περιοχή Δο1, Έτος 2016.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Στην Εικόνα 53, παρουσιάζονται τα ιστογράμματα για την κατανομή ως προς τη θερμοκρασία των εικονοστοιχείων των contrails που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Και στις δύο κατανομές εμφανίζεται ένα μέγιστο στις θερμοκρασίες από 218 K έως 226 K (-55,15 °C έως -47,15 °C). Το γεγονός αυτό αποτελεί επιβεβαίωση των όσων αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ανεξάρτητα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο περιβάλλον, τα contrails σχηματίζονται στο ίδιο εύρος. Κατά τη διάρκεια της νύχτας εντοπίζονται contrails και σε θερμοκρασίες κάτω από 208 K (-65,15 °C), που είναι το κατώτερο όριο για την ημέρα. Αξιοσημείωτο όμως είναι ότι παρατηρούνται περισσότερα contrails σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 226 K (-41,15 °C) από ότι την ημέρα.

Temperature favoring contrail formation



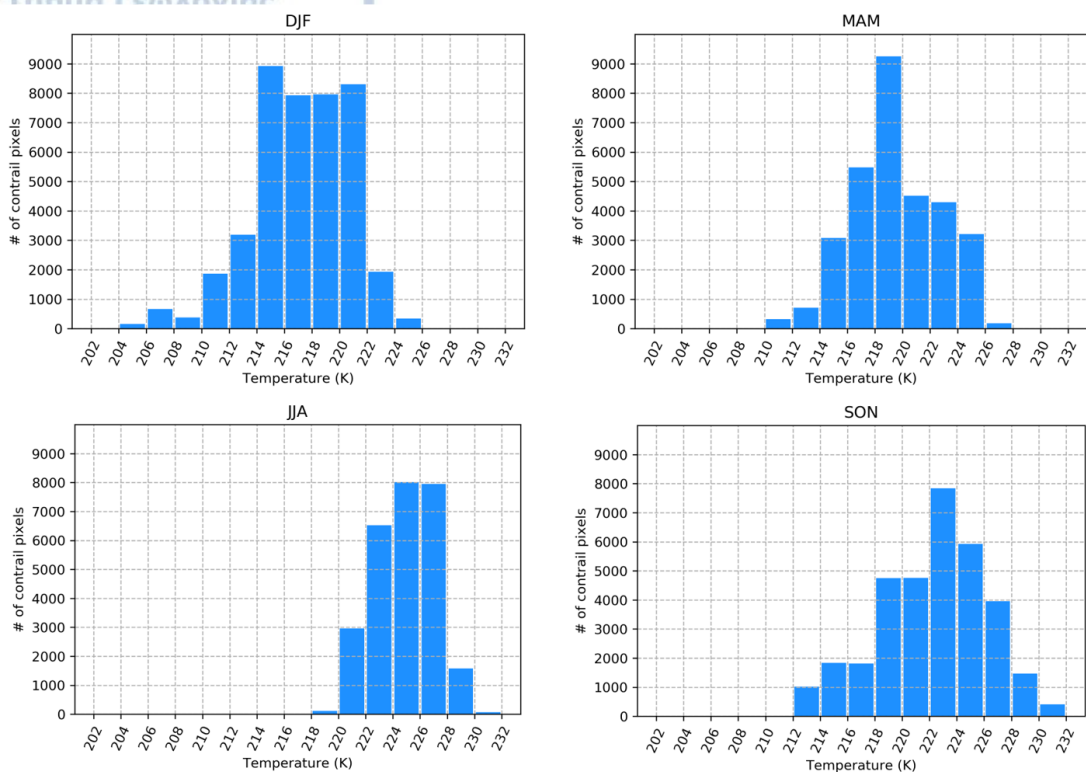
Εικόνα 53: Σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων με την θερμοκρασία τους ανάμεσα σε ημέρα (αριστερά) και νύχτα (δεξιά). Έτος 2016, Περιοχή D01.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η Εικόνα 54 περιλαμβάνει τις κατανομές των εικονοστοιχείων των contrails με βάση τη θερμοκρασία τους, για κάθε εποχή. Τα τέσσερα ιστογράμματα μπορούν εξ' όψεως να προσεγγιστούν από την κανονική κατανομή. Όπως είναι αναμενόμενο, το κέντρο της κατανομής το χειμώνα και την άνοιξη βρίσκεται σε μικρότερες θερμοκρασίες και αυξάνεται το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Από αυτά τα ιστογράμματα γίνεται εμφανές ότι οι προτιμητέες θερμοκρασίες για τα contrails ακολουθούν την εποχιακή μεταβολή.

Το χειμώνα παρατηρείται μία έντονη προτίμηση στον σχηματισμό των contrails σε θερμοκρασίες από 214 K έως 222 K (-59,15 °C έως -51,15 °C). Στην αντίστοιχη κατανομή για τους μήνες της άνοιξης υπάρχει μία ξεκάθαρη προτίμηση στον σχηματισμό των contrails στις θερμοκρασίες από 218 K έως 220 K (-55,15 °C έως -53,15 °C), δηλαδή σε μικρό εύρος θερμοκρασιών. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οι θερμοκρασίες αυξάνονται αρκετά. Πλέον το εύρος στο οποίο εντοπίζονται τα περισσότερα contrails είναι 222 K έως 228 K (-51,15 °C έως -45,15 °C). Τέλος από το ιστόγραμμα των φθινοπωρινών μηνών, φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες παραμένουν σχετικά υψηλές. Τα περισσότερα contrails, εντοπίζονται στο εύρος θερμοκρασιών από 218 K έως 226 K (-55,15 °C έως -47,15 °C), όμως η κατανομή έχει γενικά μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τις άλλες εποχές.

Temperature favoring contrail formation



Εικόνα 54: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς τη θερμοκρασία τους. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

Ανακεφαλαιώνοντας, και στις τέσσερις εποχές εντοπίζεται ένα εύρος θερμοκρασιών στο οποίο ευνοείται ο σχηματισμός – εντοπισμός των contrails. Το κέντρο αυτής της περιοχής θερμοκρασιών μεταφέρεται ελαφρά από εποχή σε εποχή, ακολουθώντας τη φυσική μεταβλητότητα. Παρά το γεγονός αυτό όμως, σε όλες τις εποχές – πλην του καλοκαιριού - το εύρος 218 K – 224 K (-55,15 °C έως -49,15 °C) περιέχει μεγάλο αριθμό contrails.

4.3.2. Σχετική Υγρασία

Η σχετική υγρασία είναι μία παράμετρος καίριας σημασία για τον σχηματισμό των contrails, όπως έγινε σαφές στο Κεφάλαιο 2. Η κατάσταση του κορεσμού ως προς την υγρή φάση αλλά και ως προς τον πάγο μπορεί να καθορίσει το αν θα σχηματιστεί contrail και ποια θα είναι η διάρκεια ζωής του.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

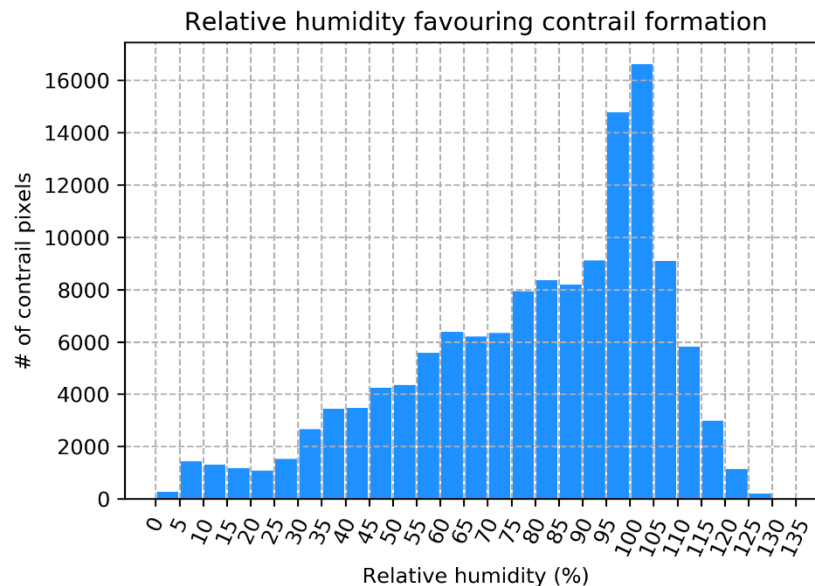
Στην Εικόνα 55 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails, ανάλογα με την επικρατούσα σχετική υγρασία. Ξεχωρίζει μια κορυφή στο σημείο κορεσμού και στις πρώτες τιμές υπερκορεσμού στην ατμόσφαιρα, δηλαδή στις σχετικές υγρασίες 100 % και λίγο πάνω από 100 %. Αυτό σημαίνει ότι όπως και στα φυσικά νέφη, τα contrails δημιουργούνται σε συνθήκες κοντά στον κορεσμό. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της σχετικής υγρασίας από 30 % έως και 105 %. Στην συνέχεια μειώνεται απότομα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν για τον σχηματισμό των contrails στο Κεφάλαιο 1.

Η ύπαρξη κορεσμού ως προς την υγρή φάση συνεπάγεται ότι οι υδρατμοί που εξέρχονται από τους κινητήρες του αεροσκάφους συμπυκνώνονται και στην συνέχεια επέρχεται παγοποίηση, συνδυάζοντας και τα αποτελέσματα από τις προτιμητέες θερμοκρασίες σχηματισμού των contrails. Ύπαρξη κορεσμού και υπερκορεσμού ως προς την υγρή φάση του νερού, συνεπάγεται και υπερκορεσμό ως προς τον πάγο, που με τη σειρά του σημαίνει ότι τα contrails μπορούν να διατηρηθούν για περισσότερη ώρα. Αυτό ακριβώς το γεγονός βοηθάει στο να εντοπιστούν και στις δορυφορικές εικόνες.

Πέραν της παραπάνω επεξήγησης, το μεγάλο ποσοστό εικονοστοιχείων με κορεσμό, μπορεί να βοηθιέται και από τον ίδιο τον αλγόριθμο εντοπισμού. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3, ο αλγόριθμος εντοπισμού, έχει False Alarm Ratio (FAR), δηλαδή αριθμό άκυρων συναγεργμών 15.517%. Αυτά τα αντικείμενα που εντοπίζει ο αλγόριθμος ως contrails, είναι στην πραγματικότητα άλλα νέφη, συνήθως cirrus. Τα νέφη αυτά για τον σχηματισμό τους απαιτούν μεγάλα ποσοστά υπερκορεσμού ως προς τον πάγο και συνεπώς καταστάσεις κοντά ή πάνω από τον κορεσμό και ως προς την υγρή φάση. Συνεπώς για την σχετική υγρασία, τόσο οι ορθοί όσο και πολλοί από τους λανθασμένους εντοπισμούς οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα και για αυτό η περιοχή κοντά στο $RH = 100 \%$ περιέχει τόσο μεγάλο αριθμό από contrails.

Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι σημαντικός αριθμός εικονοστοιχείων contrails, εντοπίζεται έως και τιμές σχετικής υγρασίας 30 %. Τα περιβάλλοντα αυτά, με βάση τη θεωρία, δεν θα έπρεπε να ευνοούν τον σχηματισμό contrails, ούτε και την διατήρησή τους, προκειμένου να αποκτήσουν επαρκές πλάτος για να είναι ανιχνεύσιμα από τον

δορυφόρο. Δύο είναι τα πιθανά αίτια που οδηγούν σε αυτή την κατανομή. Αρχικά είναι πιθανό να πρόκειται για contrails που σχηματίστηκαν σε κορεσμένο περιβάλλον και μεταφέρθηκαν λόγω του ανέμου σε ξηρότερο και δεν έχουν προλάβει να διαλυθούν πλήρως. Έπειτα είναι πιθανό να πρόκειται για σφάλμα του αλγορίθμου αυτόματου εντοπισμού, της διαδικασίας αντιστοίχισης δεδομένων ή και των ίδιων των δεδομένων ERA-5.



Εικόνα 55: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς τη σχετική υγρασία τους. Έτος 2016, Περιοχή: Δο1.

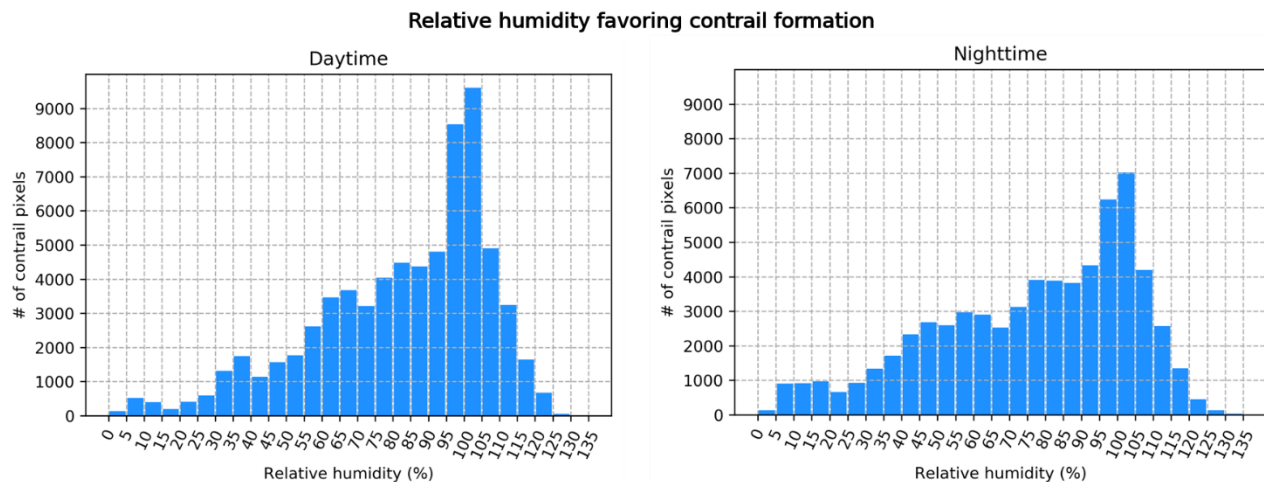
Στο Παράρτημα 6.6, παρατίθενται τα διαγράμματα με τις μέσες τιμές σχετικής υγρασίας στα εικονοστοιχεία των contrails ανάλογα με την ώρα και το μήνα. Από τα γραφήματα αυτά δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια σημαντική πληροφορία.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Από την έως τώρα ανάλυση έγινε φανερό ότι τα χαρακτηριστικά των contrails παραμένουν περισσότερο ή λιγότερο σταθερά και δεν επηρεάζονται από το αν είναι μέρα ή νύχτα. Στην Εικόνα 56, παρατίθενται τα ιστογράμματα με βάση τα οποία θα μελετηθεί η συμπεριφορά της σχετικής υγρασίας που ευνοεί την εμφάνιση των contrails την ημέρα και τη νύχτα.

Τα δύο ιστογράμματα και για αυτή την παράμετρο εμφανίζουν μικρές διαφορές. Κοινό στοιχείο είναι η ύπαρξη μίας έντονης κορυφής, η οποία βρίσκεται στις τιμές

κορεσμού. Τα περισσότερα contrails δηλαδή σχηματίζονται σε περιβάλλοντα με σχετική υγρασία 95 % έως 105 %, όπως είναι αναμενόμενο. Η κορυφή αυτή ήταν εμφανής και στο ιστόγραμμα της Εικόνας 55, όπου και αναλύθηκε σε βάθος. Και στις δύο κατανομές παρατηρείται ότι σχηματίζονται contrails και σε περιβάλλοντα με πολύ μικρότερα ποσοστά υγρασίας. Πιθανή εξήγηση για αυτό δόθηκε παραπάνω.



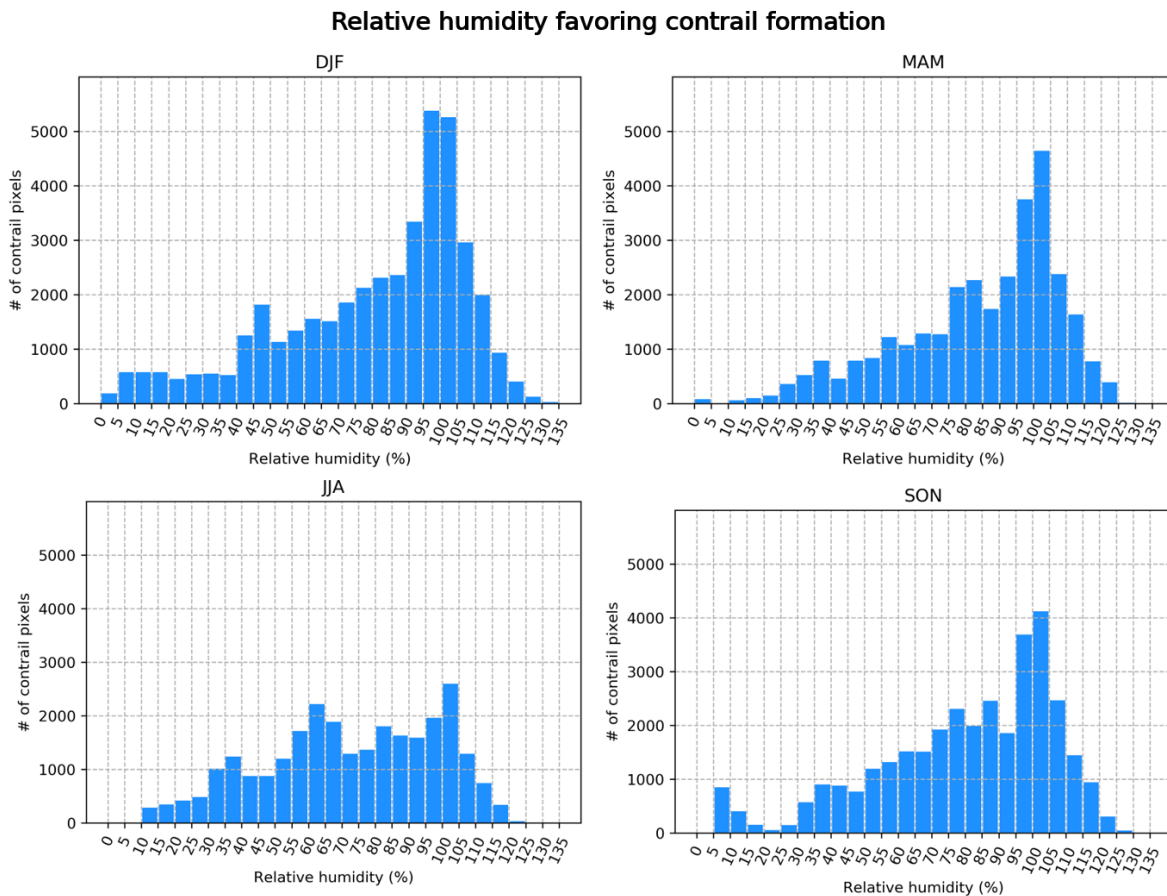
Εικόνα 56: Σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων με την σχετική υγρασία τους ανάμεσα σε ημέρα (αριστερά) και νύχτα (δεξιά). Έτος 2016, Περιοχή Do1.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Στην έως τώρα ανάλυση των αποτελεσμάτων, η μετάβαση από εποχή σε εποχή εμφάνιζε νέες πτυχές των contrails. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 57, η αλλαγή των εποχών επηρεάζει ελαφρά και την προτιμώμενη σχετική υγρασία εμφάνισης των contrails. Σε όλες τις εποχές εντοπίζεται ένα μέγιστο στον αριθμό εικονοστοιχείων των εντοπισμένων contrails, όμοια με τα προηγούμενα. Το μέγιστο αυτό, βρίσκεται σε τιμές σχετικής υγρασίας κοντά στο σημείο κορεσμού, 100 %. Κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ των κατανομών αποτελεί επίσης το γεγονός ότι ο αριθμός των εικονοστοιχείων των contrails μειώνεται απότομα για μεγάλες τιμές υπερκορεσμού, ενώ μειώνεται πιο ομαλά σε μικρές τιμές σχετικής υγρασίας. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς μεγάλες τιμές υπερκορεσμού ως προς την υγρή φάση συναντώνται πιο σπάνια στην ατμόσφαιρα.

Τους καλοκαιρινούς μήνες το μέγιστο των εντοπισμένων contrails σε συνθήκες κορεσμού δεν είναι τόσο έντονο, ενώ εμφανίζεται και ένα δευτερεύον μέγιστο σε τιμές

σχετικής υγρασίας 55% - 70%. Όμοια και το χειμώνα εμφανίζεται ένα δευτερεύον μέγιστο σε τιμές σχετικής υγρασίας 40% - 50%.



Εικόνα 57: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς τη σχετική υγρασία τους. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

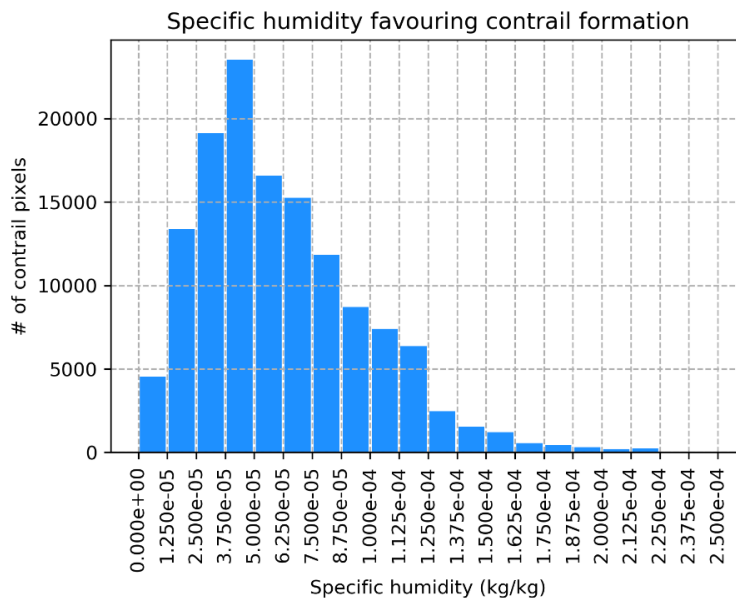
4.3.3. Ειδική υγρασία

Η ειδική υγρασία είναι ένας δείκτης του απόλυτου ποσού των υδρατμών που περιέχονται σε μία αέρια μάζα. Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των υδρατμών σε ένα πακέτο αέρα, προς τη συνολική μάζα αέρα του πακέτου.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 58, φαίνεται η κατανομή των εικονοστοιχείων των contrails με βάση την ειδική υγρασία τους. Από την εξέταση του ιστογράμματος προκύπτει ότι ο σχηματισμός των contrails ευνοείται σε περιβάλλοντα με μικρή ειδική

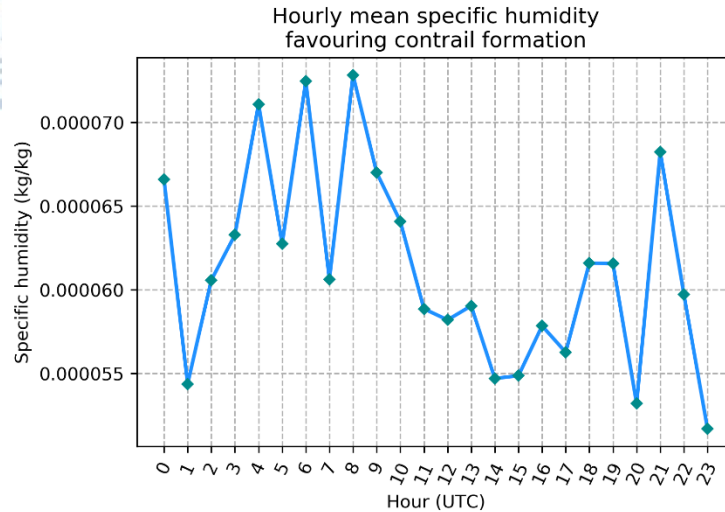
υγρασία. Ο μέγιστος αριθμός εικονοστοιχείων contrails εντοπίζεται για τιμές ειδικής υγρασίας 0,025 gr/kg – 0,05 gr/kg.



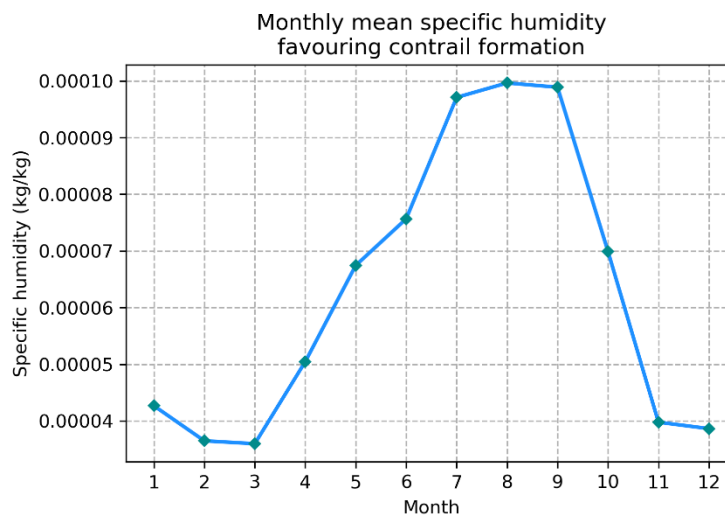
Εικόνα 58: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς την ειδική υγρασία τους. Έτος 2016, Περιοχή: Δο1.

Οι μικρές τιμές ειδικής υγρασίας που παρατηρούνται, οφείλονται σε φυσικά αίτια, καθώς στο επίπεδο των 250 hPa, δεν εντοπίζονται εν γένει υψηλές τιμές υδρατμών.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 59 και Εικόνα 60) παρατίθενται γραφήματα με τις μέσες ωριαίες και μέσες μηνιαίες τιμές αντίστοιχα, για την ειδική υγρασία. Από την Εικόνα 59, προκύπτει ότι στο χρονικό διάστημα 10 UTC έως 20 UTC, παρατηρείται μείωση στην ειδική υγρασία, και κατ'επέκταση στην ποσότητα υδρατμών, που απαιτείται για τον σχηματισμό των contrails. Συνολικά φαίνεται ότι τα contrails σχηματίζονται προτιμότερα στο εύρος ειδικής υγρασίας $5 \cdot 10^{-5}$ kg/kg έως $7 \cdot 10^{-5}$ kg/kg. Το αντίστοιχο γράφημα για τις μέσες μηνιαίες τιμές (Εικόνα 60) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η απαιτούμενη ειδική υγρασία για τον σχηματισμό contrails, είναι μεγαλύτερη από το Μάιο έως τον Οκτώβριο. Πιο συγκεκριμένα αυξάνεται απότομα τον Απρίλιο, μεγιστοποιείται του θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο), ενώ μειώνεται και πάλι απότομα μετά το Σεπτέμβριο. Η διαφορά στην ειδική υγρασία ανάμεσα σε καλοκαίρι και χειμώνα είναι αρκετά μεγάλη, σχεδόν μία τάξη μεγέθους. Εφόσον τα contrails σχηματίζονται υπό παρόμοιες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως προκύπτει από την έως τώρα ανάλυση, προκειμένου να επέλθει κατάσταση κορεσμού σε θερμότερο περιβάλλον, απαιτείται παρουσία μεγαλύτερης ποσότητας υδρατμών στην ατμόσφαιρα το καλοκαίρι.



Εικόνα 59: Ειδική υγρασία στα εικονοστοιχεία των contrails. Μέσες τιμές για κάθε ώρα. Περιοχή D01, Έτος 2016.



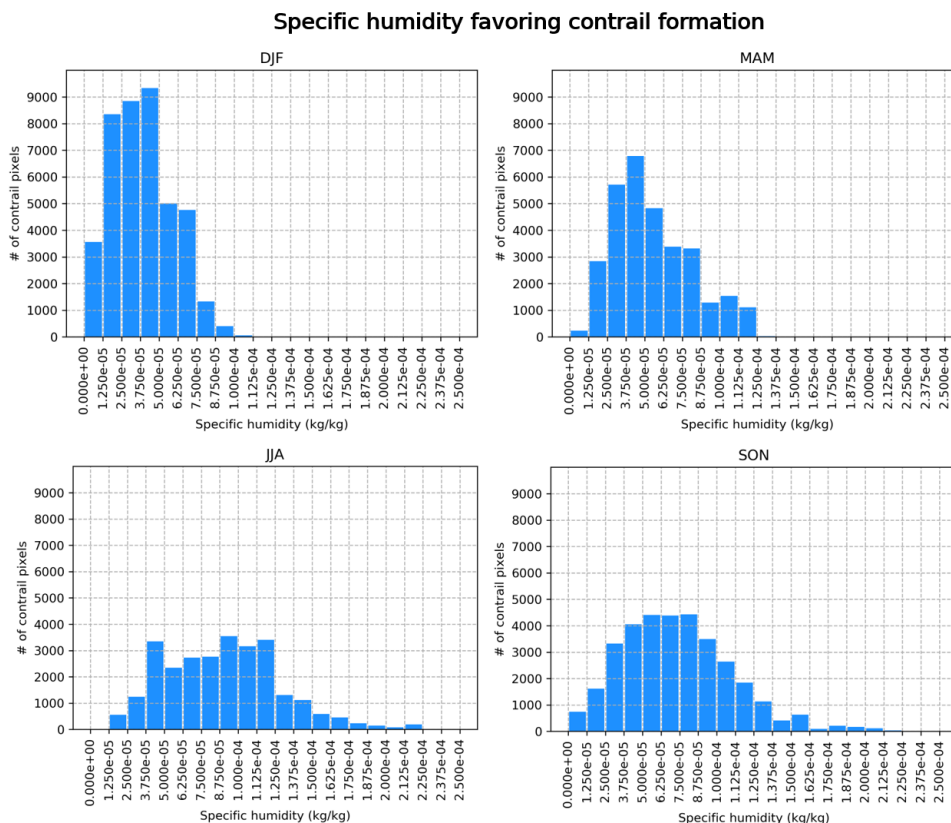
Εικόνα 60: Ειδική υγρασία στα εικονοστοιχεία των contrails. Μέσες τιμές για κάθε μήνα. Περιοχή D01, Έτος 2016.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Όμοια με τις υπόλοιπες μεταβλητές που αναλύθηκαν, έτσι και για την ειδική υγρασία εξετάστηκε η πιθανή μεταβολή της κατανομής ανάμεσα σε ημέρα και νύχτα. Δεν προέκυψε κάποιο αξιόλογο αποτέλεσμα. Τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα τα περισσότερα contrails σχηματίζονται σε μικρές τιμές ειδικής υγρασίας παρόμοιες μεταξύ τους. Τα αντίστοιχα γραφήματα για ημέρα και νύχτα παρατίθενται στο Παράρτημα 6.7.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η σύγκριση της ειδικής υγρασίας των εικονοστοιχείων των contrails ανάμεσα στις εποχές, παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τα ιστογράμματα με τις κατανομές της ειδικής υγρασίας κατά εποχή παρατίθενται στην Εικόνα 61. Σε όλες τις εποχές τα contrails φαίνεται να σχηματίζονται σε περιβάλλοντα με μικρές τιμές ειδικής υγρασίας. Ιδίως τους χειμερινούς μήνες οι τιμές της ειδικής υγρασίας είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Τις μεταβατικές εποχές, Άνοιξη και Φθινόπωρο, οι τιμές της ειδικής υγρασίας είναι ελαφρά μεγαλύτερες. Τέλος τους θερινούς μήνες οι τιμές ειδικής υγρασίας που παρατηρούνται είναι μεγαλύτερες, όπως έγινε εμφανές και στην Εικόνα 60 παραπάνω.



Εικόνα 61: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την ειδική υγρασία τους. Περιοχή ΔΟ1, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

4.3.4. Ζωνική συνιστώσα του ανέμου

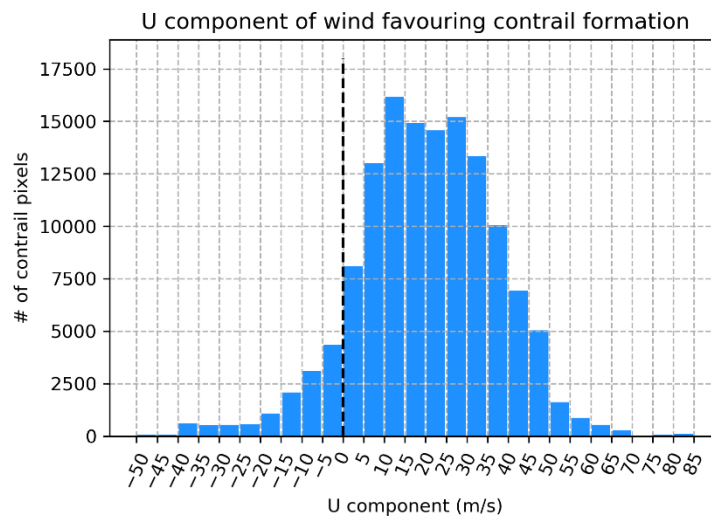
Ο άνεμος αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον σχηματισμό και την αποτροπή σχηματισμού φυσικών νεφών. Η διεύθυνση του ανέμου μπορεί για παράδειγμα να υποστηρίξει την ανάπτυξη νεφών σε κάποιες περιοχές, αν μεταφέρονται θερμές και υγρές αέρια μάζες. Όμοια η ταχύτητα του ανέμου δύναται να υποστέλλει τον σχηματισμό

νεφών αν είναι πολύ μεγάλη. Τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου στη βάση δεδομένων ERA5 είναι διαχωρισμένα σε δύο συνιστώσες. Την ζωνική U με διεύθυνση Δύσης - Ανατολής και τη μεσημβρινή V με διεύθυνση Νότου – Βορρά.

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της ζωνικής συνιστώσας του ανέμου, U. Η ταχύτητα μετριέται σε μονάδες m/s. Θετικές τιμές της συνιστώσας αυτής υποδεικνύουν άνεμο που πνέει προς Ανατολάς, δηλαδή είναι Δυτικός, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν άνεμο Ανατολικό, δηλαδή πνέει προς Δυσμάς.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Στην Εικόνα 62 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ανάλογα με την ταχύτητα της ζωνικής συνιστώσας του ανέμου. Η μορφή του ιστογράμματος μπορεί να προσεγγιστεί από την κανονική κατανομή. Το μέγιστό της βρίσκεται στις θετικές τιμές από 5 m/s έως 35 m/s. Σαν πρώτο αποτέλεσμα προκύπτει ότι τα contrails σχηματίζονται συχνότερα σε περιβάλλοντα με Δυτικό άνεμο. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων των contrails στα οποία επικρατεί Ανατολικός άνεμος είναι συγκριτικά πολύ μικρότερος. Αναφορικά με την ταχύτητα του ανέμου, τα περισσότερα εικονοστοιχεία εντοπίζονται να έχουν ζωνική συνιστώσα ανέμου μέτριας έντασης. Παρ' όλα αυτά φαίνεται να υπάρχει μεγάλο εύρος, καθώς σημαντικός αριθμός εικονοστοιχείων εντοπίζεται να έχει ισχυρούς ανέμους έως και 50 m/s.



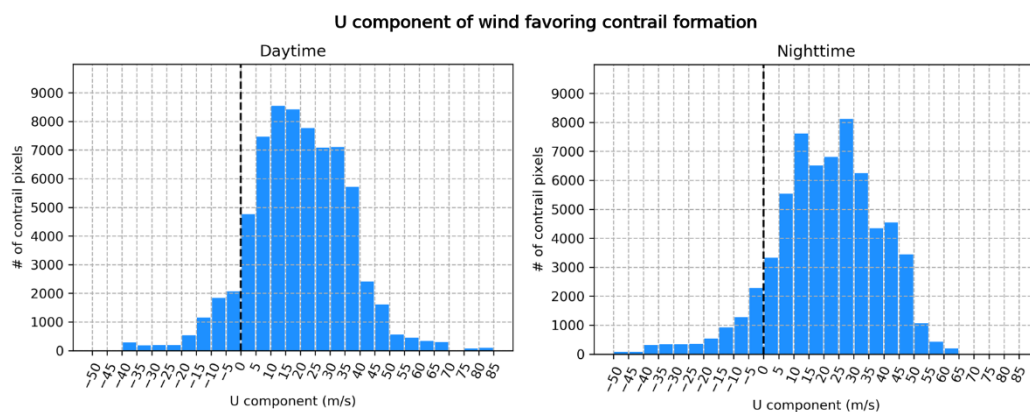
Εικόνα 62: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς την ζωνική (U) συνιστώσα του ανέμου. Έτος 2016, Περιοχή: D01.

Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εξηγηθούν από δύο οπτικές. Από τη μία στο επίπεδο των 250 hPa επικρατεί η γενική κυκλοφορία και συνεπώς είναι αναμενόμενο οι Δυτικοί άνεμοι να είναι πολύ πιο συχνοί. Από την άλλη συγκρίνοντας την Εικόνα 62, με την γεωγραφική κατανομή των contrails, Εικόνα 38, φαίνεται η προτίμηση των contrails να εμφανίζονται στα Δυτικά παράλια της Ευρώπης. Πιθανώς αυτό οφείλεται στη μεταφορά υγρών αερίων μαζών από τον Ατλαντικό.

Στο Παράρτημα 6.8 παρατίθενται δύο γραφήματα που αποδίδουν τις μέσες ωριαίες και μέσες μηνιαίες τιμές της U συνιστώσας του ανέμου. Για την ωριαία κατανομή προκύπτει ότι η ζωνική συνιστώσα του ανέμου δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ώρα της ημέρας. Οι τιμές έχουν εύρος περίπου μεταξύ 16 m/s και 28 m/s. Είναι δηλαδή Δυτικοί άνεμοι μέτριας έντασης. Η αντίστοιχη κατανομή ως προς τους μήνες έχει εύρος τιμών περίπου από 7,5 m/s έως 27,5 m/s.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

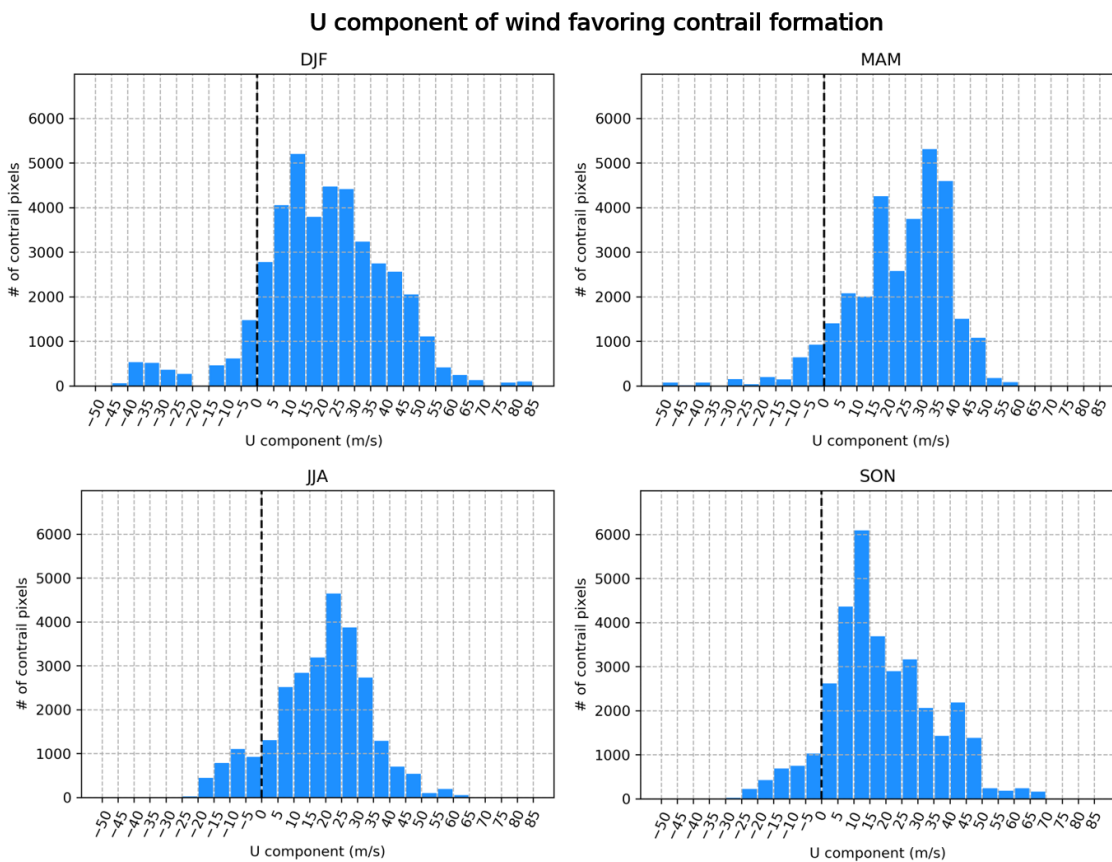
Η επόμενη εικόνα, Εικόνα 63, περιλαμβάνει δύο ιστογράμματα. Το ένα αφορά την κατανομή των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την ζωνική συνιστώσα της ταχύτητας την ημέρα και το άλλο αντίστοιχα τη νύχτα. Από τα δύο ιστογράμματα προκύπτει παρόμοια συμπεριφορά της ζωνικής συνιστώσας ημέρα και νύχτα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας εντοπίζονται ελαφρώς περισσότερα εικονοστοιχεία στις μεγάλες αρνητικές τιμές, δηλαδή ισχυρούς ανατολικούς ανέμους. Αντίθετα την ημέρα παρατηρούνται περισσότερα εικονοστοιχεία στις μεγάλες θετικές τιμές.



Εικόνα 63: Σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων με την ζωνική συνιστώσα του ανέμου ανάμεσα σε ημέρα (αριστερά) και νύχτα (δεξιά). Έτος 2016, Περιοχή D01.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η Εικόνα 64 περιλαμβάνει τέσσερα ιστογράμματα για την μελέτη της μεταβολής της ζωνικής συνιστώσας του ανέμου με την εποχή. Σε όλες τις εποχές προτιμητέος είναι ο δυτικός άνεμος, που αποτυπώνεται με θετικές τιμές ταχύτητας. Αναφορικά με την ταχύτητα του ανέμου σε αυτή τη διεύθυνση, τον χειμώνα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ταχύτητες και στις δύο φορές, δηλαδή ανατολικός και δυτικός άνεμος. Την άνοιξη εντοπίζονται αρκετά contrails με ισχυρούς ανατολικούς ανέμους. Οι παρατηρήσεις αυτές συνάδουν με την εποχική συμπεριφορά της γενικής κυκλοφορίας και της έντασης του αεροχειμάρρου. Το φθινόπωρο τα περισσότερα contrails εντοπίζονται όταν ο άνεμος έχει ένταση 5 m/s έως 15m/s, το χειμώνα και το καλοκαίρι με ελαφρά μεγαλύτερες εντάσεις 10 m/s έως 30 m/s, ενώ την άνοιξη παρατηρούνται ακόμη μεγαλύτερες εντάσεις περίπου 15 m/s έως 40m/s.



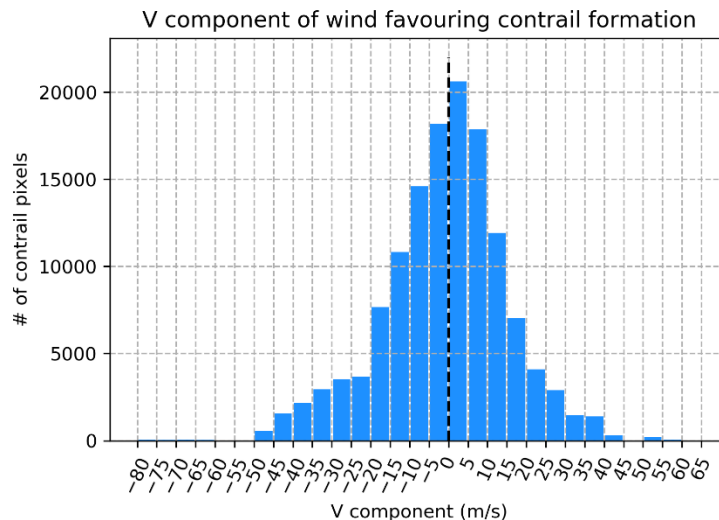
Εικόνα 64: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την ζωνική συνιστώσα του ανέμου. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

4.3.5. Μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου

Η μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου, V συνιστώσα, αφορά τη διεύθυνση Νότου – Βορρά. Θετικές τιμές της υποδηλώνουν άνεμο που πνέει προς το Βορρά, δηλαδή Νότιο άνεμο. Αντίθετα αρνητικές τιμές υποδηλώνουν άνεμο Βόρειο, δηλαδή που πνέει προς το Νότο.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Το ιστόγραμμα στην Εικόνα 65, αποδίδει γραφικά την κατανομή των εικονοστοιχείων των contrails, ανάλογα με την ταχύτητα της μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου. Σε αντίθεση με την ζωνική συνιστώσα, οι τιμές εδώ φαίνεται να είναι ισοκατανομημένες ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά, δηλαδή δεν υπάρχει προτιμητέα διεύθυνση. Αντιθέτως τα περισσότερα contrails σχηματίζονται όταν σε αυτή τη συνιστώσα οι άνεμοι είναι ασθενείς. Το μέγιστο των εντοπισμένων contrails βρίσκεται στο εύρος από -10 m/s (Βοριάς) έως 10 m/s (Νοτιάς).



Εικόνα 65: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς την μεσημβρινή (V) συνιστώσα του ανέμου. Έτος 2016, Περιοχή: D01.

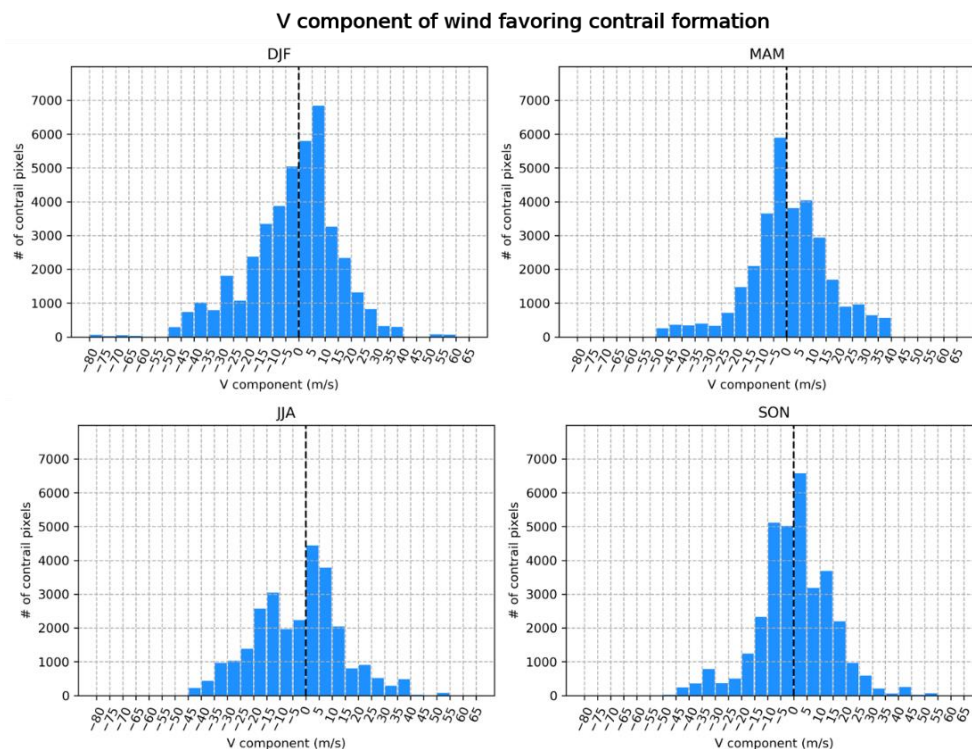
Στο παράρτημα 6.9 παρατίθενται τα γραφήματα με τις μέσες ωριαίες και μηνιαίες τιμές της μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου. Από τα γραφήματα αυτά δε μπορεί να εξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα. Επιβεβαιώνεται όμως το γεγονός ότι τα contrails σχηματίζονται συχνότερα, όταν σε αυτή τη διεύθυνση επικρατεί ασθενής άνεμος, ενώ δεν υπάρχει προτίμηση σε βόρεια ή νότια διεύθυνση. Τα αποτελέσματα αυτά, έρχονται και πάλι σε συμφωνία με την γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας σε αυτό το επίπεδο.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Η σύγκριση της μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου ανάμεσα σε contrails που εντοπίστηκαν ημέρα και νύχτα, δεν οδήγησε σε κάποια σημαντική διαφοροποίηση. Παρ' όλα αυτά, όμως, επιβεβαίωσε ακόμη μια φορά τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αντίστοιχα γραφήματα παρατίθενται στο Παράρτημα 6.9.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η εποχιακή σύγκριση της κατανομής των εικονοστοιχείων ως προς την μεσημβρινή συνιστώσα τους, οδηγεί σε κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Τους χειμερινούς μήνες, αν και παραμένει η ισοκατανομή των εικονοστοιχείων ανάμεσα στις θετικές και τις αρνητικές τιμές, εμφανίζεται μία προτίμηση στους ανέμους που πνέουν από τα Νότια. Παρόμοια προτίμηση εμφανίζεται και τους καλοκαιρινούς μήνες. Την άνοιξη αντίθετα παρατηρείται μία ελαφριά προτίμηση σε βόρειους ανέμους, ενώ το φθινόπωρο παραμένει η ισορροπία ανάμεσα στις δύο διευθύνσεις. Σε όλες τις εποχές είναι εμφανής η προτίμηση στο σχηματισμό των contrails με μικρές ταχύτητες ανέμου.



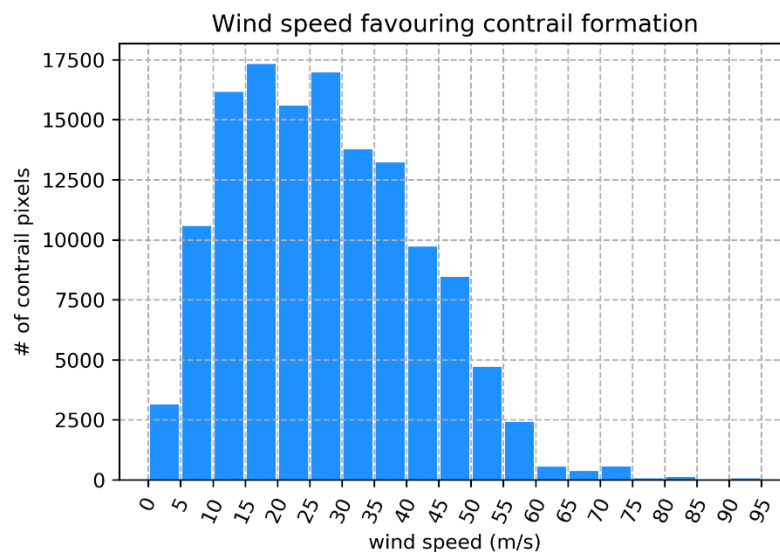
Εικόνα 66: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

4.3.6. Ολική ταχύτητα του ανέμου

Με βάση τις δύο συνιστώσες του ανέμου που δίδονται από τη βάση δεδομένων ERA-5, υπολογίστηκε η ολική ταχύτητα του ανέμου σε κάθε εικονοστοιχείο που ανήκει σε contrail. Αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ολικής ταχύτητας οδήγησαν στην κατασκευή του παρακάτω γραφήματος. Στο ιστόγραμμα της Εικόνας 67, φαίνεται η κατανομή των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την ολική ταχύτητα του ανέμου. Με βάση την μορφή του ιστογράμματος μπορεί να επιβεβαιωθεί και πάλι η προτίμηση του σχηματισμού των contrails σε περιβάλλοντα με μέτριες ταχύτητες ανέμου. Τα περισσότερα contrails εντοπίστηκαν σε περιβάλλοντα με ανέμους έντασης από 10 m/s έως 30 m/s.

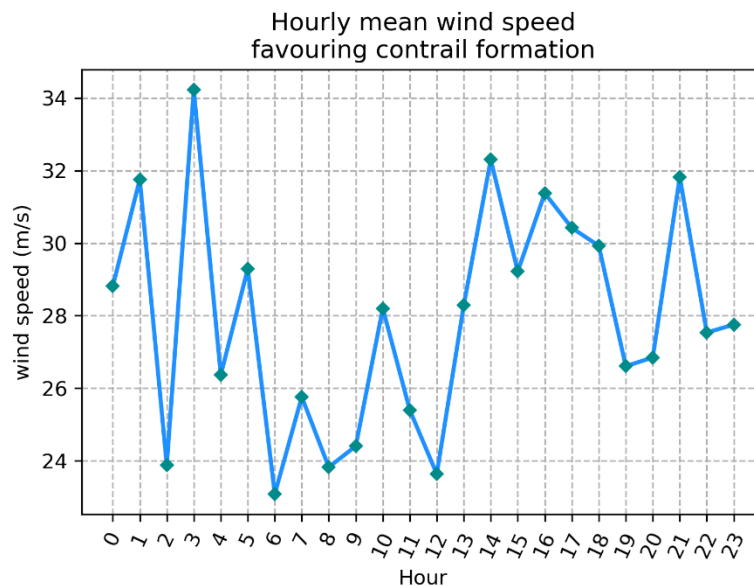


Εικόνα 67: Ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Έτος 2016, Περιοχή: D01.

Οι ταχύτητες του ανέμου που φαίνεται να υποστηρίζουν τον σχηματισμό των contrail, χαρακτηρίζονται ως μέτριες, θα πρέπει όμως να ληφθούν υπόψιν και άλλοι παράγοντες. Είναι άξιο αναφοράς ότι στο επίπεδο των 250 hPa είναι έντονη η επίδραση του αεροχειμάρρου και ιδιαίτερα στην περιοχή ενδιαφέροντος D01. Με δεδομένο ότι οι ταχύτητες του ανέμου στον αεροχειμάρρο είναι πολύ μεγαλύτερες (από 60m/s έως και

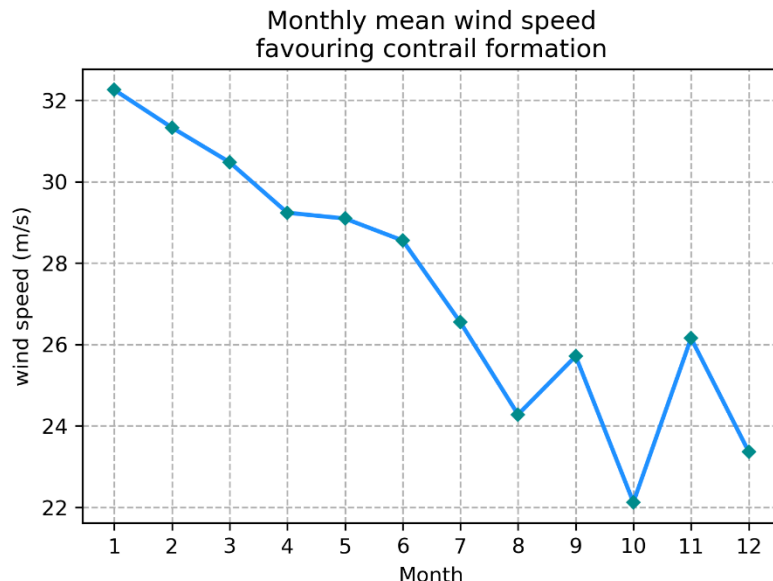
120 m/s), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα contrails δημιουργούνται σε συνθήκες χαμηλής -για την περιοχή – έντασης ανέμου. Ή αντίστροφα μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν σχηματίζονται contrails όταν ο άνεμος είναι ισχυρός.

Η γραφική παράσταση της Εικόνας 68 αποδίδει την μεταβολή των μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει αρχικά ότι η προτιμητέα ταχύτητα ανέμου για τον σχηματισμό contrails είναι περίπου 23 m/s έως 34 m/s, όπως άλλωστε αποδείχθηκε και στα προηγούμενα. Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι παρατηρείται μία μείωση στην ταχύτητα του ανέμου στο χρονικό διάστημα από 4 UTC έως 13 UTC.



Εικόνα 68: Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: Δο1, Έτος: 2016.

Στην Εικόνα 69, παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα, με την ενδοετήσια μεταβολή των τιμών της ταχύτητας του ανέμου. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται η σταδιακή μείωση της ταχύτητας του ανέμου από τον Ιανουάριο έως το τέλος του έτους. Αντίστοιχη μορφή παρατηρήθηκε και στα γραφήματα των μέσων μηνιαίων τιμών των δύο συνιστωσών της ταχύτητας.



Εικόνα 69: Μέσες μηνιαίες τιμές ταχύτητας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

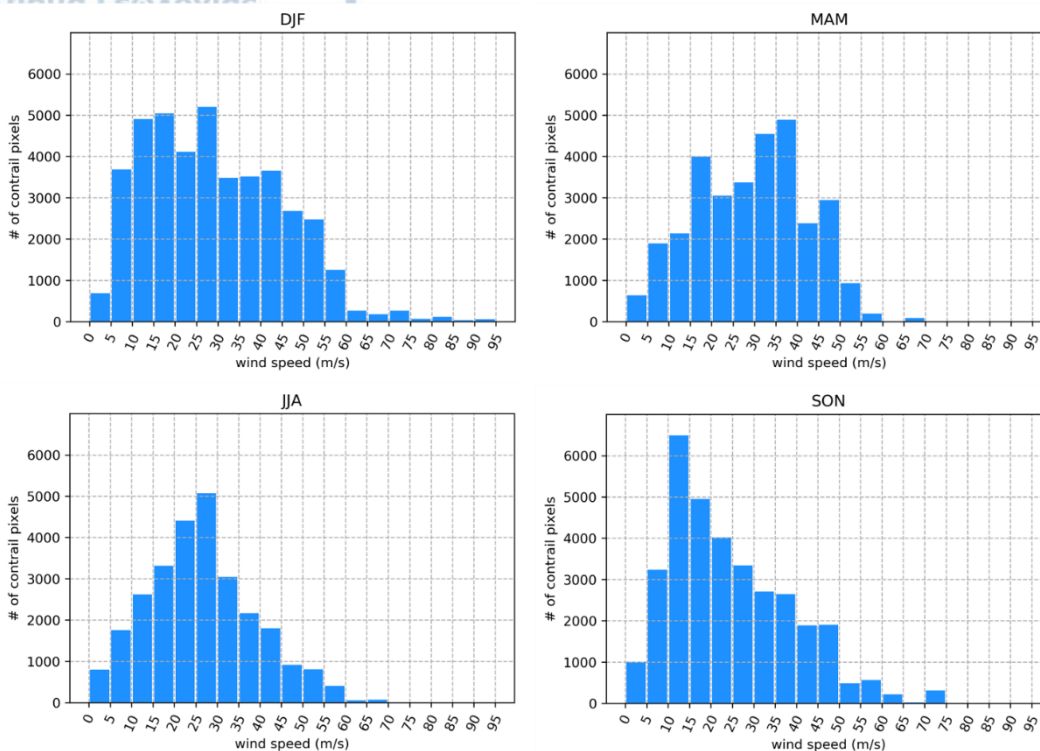
- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Η σύγκριση των κατανομών των εικονοστοιχείων με βάση την ταχύτητα του ανέμου την ημέρα και τη νύχτα, δεν οδήγησε σε κάποιο αξιόλογο αποτέλεσμα. Εντοπίζεται μόνο μία μικρή προτίμηση σε ελαφρά μεγαλύτερες ταχύτητες κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα αντίστοιχα γραφήματα δίδονται στο Παράρτημα 6.10.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η εποχιακή σύγκριση της κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails, ως προς την ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζεται στα ιστογράμματα της Εικόνας 70. Οι περισσότερες εποχές έχουν κοινά τα γενικά τους χαρακτηριστικά. Μόνο τους χειμερινούς μήνες εντοπίζεται μία διαφοροποίηση από τα όσα αναφέρθηκαν έως τώρα. Το χειμώνα παρατηρείται ότι αρκετά contrails εντοπίζονται και σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου που πλησιάζουν τις τιμές του αεροχειμάρρου στο κέντρο του οποίου παρατηρούνται άνεμοι περίπου 62m/s.

Wind speed favoring contrail formation



Εικόνα 70: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Περιοχή D01, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

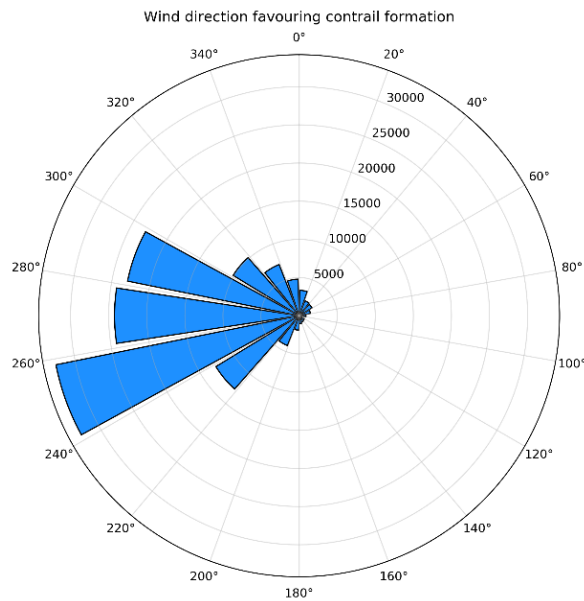
4.3.7. Διεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση πνοής του ανέμου είναι και αυτή μία ποσότητα που υπολογίστηκε από τις δύο συνιστώσες τους ανέμου που παρέχονται από την βάση δεδομένων ERA-5. Αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Από την ανάλυση των δύο συνιστωσών έχουν προκύψει ήδη κάποια αρχικά αποτελέσματα για τις διευθύνσεις πνοής του ανέμου που ευνοούν τον σχηματισμό των contrails. Παρακάτω θα γίνει μία συγκεντρωτική ανάλυση.

- Αποτελέσματα επί του συνόλου των δεδομένων

Στην Εικόνα 71, παρουσιάζεται ιστόγραμμα με την κατανομή των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την διεύθυνση του ανέμου, σε πολικούς άξονες. Όπως είχε αναφερθεί και κατά την ανάλυση των συνιστωσών του ανέμου, είναι εμφανής η προτίμηση των contrails να σχηματίζονται όταν επικρατεί Δυτικός άνεμος. Πιο συγκεκριμένα τα περισσότερα contrails εντοπίζονται όταν ο άνεμος πνέει από τις 240°

έως τις 260°, δηλαδή είναι Δ – ΝΔ. Στις διευθύνσεις από 0° έως 200° εντοπίζεται πολύ μικρός αριθμός contrails.

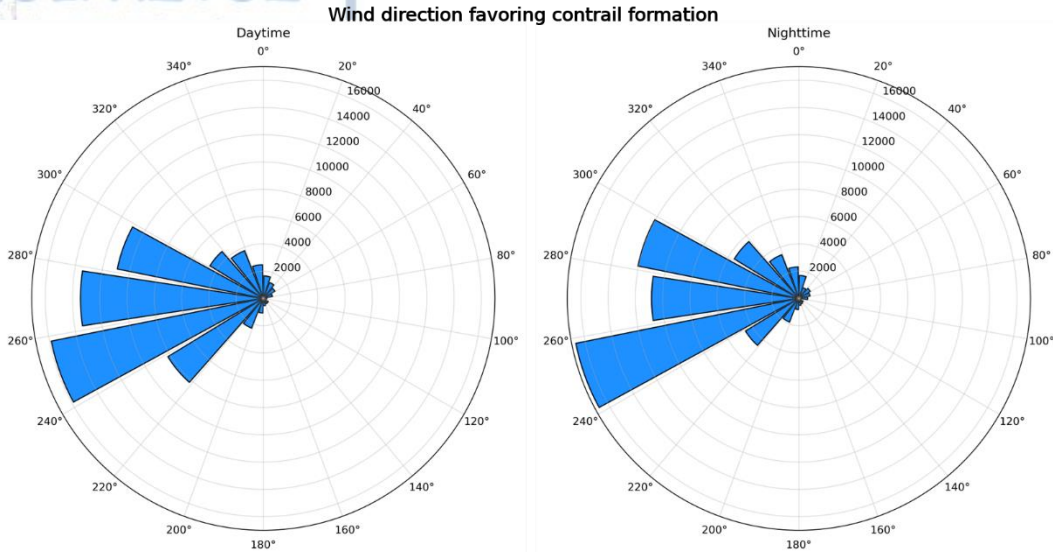


Εικόνα 71: Πολικό ιστόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου. Περιοχή: ΔΟ1, Έτος: 2016.

Όπως είχε σημειωθεί και στα προηγούμενα το αποτέλεσμα αυτό έχει διπλή σημασία. Από τη μία οι δυτικοί άνεμοι εντοπίζονται συχνότερα από φυσικά αίτια, καθώς ακολουθούν την γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Από την άλλη οι Δυτικοί άνεμοι ευνοούν τον σχηματισμό των contrails καθώς μεταφέρουν υγρές μάζες από τον Ατλαντικό. Στο Παράρτημα 6.11 παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα σε κάθετους άξονες. Επιπλέον δίδονται τα γραφήματα με τις μέσες ωριαίες και μέσες μηνιαίες τιμές. Δεν παρουσιάζονται αναλυτικά, καθώς δεν προσφέρουν κάποια αξιολογη πληροφορία.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Η σύγκριση μεταξύ της κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails που εντοπίστηκαν την ημέρα σε σχέση με αυτά που εντοπίστηκαν νύχτα, ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 72. Τα δύο ιστογράμματα είναι όμοια, καθώς αποδίδουν και τα δύο το μεγαλύτερο αριθμό εντοπισμένων contrails σε ανέμους διευθύνσεων από 240° έως 300°, δηλαδή από τα ΝΔ. Τη διάρκεια της νύχτας αυξάνονται ελαφρά τα εντοπισμένα contrails στο άνω όριο του ανωτέρω εύρους, δηλαδή στις 280° έως 300°.



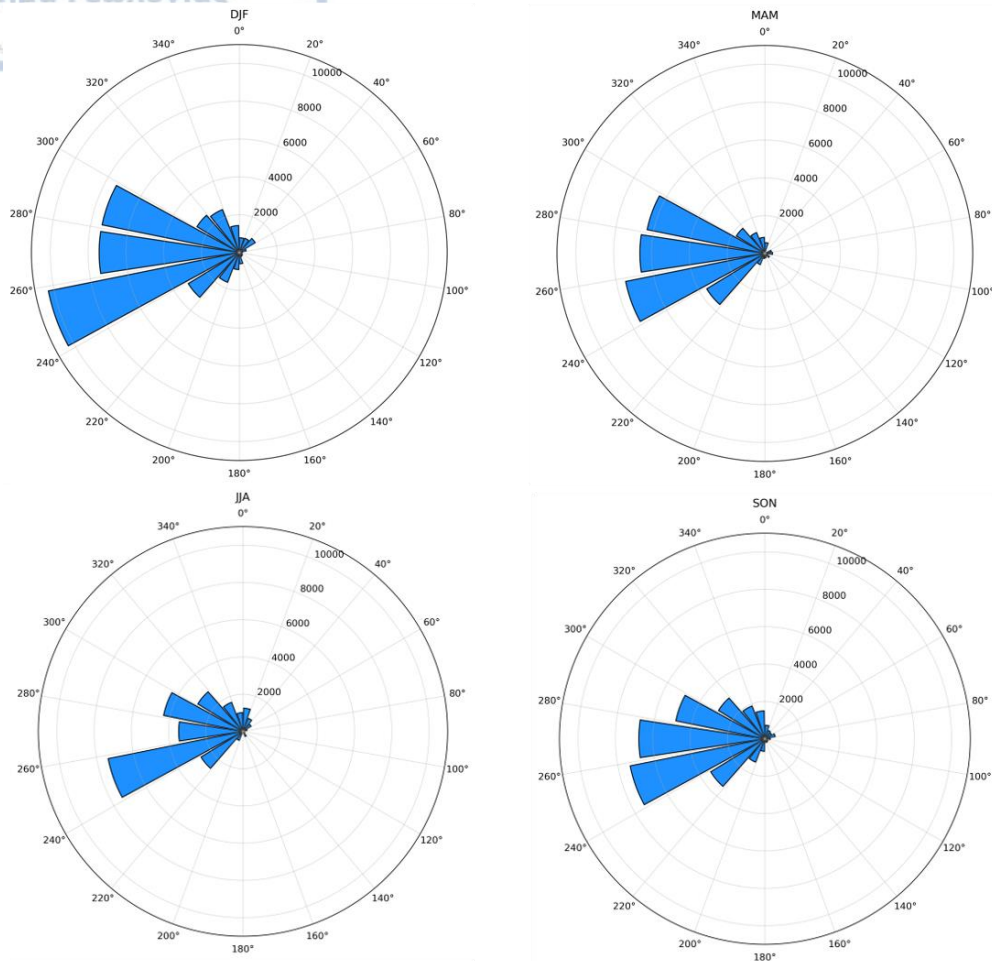
Εικόνα 72: Σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων με την διεύθυνση του ανέμου ανάμεσα σε ημέρα (αριστερά) και νύχτα (δεξιά). Έτος 2016, Περιοχή D01.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Η εποχιακή ανάλυση, όπως και στις προηγούμενες παραμέτρους, έτσι και στην διεύθυνση του ανέμου, δίνει ενδιαφέροντα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στα ιστογράμματα της Εικόνας 73. Σε όλες τις εποχές παρατηρείται μία σαφής προτίμηση στον σχηματισμό των contrails όταν πνέουν δυτικοί άνεμοι. Το χειμώνα τα περισσότερα contrails σχηματίζονται με ανέμους 240° έως 260°, δηλαδή ΔΝΔ. Αυτή είναι η προτιμητέα διεύθυνση και τους καλοκαιρινούς μήνες. Μάλιστα το καλοκαίρι η προτίμηση αυτή είναι ακόμη πιο έντονη. Τις μεταβατικές εποχές, άνοιξη και φθινόπωρο, συνεχίζει να επικρατεί η δυτική διεύθυνση του ανέμου, παρατηρούνται όμως αρκετά εικονοστοιχεία και σε διευθύνσεις πιο βόρειες, μέχρι το 300°.

Στο παράρτημα 6.11, παρατίθενται τα αντίστοιχα ιστογράμματα για τις κατανομές των εικονοστοιχείων ως προς τη διεύθυνση του ανέμου και σε κάθετες συντεταγμένες. Τέλος στο παράρτημα 6.12 παρατίθενται τα αντίστοιχα ροδογράμματα στα οποία συνδυάζεται σε πολικούς άξονες η πληροφορία τόσο για την διεύθυνση όσο και για την ταχύτητα του ανέμου.

Wind direction favoring contrail formation



Εικόνα 73: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την διεύθυνση του ανέμου. Περιοχή Δο1, Έτος: 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

4.4. Μελέτη περίπτωσης

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται μία μελέτη περίπτωσης. Γίνεται δηλαδή μια πιο εκτενής και πολύπλευρη ανάλυση μίας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής. Η σκηνή που επιλέχθηκε είναι στις 11/08/2016 και ώρα 06:00 UTC. Η σκηνή αυτή εντοπίστηκε κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης. Ξεχωρίζει στην βάση δεδομένων, καθώς παρατηρείται σε αυτή μία εκτενής περιοχή με πολύ μεγάλη συγκέντρωση από contrails στην Κεντρική και ΒΔ Γαλλία. Με βάση την γεωγραφική κατανομή των contrails (Εικόνα 38), δεν ευνοείται γενικά ο εντοπισμός τους στην εν λόγω περιοχή. Αρχικά θα αναλυθούν εικόνες από τα βασικά κανάλια του SEVIRI, και στη συνέχεια κάποιες χρωματικές συνθέσεις καναλιών, RGB.

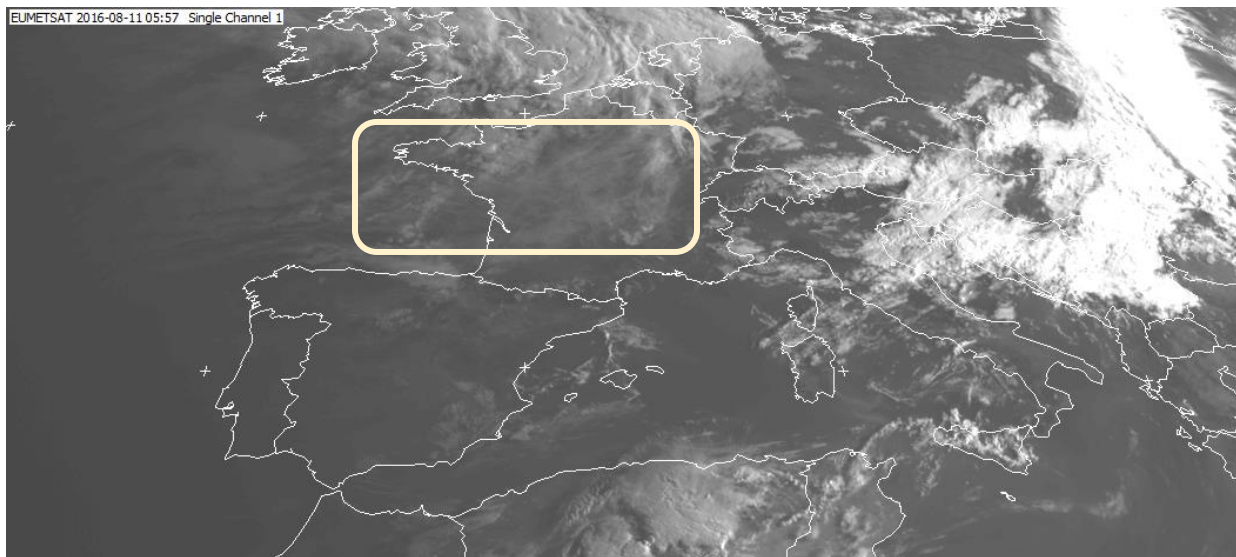
Τα κανάλια Ch1 0.6μm, Ch2 0.8μm και Ch3 1.6μm, του SEVIRI, χαρακτηρίζονται ως ηλιακά κανάλια, καθώς σε αυτά τα μήκη κύματος από το ραδιόμετρο ανιχνεύεται μόνο η μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τη Γη και την ατμόσφαιρά της. Στις Εικόνα 74 και Εικόνα 75 παρατίθενται εικόνες από το κανάλι 1, Ch1 0.6μm, του SEVIRI για τις χρονικές στιγμές 06:00 UTC και 07:00 UTC αντίστοιχα. Η έξαρση των contrails είναι μεγαλύτερη στις 06:00 UTC, όμως σε αυτή τη χρονική στιγμή δεν έχει ανατείλει ο ήλιος σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος, πράγμα απαραίτητο για τα «ηλιακά» κανάλια. Έτσι για καλύτερη ερμηνεία της κατάστασης της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιείται και η εικόνα στις 07:00 UTC, όπου υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ, παραμένει μεγάλος και ο αριθμός των ορατών contrails.

Με έντονο λευκό χρώμα στις εικόνες του καναλιού 1, αποτυπώνονται τα νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος. Με παρόμοιο χρώμα, ελαφρά πιο έντονο, αποδίδονται περιοχές στην επιφάνεια της γης καλυμμένες από χιόνι. Με ελαφρές αποχρώσεις του γκρι αποτυπώνονται τα νέφη με μικρό οπτικό πάχος -διάφανα νέφη-. Τέλος με σκούρο γκρι αποδίδεται η επιφάνεια της γης και με μαύρο η θάλασσα. Στις εικόνες 74 και 75 εντοπίζεται με λευκό χρώμα μια εκτενής περιοχή με νέφη μεγάλου οπτικού πάχους στα Δυτικά. Νέφη με παρόμοια χαρακτηριστικά εντοπίζονται και στην Βόρεια Αφρική στην Περιοχή της Αλγερίας. Το σχήμα των νεφών στην περιοχή αυτή, η θερινή εποχή και το

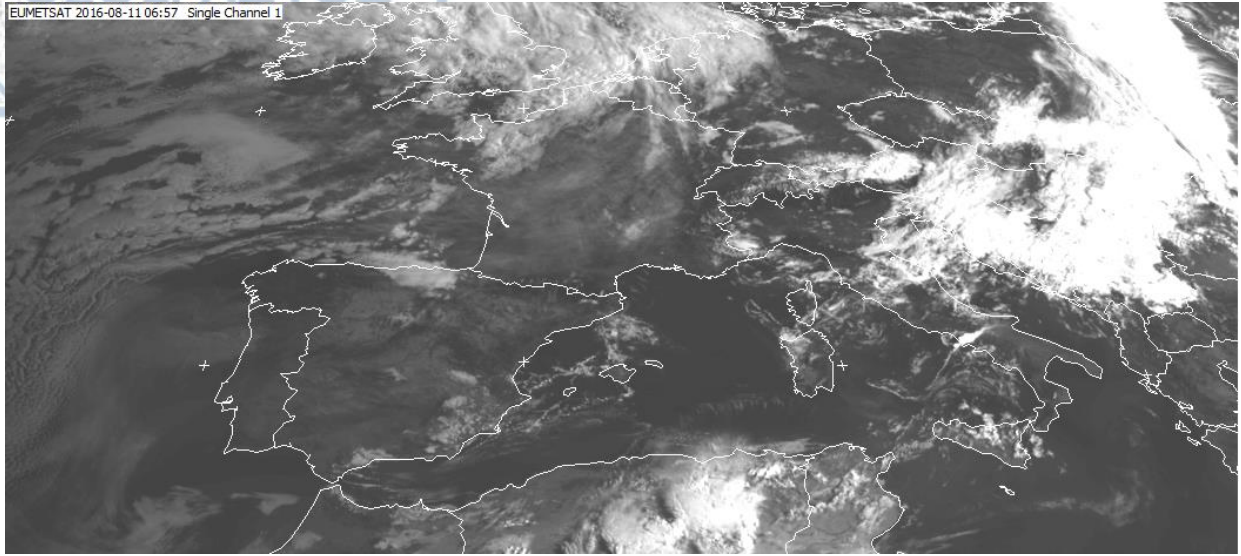
έντονο λευκό χρώμα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πιθανότατα πρόκειται για καταιγιδοφόρα νέφη.

Η βόρεια Ευρώπη και η Μεγάλη Βρετανία, καλύπτονται επίσης από φωτεινά λευκά νέφη, όχι όμως τόσο έντονα. Στη βόρεια Γαλλία παρατηρείται μία μετάβαση πηγαίνοντας Νότια, από λευκά σε γκριζα νέφη. Τα γκριζα αυτά νέφη έχουν μικρότερο οπτικό πάχος. Σε εκείνη την περιοχή της Κεντρικής και Βόρειας Γαλλίας και στο Βισκαϊκό κόλπο, εντοπίζεται η έξαρση των contrails. Ακόμη και σε αυτές τις εικόνες μπορούν να παρατηρηθούν κάποια γραμμικά contrails που ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα νέφη της περιοχής. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι τα contrails είναι τεχνητά νέφη με μικρό οπτικό πάχος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα contrails είναι λεπτά νέφη.

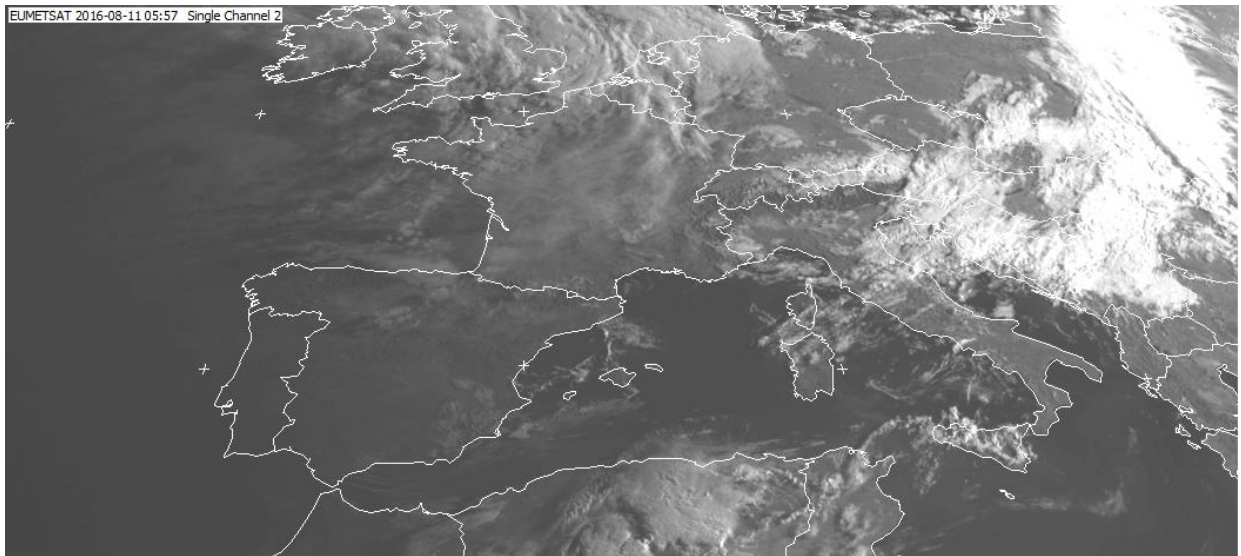
Οι εικόνες του καναλιού 2, Ch2 0.8 μm , είναι παρόμοιες με αυτές του καναλιού 1. Στο κανάλι 2 αποτυπώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα στοιχεία της επιφάνειας της γης, όμως δεν αποτυπώνονται τόσο καλά τα διάφανα νέφη. Συνεπώς δεν είναι τόσο εμφανή και τα contrails, τα οποία έχουν μικρό οπτικό πάχος. Οι αντίστοιχες εικόνες του καναλιού 2, δίδονται παρακάτω (Εικόνα 76, Εικόνα 77). Σε αυτές φαίνεται ότι τα νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος δεν διαφέρουν από τις εικόνες του καναλιού 1. Αντίθετα φαίνονται περισσότερες λεπτομέρειες στην επιφάνεια, όπως για παράδειγμα οι Άλπεις και δεν είναι τόσο ευδιάκριτα τα contrails στην Κεντρική και Βόρεια Γαλλία και το Βισκαϊκό κόλπο.



Εικόνα 74: Ch1 0.6 μm . 11/08/2016 05:57 UTC. Εντός του πλαισίου εντοπίζεται η έξαρση των contrails.

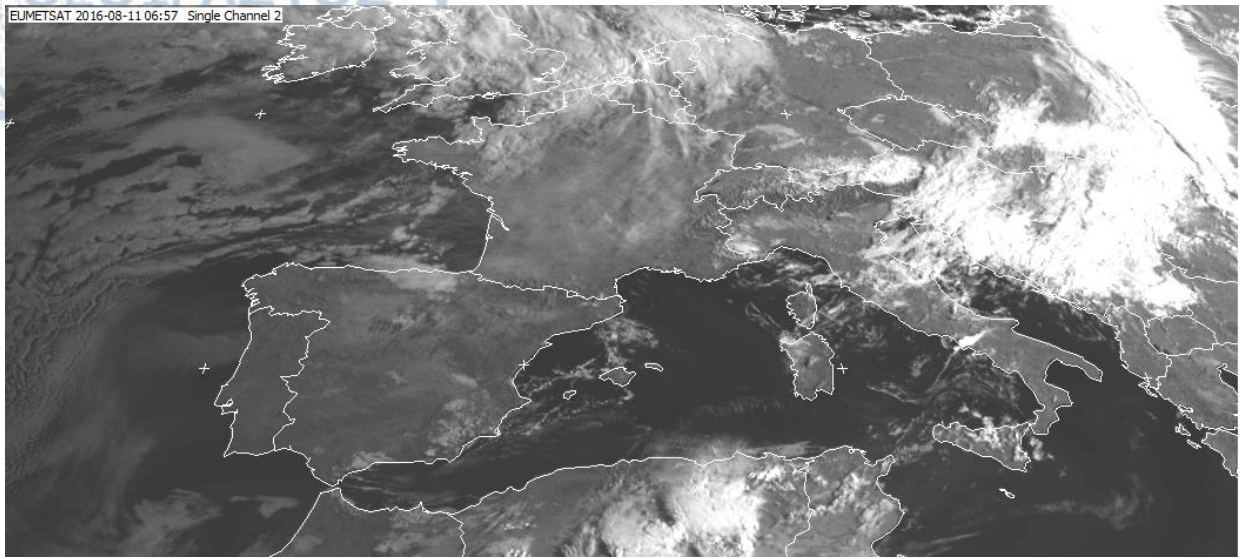


Εικόνα 75: Ch1 0.6μm. 11/08/2016 06:57 UTC.



Εικόνα 76: Ch2 0.8μm. 11/08/2016 05:57 UTC.

Το κανάλι 3, Ch3 1.6μm είναι πολύ σημαντικό. Σε αυτό μόνο το μήκος κύματος, παρατηρείται διαφορετική απορρόφηση ανάμεσα στο νερό και τον πάγο. Συνεπώς στις εικόνες αυτού του καναλιού μπορούν να διακριθούν τα νέφη υδροσταγόνων από τα νέφη παγοκρυστάλλων. Οι εικόνες του καναλιού 3 για τις 06:00 UTC και 07:00 UTC παρατίθενται στις εικόνες 78 και 79 αντίστοιχα.



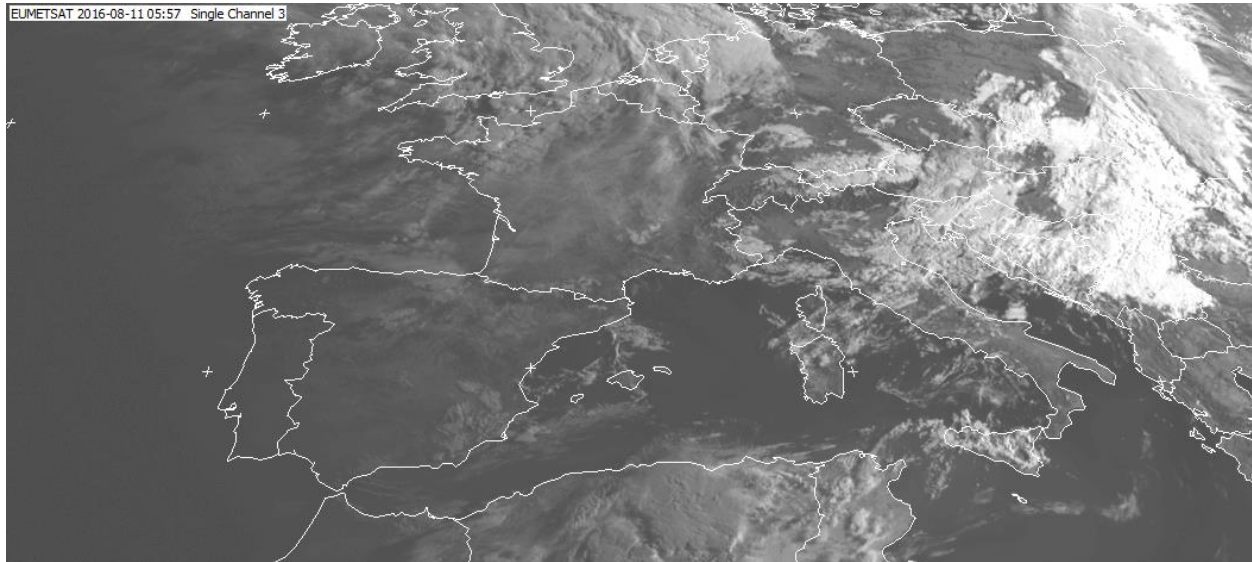
Εικόνα 77: Ch2 0.8 μ m. 11/08/2016 06:57 UTC.

Ο πάγος απορροφάει πιο έντονα την ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος, και συνεπώς τα νέφη παγοκρυστάλλων εμφανίζονται με πιο σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Το χιόνι και ο πάγος στην επιφάνεια της γης αποδίδονται με πολύ σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Η σύγκριση των εικόνων του καναλιού 2 με αυτές του καναλιού 3, οδηγεί σε πιο εμπειριστατωμένη αξιολόγηση του είδους των νεφών.

Στα Δυτικά της σκηνής εντοπίστηκαν νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος. Παρατηρώντας τα ίδια νέφη στις εικόνες του καναλιού 3, φαίνεται ότι κάποια από αυτά τα νέφη αποτελούνται από παγοκρυστάλλους, δηλαδή έχουν και μεγάλο ύψος. Συνεπώς είναι νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με μεγάλο βάθος. Τα νέφη μεγάλου οπτικού πάχους που εντοπίστηκαν στην βόρεια Αφρική, εμφανίζονται σκούρα στις εικόνες του καναλιού 3. Συνεπώς επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για καταιγιδοφόρα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Τα νέφη πάνω από την Μ. Βρετανία διατηρούν παρόμοιες φωτεινές αποχρώσεις στο κανάλι 2 και το κανάλι 3, επομένως πρόκειται για νέφη υδροσταγόνων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποια σημεία στην οροσειρά των Άλπεων, που εμφανίζονται πολύ φωτεινά λευκά στις εικόνες του καναλιού 2 και πολύ σκούρα στις εικόνες του καναλιού 3. Πρόκειται για περιοχές στην επιφάνεια της γης καλυμμένες από χιόνι.

Τέλος η περιοχή στην οποία εντοπίζονται τα contrails, φαίνεται να έχει ελαφρώς πιο σκούρες αποχρώσεις του γκρι στις εικόνες του καναλιού 3. Συνεπώς προκύπτει ότι σε εκείνη την περιοχή εντοπίζονται νέφη μικρού οπτικού πάχους αποτελούμενα κυρίως από

παγοκρυστάλλους. Το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα contrails έχουν αυτά τα χαρακτηριστικά. Έτσι αν και δεν είναι πολύ εμφανή τα γραμμικά στοιχεία, μπορεί ήδη από αυτές τις εικόνες να εκτιμηθεί ότι σε εκείνη την περιοχή υπάρχουν contrails, λόγω των χαρακτηριστικών τους.



Εικόνα 78: Ch3 1.6μm. 11/08/2016 05:57 UTC.



Εικόνα 79: Ch3 1.6μm. 11/08/2016 06:57 UTC.

Μία άλλη οικογένεια καναλιών, είναι τα κανάλια των υδρατμών. Πρόκειται για τα κανάλια 5 (Ch5 6.2μm) και 6 (Ch6 7.3μm). Στα μήκη κύματος αυτών των καναλιών απορροφούν και επανεκπέμπουν πιο έντονα οι υδρατμοί. Δεν ανήκουν στην κατηγορία

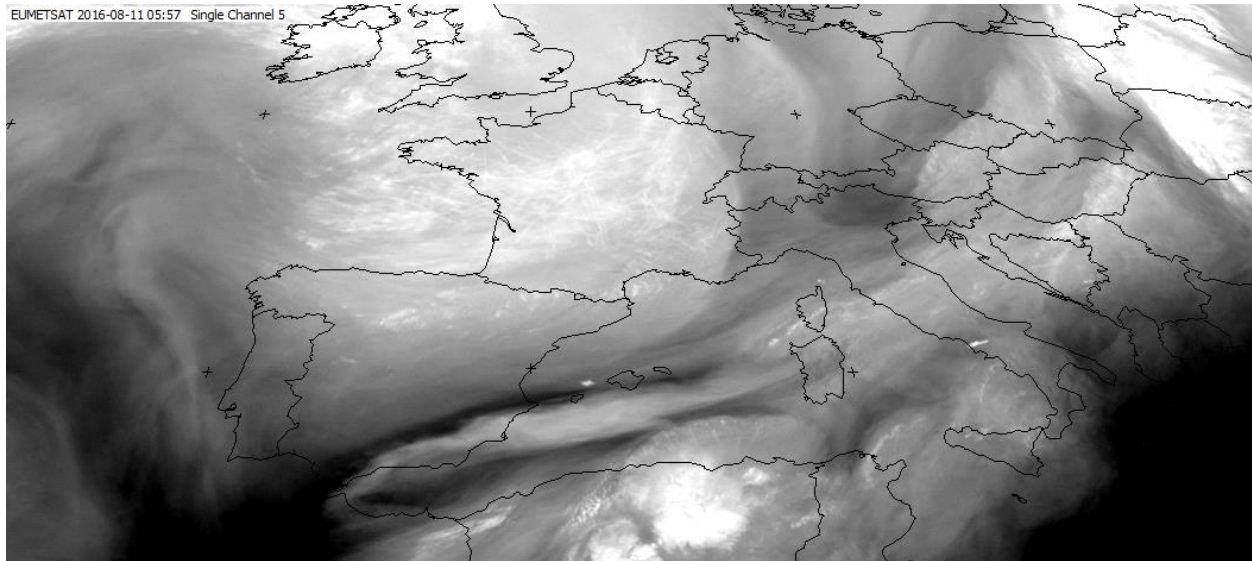
των «ηλιακών» καναλιών. Συνεπώς η ακτινοβολία που ανιχνεύει το ραδιόμετρο σε αυτά τα μήκη κύματος, είναι θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη και την ατμόσφαιρα. Τα δύο κανάλια διακρίνονται από το ύψος της ατμόσφαιρας από το οποίο προέρχεται η ακτινοβολία που καταγράφουν. Το κανάλι Ch5 6.2μm εντοπίζει την υγρασία στην ανώτερη ατμόσφαιρα, περίπου στα 350 hPa, ενώ το κανάλι Ch6 7.3μm εντοπίζει την υγρασία από το επίπεδο περίπου των 500 hPa. Τα contrails ως τεχνητά νέφη, είναι στοιχεία με μεγάλα ποσά υγρασίας. Συνεπώς αναμένεται να εντοπίζονται στα κανάλια των υδρατμών ως φωτεινά λευκά γραμμικά στοιχεία. Αντίθετα, περιοχές με μικρά ποσά υγρασίας θα έχουν πιο σκούρες αποχρώσεις του γκρι, έως και μαύρο στις ξηρές περιοχές.

Στην Εικόνα 80, φαίνονται τα επίπεδα υγρασίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Χαρακτηριστικά παρατηρείται ένας αεροχείμαρρος, που ξεκινάει από το Γιβραλτάρ, διασχίζει την ΝΑ Ισπανία και καταλήγει μέχρι τις Βαlearίδες νήσους και διακρίνεται λόγω του απότομου ορίου της υγρασίας. Επίσης εντοπίζονται δύο πολύ ξηρές περιοχές, μία στο Ιόνιο πέλαγος και μία στα ΝΔ της Ισπανίας. Εστιάζοντας την προσοχή στην κεντρική Γαλλία, είναι εμφανή κάποια μεμονωμένα contrails. Όπως ήταν αναμενόμενο, εμφανίζονται σαν φωτεινά λευκά γραμμικά στοιχεία.

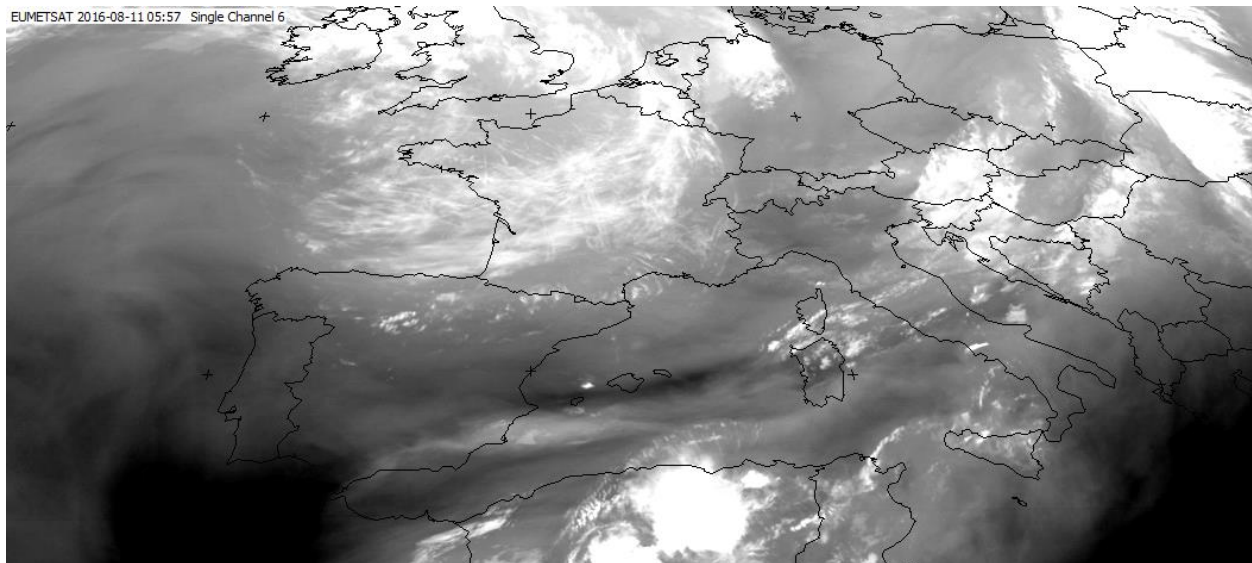
Η ευρύτερη περιοχή στην οποία παρατηρείται η έξαρση των contrails, φαίνεται να έχει μεγάλα ποσά υγρασίας. Χαρακτηριστική είναι η ύπαρξη μίας καμπύλης που φαίνεται να οριοθετεί αυτή την περιοχή υψηλής υγρασίας στα ανατολικά της, καθώς εντοπίζεται επάνω της μία απότομη βαθμίδα υγρασίας. Το σύνορο αυτό, εντοπίζεται να ξεκινάει από το τέλος του jet streak στις Βαlearίδες νήσους και να φτάνει μέχρι τις κάτω χώρες, περικλείοντας τη Γαλλία. Συνεπώς η έξαρση των contrails εντοπίζεται σε μία υγρή αέρια μάζα η οποία διακρίνεται από ένα απότομο όριο στα ανατολικά της.

Στην Εικόνα 81, που καταγράφει την υγρασία σε μεγαλύτερο βάθος στην ατμόσφαιρα, παρατηρούνται παρόμοια χαρακτηριστικά. Το jet streak είναι πιο αποδυναμωμένο, πράγμα αναμενόμενο, καθώς ο αεροχείμαρρος είναι περισσότερο εμφανής στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Αντίθετα, παραμένουν εμφανείς οι δύο ξηρές περιοχές, στα ΝΔ της Ισπανίας και στο Ιόνιο πέλαγος. Τα contrails διακρίνονται πιο καθαρά σαν ξεχωριστά γραμμικά στοιχεία σε αυτή την εικόνα. Επίσης παρατηρείται και

πάλι ότι η έξαρση των contrails γίνεται σε περιοχή όπου επικρατεί μια υγρή αέρια μάζα. Η διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στην υγρή και την ξηρότερη αέρια μάζα, πάνω από την κεντρική Ευρώπη, δεν είναι τόσο έντονη σε αυτό το επίπεδο της ατμόσφαιρας, όσο στην εικόνα του καναλιού 5, αλλά συνεχίζει να διακρίνεται. Αυτό που την διακρίνει δεν είναι τόσο η κλίση της υγρασίας, όσο η απότομη μείωση των νεφών.



Εικόνα 80: Ch5 6.2μm. 11/08/2016 05:57 UTC.



Εικόνα 81: Ch6 7.3μm. 11/08/2016 05:57 UTC.

Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος από τα κανάλια των υδρατμών, εντοπίζεται το λεγόμενο ατμοσφαιρικό παράθυρο. Πρόκειται δηλαδή για γήινη θερμική ακτινοβολία



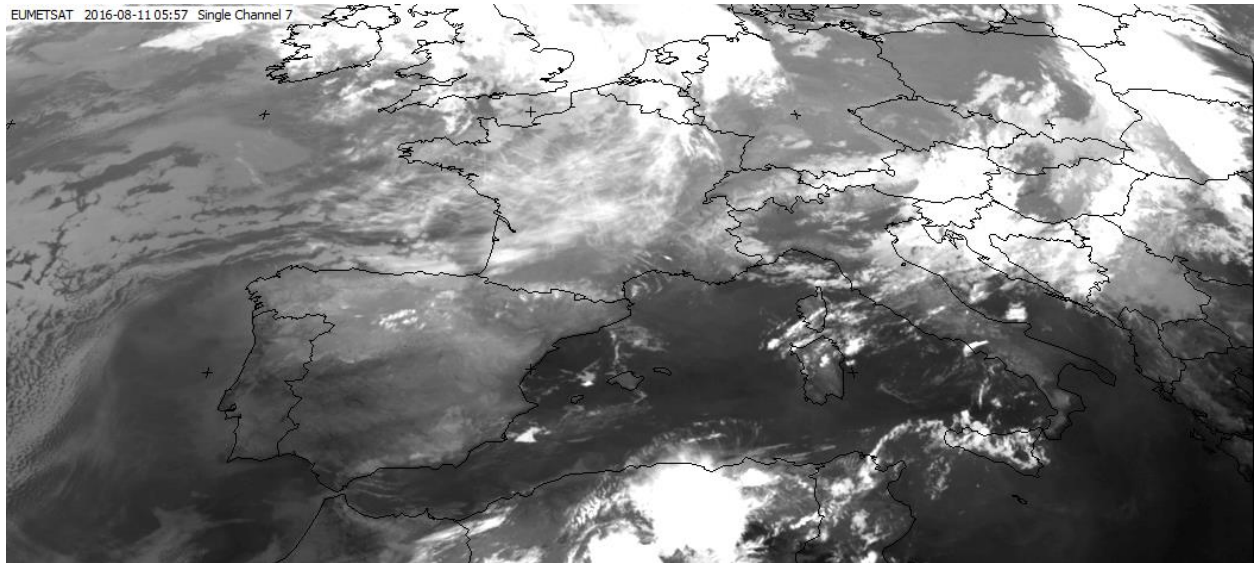
που δεν απορροφάται ισχυρά από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Τα βασικά κανάλια σε αυτό το εύρος μηκών κύματος είναι το κανάλι 7, Ch7 8.7 μm , το κανάλι 9, Ch9 10.8 μm και το κανάλι 10, Ch10 12.0 μm . Τα τρία αυτά κανάλια εμφανίζουν πολλά κοινά στοιχεία μεταξύ τους και συνήθως παρέχουν περισσότερες πληροφορίες όταν συνδυάζονται με άλλα κανάλια σε χρωματικές συνθέσεις RGB. Τα κανάλια 7 και 10 είναι όμως αρκετά ευαίσθητα στον εντοπισμό λεπτών νεφών cirrus σε μεγάλα υψόμετρα. Συνεπώς είναι χρήσιμα και για τον εντοπισμό των contrails.

Στις παρακάτω εικόνες, Εικόνα 82 και Εικόνα 83 παρατίθενται οι εικόνες από το κανάλι 7 και το κανάλι 10 αντίστοιχα. Και στις δύο εικόνες είναι εμφανή στην περιοχή της κεντρικής Γαλλίας και στο Βισκαϊκό κόλπο, τα contrails. Διακρίνονται ως φωτεινά γραμμικά στοιχεία. Επιπλέον αυτού, όμως, διακρίνονται στην ίδια περιοχή και νέφη cirrus να καλύπτουν μεγάλη έκταση.

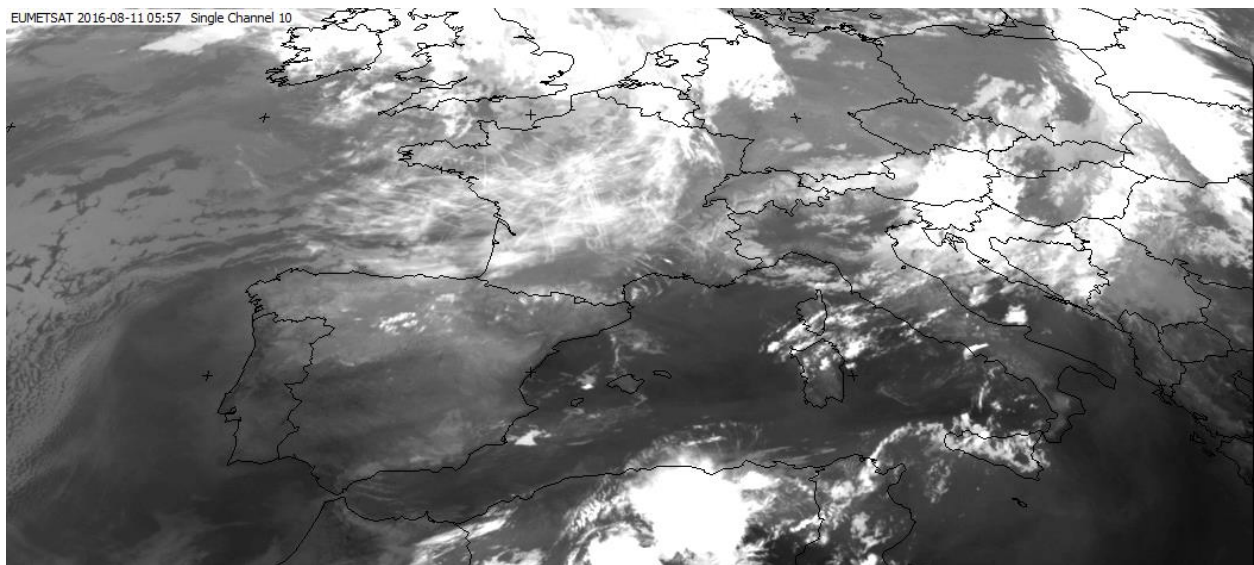
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι εικόνες των καναλιών του ατμοσφαιρικού παραθύρου παρέχουν περισσότερες πληροφορίες όταν συνδυάζονται σε χρωματικές συνθέσεις RGB και διαφορές θερμοκρασίας. Μεταξύ των καναλιών 9 και 10, παρατηρείται διαφορετική απορρόφηση των νεφών παγοκρυστάλλων από νέφη υδροσταγόνων. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την καλύτερη αποτύπωση των νεφών cirrus αλλά και των contrails. Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται η διαφορά θερμοκρασίας Ch9 10.8 μm – Ch10 12.0 μm . Η διαφορά αυτών των δύο εικόνων έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι τόσο εμφανή τα νέφη υδροσταγόνων, που έχουν όμοια απορρόφηση στα δύο κανάλια, και να τονίζονται τα νέφη παγοκρυστάλλων και τα contrails, τα οποία έχουν διαφορετική απορρόφηση ανάμεσα στα δύο κανάλια. Η διαφορά θερμοκρασίας των δύο καναλιών παρατίθεται στην Εικόνα 84.

Παρατηρώντας την Εικόνα 84, γίνεται αμέσως σαφές το γιατί είναι η βασική διαφορά θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των contrails. Σε αυτή την εικόνα τα περισσότερα «θερμά» νέφη που βρίσκονται σε μικρότερα ύψη και αποτελούνται από υδροσταγόνες, εμφανίζονται μαύρα. Αντίθετα τα contrails ξεχωρίζουν σαν λευκά γραμμικά στοιχεία. Παράλληλα στην περιοχή όπου εντοπίζονται τα contrails, φαίνονται και τα νέφη cirrus που παρατηρήθηκαν και στις εικόνες του ατμοσφαιρικού παραθύρου (Εικόνα 82 και Εικόνα 83). Τέλος είναι εμφανής και ο διαχωρισμός των

αερίων μαζών πάνω από την κεντρική Γαλλία, που παρατηρήθηκε κυρίως στις εικόνες των καναλιών των υδρατμών (Εικόνα 80 και Εικόνα 81).



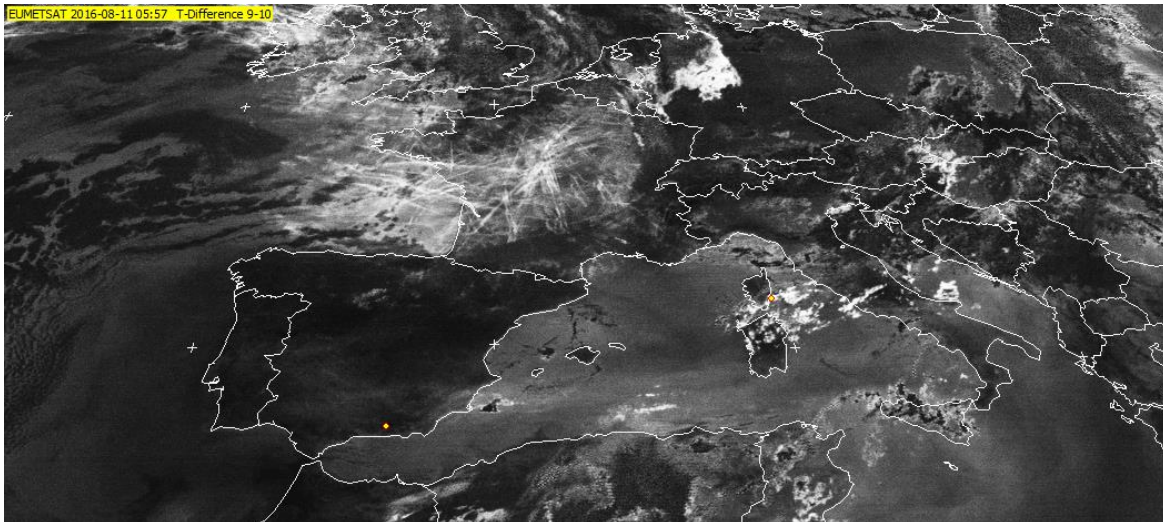
Εικόνα 82: Ch7 8.6μm. 11/08/2016 05:57 UTC.



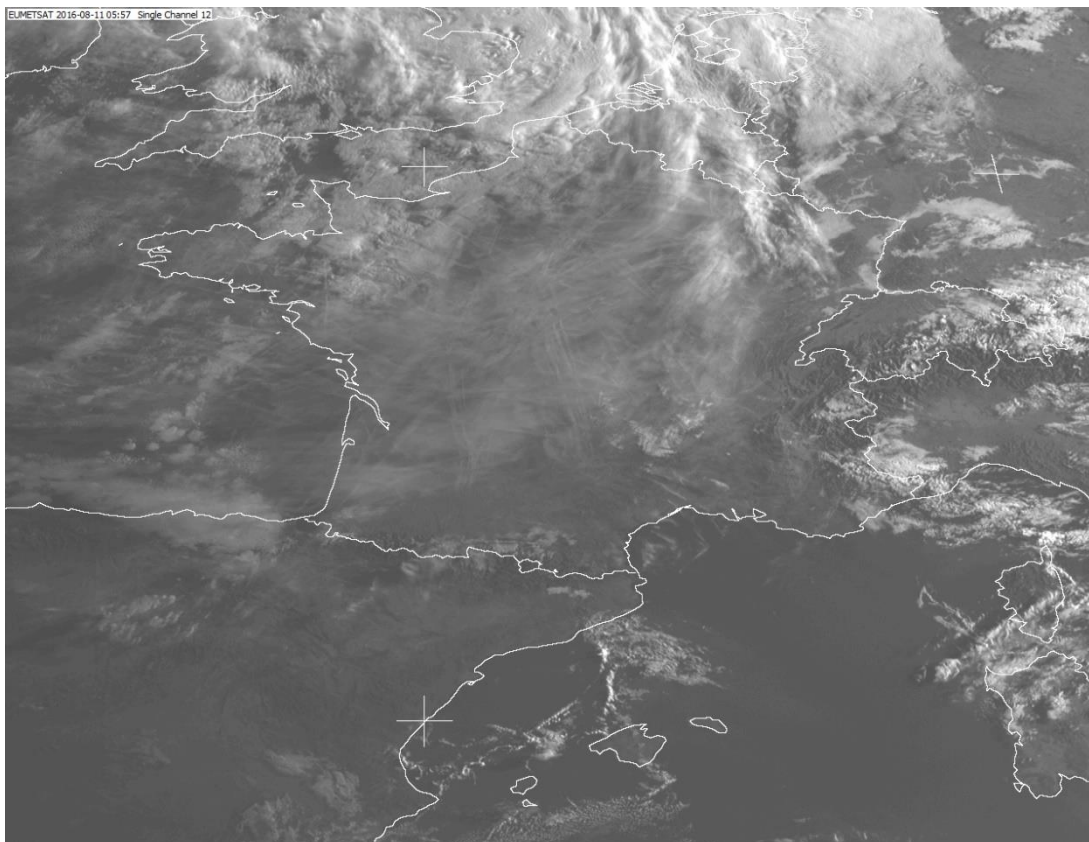
Εικόνα 83: Ch10 12.0μm. 11/08/2016 05:57 UTC.

Πριν την ανάλυση των χρωματικών συνθέσεων RGB, παρουσιάζεται ακόμη μία εικόνα με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (Εικόνα 85). Πρόκειται για την εικόνα υψηλής ανάλυσης τους ορατού φάσματος, HRV, που αντιστοιχεί στο κανάλι 12 του MSG. Η εικόνα αυτή είναι πολυφασματική και παρουσιάζει μία μικρότερη γεωγραφικά περιοχή αλλά με μεγαλύτερη χωρική ανάλυση και συνεπώς με περισσότερες λεπτομέρειες. Στην

περιοχή της Γαλλίας, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 85, διακρίνονται και πάλι τα contrails ως γραμμικά στοιχεία σε ένα περιβάλλον όπου παρατηρούνται και άλλα νέφη.



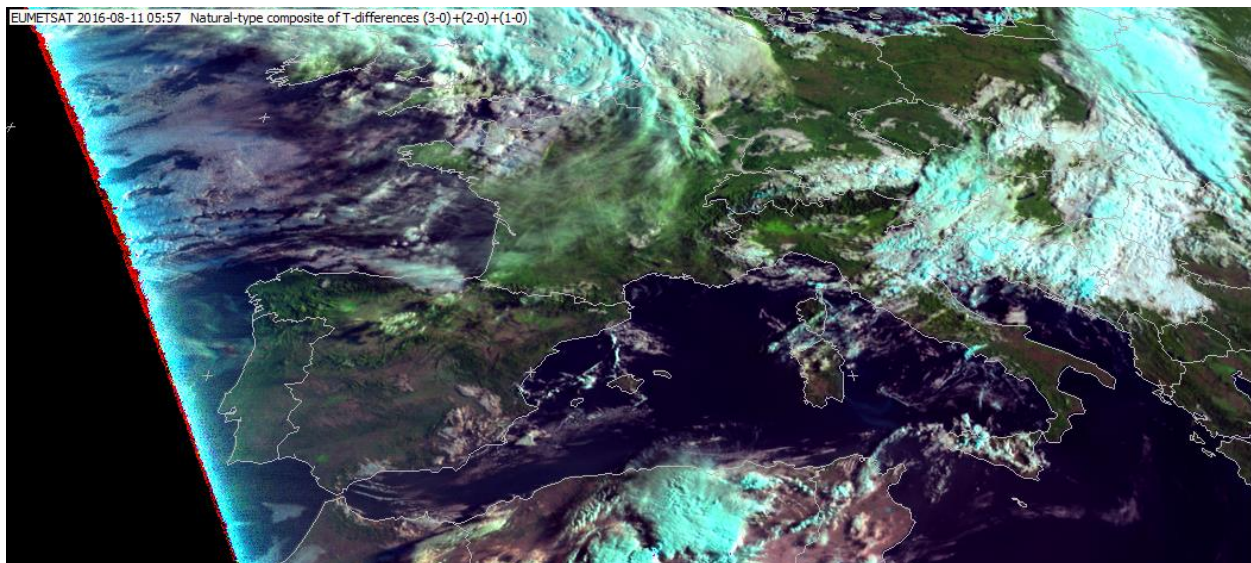
Εικόνα 84: Διαφορά θερμοκρασίας Ch9 10.8μm – Ch10 12.0μm. 11/08/2016 05:57 UTC.



Εικόνα 85: Εικόνα υψηλής ανάλυσης στο ορατό φάσμα, HRV. 11/08/2016 05:57 UTC.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν χρωματικές συνθέσεις RGB. Σε αυτές, τρία κανάλια ή διαφορές καναλιών αποδίδονται σε κάθε ένα από τα τρία χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε και ρυθμίζοντας κατάλληλα τις εντάσεις και τις αντιθέσεις προκύπτουν εικόνες που στοχεύουν στην εξαγωγή συγκεκριμένων πληροφοριών. Η πρώτη σύνθεση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 86 αποτελεί την σύνθεση φυσικού χρώματος. Δηλαδή είναι μία απεικόνιση της γης η οποία προσομοιάζει αυτή που θα έβλεπε ένας ανθρώπινος παρατηρητής από το διάστημα. Για την παραγωγή της σύνθεσης χρησιμοποιούνται τα τρία κανάλια στο ορατό φάσμα. Επειδή δεν έχει ανατείλει ακόμη ο ήλιος σε όλη την έκταση της εικόνας, εμφανίζεται μια μαύρη περιοχή δυτικά στην Εικόνα 86.

Όσον αφορά την πληροφορία που παρέχεται από αυτή την εικόνα, χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών της επιφάνειας, αλλά βοηθάει και στο διαχωρισμό νεφών παγοκρυστάλλων (κυανό) από νέφη υδροσταγόνων (λευκό). Στην περιοχή της Γαλλίας εντοπίζεται μία μίξη από λευκό και κυανό, πράγμα που σημαίνει ότι εντοπίζονται τόσο υδροσταγόνες όσο και παγοκρύσταλλοι. Και σε αυτή την εικόνα διακρίνονται τα contrails πάνω από την κεντρική και βόρεια Γαλλία, καθώς και στο Βισκαϊκό κόλπο.



Εικόνα 86: Χρωματική σύνθεση φυσικού χρώματος (natural color RGB). 11/08/2016 05:57 UTC.

Η χρωματική σύνθεση των αερίων μαζών, airmass RGB, Εικόνα 87, είναι μεγάλης χρησιμότητας, καθώς βοηθάει στον χαρακτηρισμό των αερίων μαζών, τόσο ως προς την

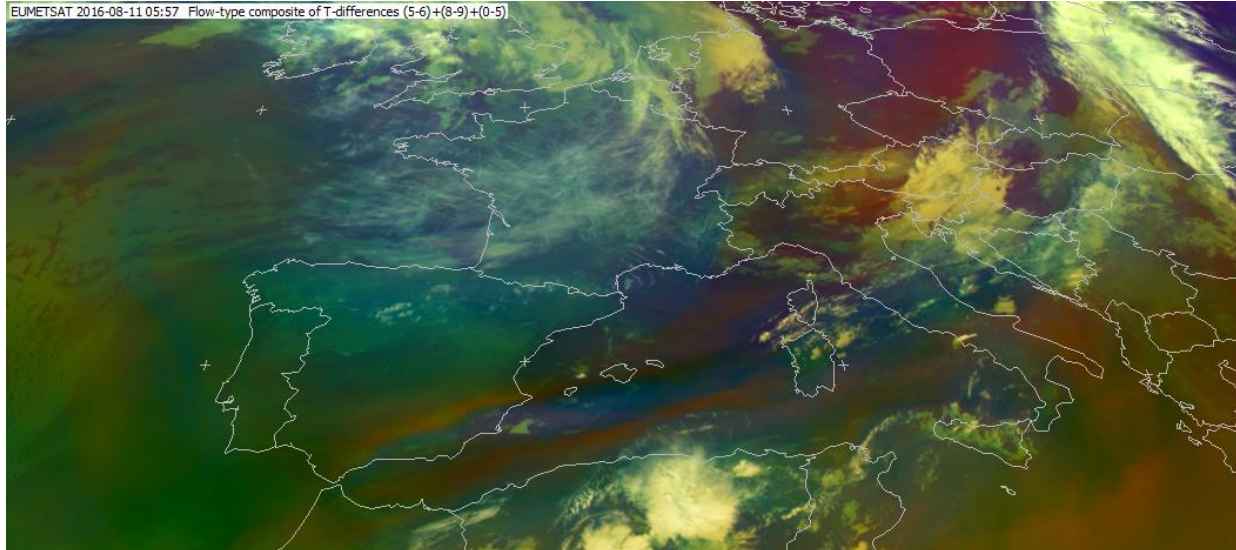
υγρασία τους όσο και τη θερμοκρασία τους. Πιο συγκεκριμένα, με το κόκκινο χρώμα αποδίδεται η κατακόρυφη κατανομή της υγρασίας. Έντονη συνεισφορά του κόκκινου χρώματος υποδεικνύει ξηρές αέριες μάζες στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Το πράσινο χρώμα αποδίδει την περιεκτικότητα της αέριας μάζας σε όζον. Με έντονο πράσινο χρώμα αποδίδονται οι τροπικές αέριες μάζες που είναι φτωχές σε όζον. Τέλος το μπλε χρώμα χρησιμοποιείται και αυτό για τη διάκριση των υγρών από τις ξηρές αέριες μάζες, κυρίως στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, με έντονο μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι ξηρές και ψυχρές περιοχές της ανώτερης ατμόσφαιρας.

Στην Εικόνα 87, παρατηρείται και πάλι η έξαρση των contrails πάνω από τη Γαλλία και τον Ατλαντικό. Τα ίδια τα contrails διακρίνονται ως λευκά γραμμικά στοιχεία. Με λευκό χρώμα στη σύνθεση αερίων μαζών αποδίδονται νέφη μεγάλου υψομέτρου. Το λευκό χρώμα δεν είναι πολύ έντονο οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι τα contrails δεν έχουν μεγάλο οπτικό πάχος. Γενικότερα η περιοχή στην οποία εντοπίζονται τα contrails έχει ένα μπλε υπόβαθρο. Συνεπώς σε εκείνη τη περιοχή επικρατεί μία αέρια μάζα ψυχρή και πλούσια σε όζον, δηλαδή πολική αέρια μάζα. Μία ελαφριά πράσινη απόχρωση στην ίδια περιοχή είναι ενδεικτική της ύπαρξης σημαντικών ποσών υγρασίας στη μέση και ανώτερη ατμόσφαιρα. Η περιοχή όπου εντοπίζονται τα contrails διαχωρίζεται από τις κόκκινες, ξηρές και με μεγάλο δυναμικό στροβιλισμό (PV) αέριες μάζες στα ανατολικά, και τις πράσινες, θερμές, τροπικές μάζες στα νότια και τα δυτικά.

Συνοψίζοντας, από την χρωματική σύνθεση των αερίων μαζών προκύπτει ότι η έξαρση των contrails παρατηρείται σε μία ψυχρή πολική αέρια μάζα με αρκετά μεγάλα ποσοστά υγρασίας. Η αέρια αυτή μάζα έχει στα ανατολικά της ένα απότομο σύνορο που την διακρίνει από τις ξηρές αέριες μάζες. Στα νότια και τα δυτικά της, εντοπίζεται επίσης ένα σύνορο που τη διακρίνει από τις θερμές τροπικές αέριες μάζες.

Η επόμενη χρωματική σύνθεση που αναλύεται, είναι η σύνθεση των καταιγίδων, severe storm RGB. Βασικός στόχος αυτής της σύνθεσης είναι ο εντοπισμός καταιγίδων και ισχυρών ανωμεταφορών. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μελετώντας τα μικροφυσικά χαρακτηριστικά των κορυφών των ψυχρών νεφών. Κατά συνέπεια, αν και δεν είναι εξ' αρχής προφανές, η σύνθεση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση των contrails. Στα κανάλια που αξιοποιούνται για την σύνθεση υπάρχουν και μερικά στο

ορατό φάσμα. Για το λόγο αυτό μαζί με την εικόνα των 06:00 UTC χρησιμοποιείται και η εικόνα των 07:00 UTC, όταν έχει ανατείλει ο ήλιος σε όλη τη σκηνή. Οι συνθέσεις καταιγίδων για τις δύο χρονικές στιγμές δίδονται στις εικόνες 88 και 89, αντίστοιχα.

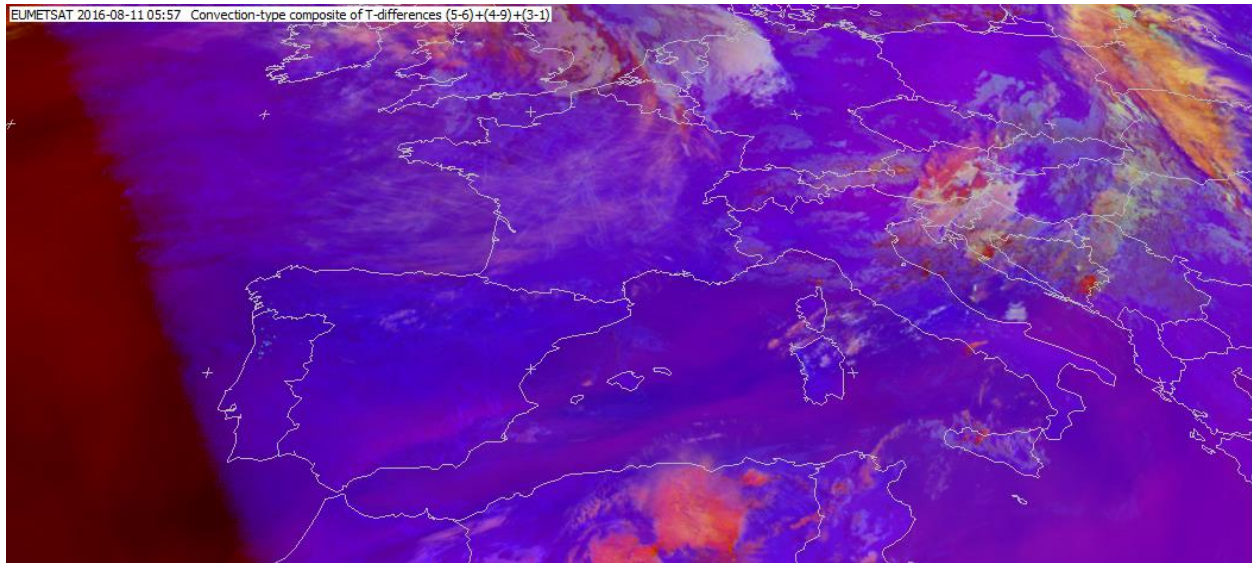


Εικόνα 87: Χρωματική σύνθεση αερίων μαζών (airmass RGB). 11/08/2016 05:57 UTC.

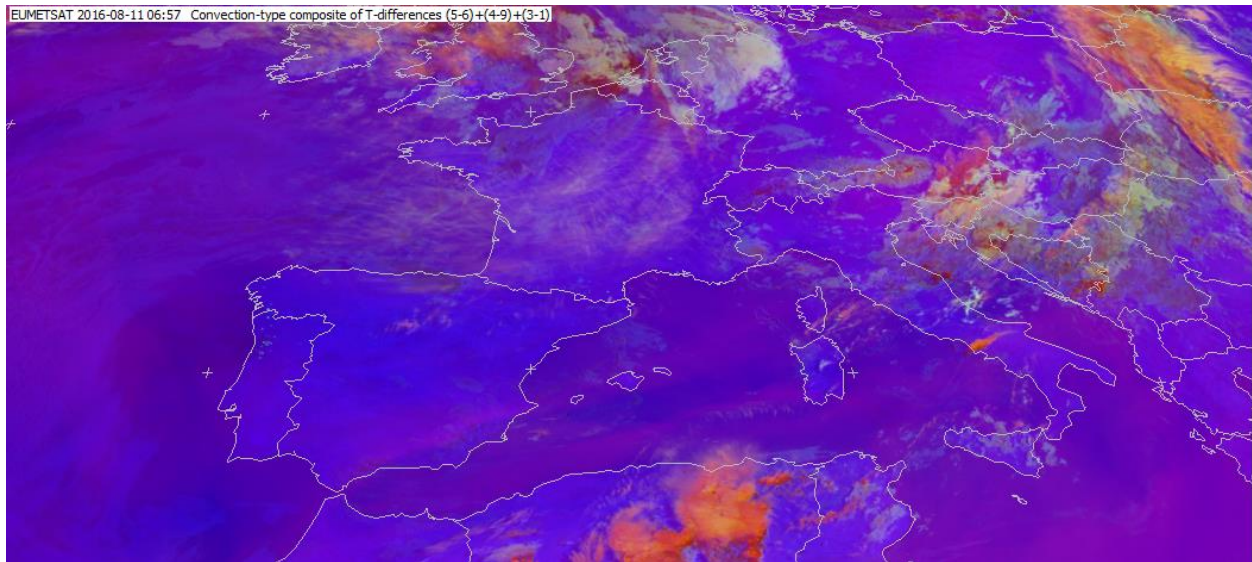
Τα contrails εντοπίζονται και πάλι στην Κεντρική Γαλλία και τον Βισκαϊκό κόλπο, από τη χαρακτηριστική γραμμική τους μορφή. Το υπόβαθρο της περιοχής στην οποία εντοπίζονται τα contrails, είναι μωβ απόχρωσης. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε εκείνη την περιοχή δεν εντοπίζονται νέφη χαμηλά και μέσα. Το ανοιχτό ροζ χρώμα με το οποίο αποτυπώνονται τα contrails, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για λεπτά νέφη αποτελούμενα από παγοκρυστάλλους. Πιο συγκεκριμένα οι παγοκρυστάλλοι είναι κατά πάσα πιθανότητα μικρού μεγέθους.

Η τελευταία χρωματική σύνθεση που αναλύεται, είναι η χρωματική σύνθεση της σκόνης, dust RGB, Εικόνα 90. Πρόκειται ίσως για τη πιο χρήσιμη σύνθεση για τον εντοπισμό των contrails, καθώς περιέχει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καναλιών Ch9 10.8μm – Ch10 12.0μm, που όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω είναι η βασική για τον εντοπισμό των contrails. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διαφορά είναι Ch10 12.0μm - Ch9 10.8μm, οπότε τα contrails αντί για λευκά, αποδίδονται ως μαύρα γραμμικά στοιχεία. Όπως φανερώνει και το όνομά της, αυτή η χρωματική σύνθεση έχει ως βασικό στόχο τον εντοπισμό σκόνης στην ατμόσφαιρα. Και πάλι όμως μπορεί να

αξιοποιηθεί για την εξαγωγή πληροφοριών για τα contrails και το περιβάλλον στο οποίο εντοπίζεται η έξαρσή τους.



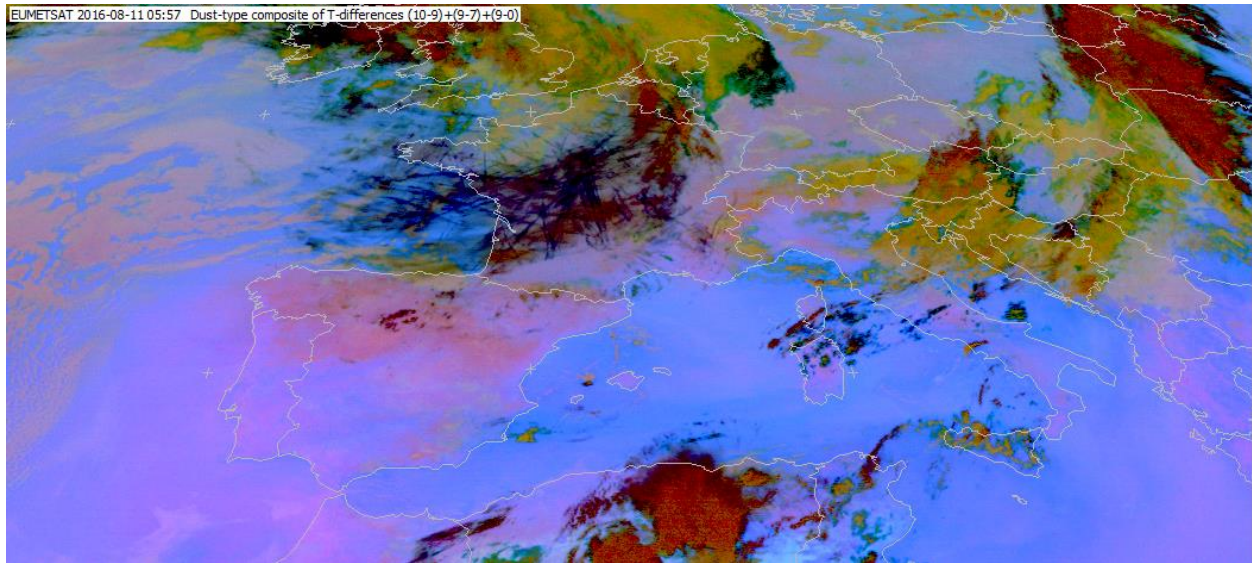
Εικόνα 88: Χρωματική σύνθεση καταιγίδων (severe storm RGB). 11/08/2016 05:57 UTC.



Εικόνα 89: Χρωματική σύνθεση καταιγίδων (severe storm RGB). 11/08/2016 06:57 UTC.

Τα contrails, όπως ήταν αναμενόμενο, εντοπίζονται πιο εύκολα από ότι στις άλλες χρωματικές συνθέσεις. Είναι μαύρα γραμμικά στοιχεία. Στην ευρύτερη περιοχή όπου εντοπίζεται η έξαρση των contrails, εντοπίζονται και άλλα νέφη που αποδίδονται με κόκκινο χρώμα. Πρόκειται για νέφη παγοκρυστάλλων, cirrus, σε μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς και από αυτή την εικόνα επιβεβαιώνεται ότι τα contrails

σηματίστηκαν σε ένα περιβάλλον όπου παρατηρούνται και άλλα υψηλά νέφη τύπου cirrus.

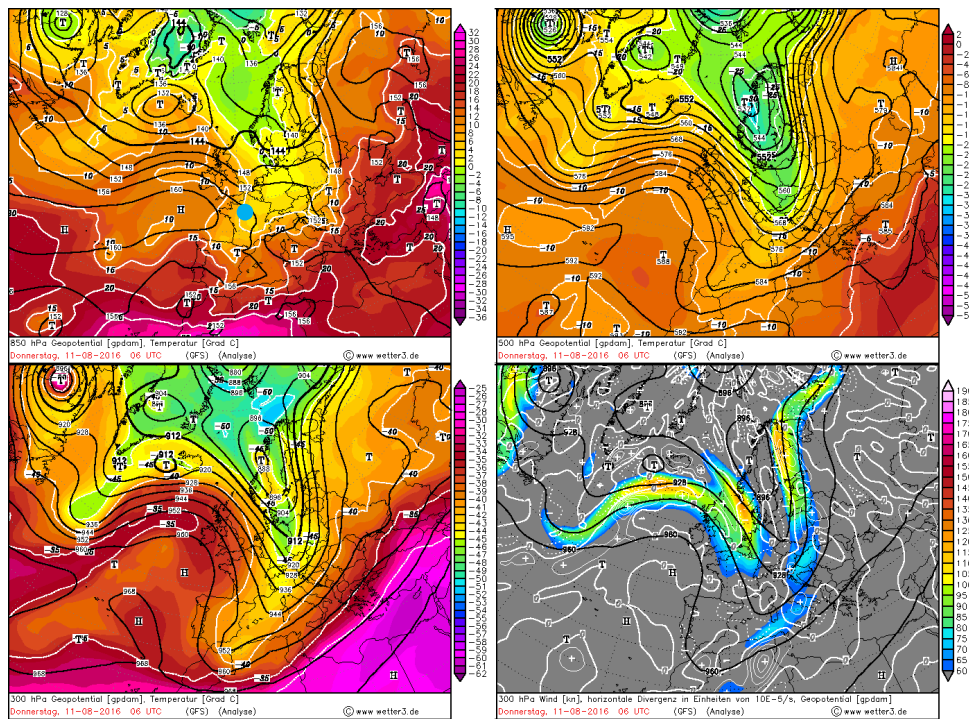


Εικόνα 90: Χρωματική σύνθεση σκόνης (dust RGB). 11/08/2016 05:57 UTC.

Οι δορυφορικές εικόνες που αναλύθηκαν παραπάνω έδωσαν μια εικόνα για την κατάσταση της ατμόσφαιρας στην περιοχή όπου παρατηρείται η έξαρση των contrails. Για την πιο εμπειριστατωμένη μελέτη της περίπτωσης θα αναλυθούν στη συνέχεια κάποιοι συνοπτικοί χάρτες. Στην Εικόνα 91, παρατίθενται οι χάρτες των γεωδυναμικών μαζί με την θερμοκρασία για τα επίπεδα των 850 hPa, 500 hPa και 300 hPa καθώς και ο χάρτης του ανέμου στα 300 hPa.

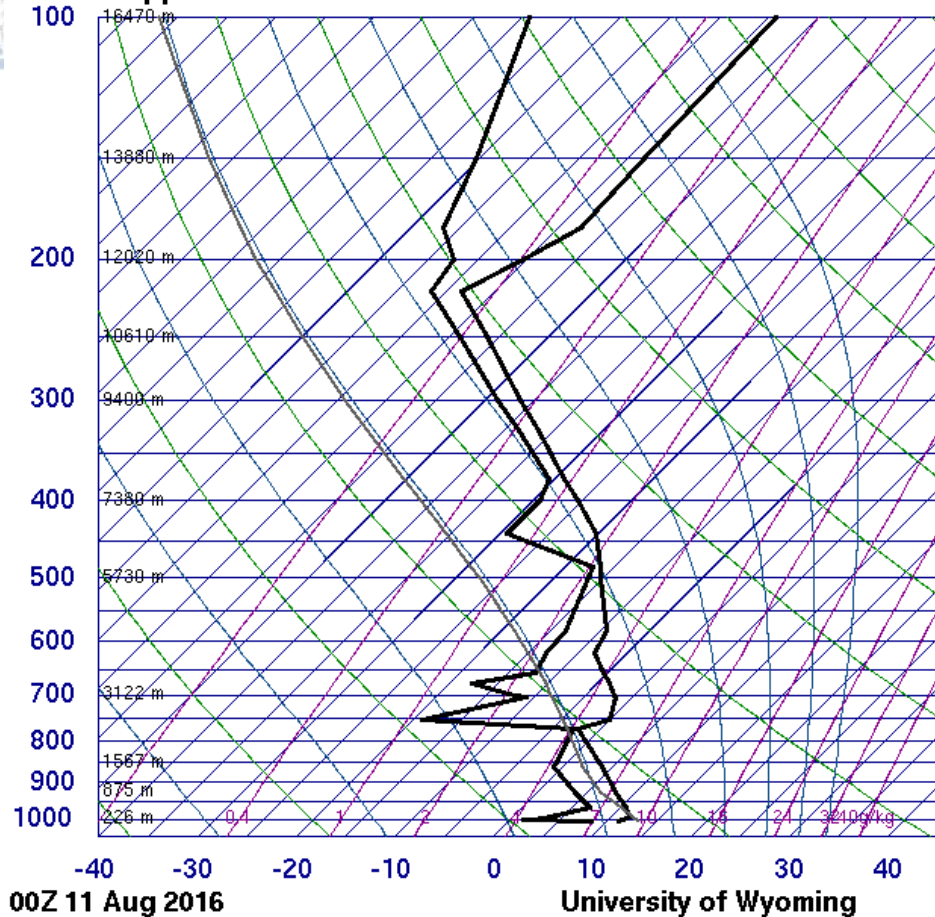
Η ανάλυση των ισοϋψών και των θερμοκρασιών οδηγεί σε συμπεράσματα παρόμοια με αυτά που προέκυψαν στην έως τώρα μελέτη της περίπτωσης. Γενικότερα η Ευρώπη επηρεάζεται από τρία βαρομετρικά συστήματα. Δύο κυκλωνικά στην Ισλανδία και τη Νορβηγία και έναν αντικυκλώνα με κέντρο στα Δυτικά του Βισκαϊκού κόλπου. Η περιστροφή αυτών των τριών συστημάτων έχει σαν αποτέλεσμα την μεταφορά ψυχρών – πολικών αερίων μαζών προς την κεντρική Ευρώπη. Το χαμηλό των γεωδυναμικών υψών με κέντρο στην Νορβηγία, ισχυροποιείται καθ' ύψος. Το γεγονός αυτό συμφωνεί με την ύπαρξη ψυχρών αερίων μαζών πιο κοντά στην επιφάνεια. Στα επίπεδα των 500 hPa και 300 hPa, πάνω από την κεντρική Ευρώπη σχηματίζεται ένας αυλώνας χαμηλών γεωδυναμικών υψών. Οι ψυχρές μάζες που τον συνοδεύουν, μεταφέρονται ελαφρά Ανατολικά από την περιοχή της έξαρσης των contrails. Προκύπτει συνεπώς, ότι στην

κατώτερη ατμόσφαιρα (850 hPa), υπάρχει μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών στην περιοχή ενδιαφέροντος, λόγω του αυλώνα. Στα ανώτερα επίπεδα, 500 hPa και ιδίως 300 hPa, παρατηρείται όμως θερμή μεταφορά, λόγω του αντικυκλωνικού συστήματος, ενώ οι ψυχρές μάζες μεταφέρονται πιο ανατολικά. Έτσι, λόγω ψυχρής μεταφοράς στα χαμηλότερα στρώματα και θερμής μεταφοράς στα ανώτερα, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα contrails σχηματίζονται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από ευστάθεια. Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας επιβεβαιώνεται και από τους δείκτες ευστάθειας που υπολογίστηκαν από τη ραδιοβόλιση που έγινε στην πόλη Trappes, που βρίσκεται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Από το τεφίγραμμα της ραδιοβόλισης (Εικόνα 92) παρατηρείται επίσης στροφή του ανέμου με τη φορά των δεικτών του ρολογιού πάνω από τα 600 hPa, χαρακτηριστικό της θερμής μεταφοράς και ψυχρή μεταφορά κάτω από αυτό το επίπεδο των 600 hPa. Προκύπτει επίσης ότι η ατμόσφαιρα σε όλο της σχεδόν το βάθος και ιδίως στο ύψος σχηματισμού των contrails, έχει υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας. Τέλος από τον χάρτη του ανέμου, προκύπτει ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος δεν εντοπίζεται κάποια σημαντική οριζόντια σύγκλιση ή απόκλιση, ενώ και η ένταση του ανέμου είναι σχετικά μικρή για αυτό το επίπεδο των 300 hPa.



Εικόνα 91: Χάρτες αναλύσεων (GFS) γεωδυναμικών υψών (ισοπλυθείς σε gpm) και θερμοκρασίας (χρωματική κλίμακα σε °C) στα 850 hPa (επάνω αριστερά), 500 hPa (επάνω δεξιά) και 300 hPa (κάτω αριστερά). Χάρτης έντασης ανέμου (χρωματική κλίμακα σε kn) και οριζόντιας απόκλισης (λευκές ισοπληθείς σε $10^{-5}/s$) στα 300 hPa (κάτω δεξιά). Επάνω αριστερά σημειώνεται με μπλε η πόλη Trappes, 11/08/2016, 06 UTC.

07145 Trappes



SLAT 48.76
SLON 2.00
SELV 168.0
SHOW 12.43
LIFT 12.32
LFTV 12.53
SWET 55.98
KINX 7.50
CTOT 14.30
VTOT 18.50
TOTL 32.80
CAPE 0.00
CAPV 0.00
CINS 0.00
CINV 0.00
EQLV -9999
EQTV -9999
LFCT -9999
LFCV -9999
BRCH 0.00
BRCV 0.00
LCLT 276.9
LCLP 895.1
MLTH 285.8
MLMR 5.71
THCK 5504.
PWAT 19.65

Εικόνα 92: Skew-T γράφημα για την πόλη Trappes. 11/08/2016 00Z.

Συγκεφαλαιώνοντας την συνοπτική ανάλυση, στην περιοχή όπου εμφανίζεται η έξαρση των contrails, επικρατεί μία ψυχρή, ευσταθής και υγρή αέρια μάζα με αρκετά χαμηλή για αυτό το επίπεδο ένταση ανέμου. Τα περισσότερα από τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις συνθήκες που ευνοούν τον σχηματισμό και τον εντοπισμό των contrails, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υποκεφαλαίων 4.3.1, 4.3.2, 4.3.6 και 4.3.7.

5. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Οι βασικοί στόχοι της παρούσας εργασίας, ήταν η εφαρμογή αυτοματοποιημένης μεθόδου εντοπισμού των contrails στις δορυφορικές εικόνες, η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών τους και ο εντοπισμός των ατμοσφαιρικών συνθηκών που ευνοούν τον σχηματισμό τους στην περιοχή της Ευρώπης. Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες του ραδιομέτρου SEVIRI που φέρεται από τους μετεωρολογικούς δορυφόρους MSG, της EUMETSAT. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα reanalysis της βιβλιοθήκης ERA5, καθώς και πληθώρα βοηθητικών δεδομένων.

5.1. Αλγόριθμος Εντοπισμού Contrails

Ο αλγόριθμος εντοπισμού των contrails που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελεί τροποποιημένη έκδοση του contrail detection algorithm (CDA), (Mannstein et al., 1999). Ο εντοπισμός των contrails γίνεται σε δορυφορικές εικόνες του ραδιομέτρου SEVIRI, αξιοποιώντας την γραμμική τους μορφή και τη μεγάλη λαμπρότητα τους στο κανάλι των υδρατμών Ch06 στα 7.3 μ m, στα κανάλια του υπερύθρου Ch09 στα 10,8 μ m και Ch10 στα 12,0 μ m και ιδιαίτερα στην διαφορά των δύο καναλιών TD = 10,8 μ m-12 μ m (Lee, 1989). Από την αξιολόγηση του αλγορίθμου προέκυψε ότι εντοπίζονται ορθά το 38% (Probability of detection) των συνολικών contrails, ενώ το 15,5% των αντικειμένων που εντοπίζει ο αλγόριθμος δεν είναι στην πραγματικότητα contrails (False Alarm Ratio). Με δεδομένα του SEVIRI και αξιοποιώντας παρόμοιο αλγόριθμο, οι Graf et al. (2012), πέτυχαν ικανότητα εντοπισμού 10% και ποσοστό λανθασμένων εντοπισμών 1,2%. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας το ραδιόμετρο AVHRR που βρίσκεται σε πολική τροχιά, οι Mannstein et al. (1999) είχαν ικανότητα εντοπισμού 30-50% και ποσοστό λανθασμένου εντοπισμού μόλις 0,1%. Οι διαφορές οφείλονται στη μικρότερη χωρική ανάλυση του SEVIRI σε σχέση με τα ραδιόμετρα δορυφόρων πολικής τροχιάς (Mannstein et al., 2010). Κατά την αξιολόγηση του αλγορίθμου εντοπισμού, έγινε επίσης εμφανές ότι υπάρχει αδυναμία στον εντοπισμό των contrails όταν αυτά βρίσκονται σε ομάδες, ενώ πιο εύκολος και επιτυχής είναι ο εντοπισμός των contrails πάνω από τη θάλασσα, λόγω καλύτερης αντίθεσης στις δορυφορικές εικόνες, όπως επιβεβαιώνεται και από τους Mannstein et al. (1999) και Vázquez-Navarro et al. (2015).



Για την επίτευξη των στόχων, της εργασίας, ο αλγόριθμος αυτόματου εντοπισμού contrails εφαρμόστηκε σε δορυφορικές εικόνες για όλο το έτος 2016 με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Συνολικά εξετάστηκαν 34975 σκηνές – δορυφορικές εικόνες, από τις οποίες μόλις στις 4239 εντοπίστηκε τουλάχιστον ένα contrail. Ο συνολικός αριθμός των contrails που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο είναι 6636. Για αυτά τα contrails, ο αλγόριθμος εντόπισε και κατέγραψε τη θέση τους, το μήκος τους, το πλάτος τους, το εμβαδόν τους, την ώρα και την εποχή εμφάνισης και εντοπισμού, ενώ τέλος υπολόγισε και για κάθε σκηνή το ποσοστό κάλυψής της από contrails.

Η μελέτη του ημερήσιου κύκλου των contrails οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τη διάρκεια της ημέρας εντοπίστηκαν λιγότερες σκηνές που περιλάμβαναν contrails, όμως κάθε σκηνή είχε περισσότερα ή μεγαλύτερων διαστάσεων contrails. Η εποχιακή ανάλυση οδήγησε στον εντοπισμό ενός κύκλου με τα περισσότερα contrails να εντοπίζονται τον χειμώνα και τα λιγότερα το καλοκαίρι.

5.2. Χαρακτηριστικά των contrails

Η μελέτη της γεωγραφικής κατανομής των contrails οδήγησε στον εντοπισμό πέντε περιοχών όπου αυτά παρατηρούνται με μεγαλύτερη συχνότητα. 1) Η περιοχή του Βισκαϊκού κόλπου και της Κελτικής θάλασσας. Περιλαμβάνει και τον μεγαλύτερο αριθμό contrails, 2) Η θαλάσσια περιοχή δυτικά των ΒΔ παραλίων της Ιβηρικής χερσονήσου, 3) Η περιοχή που ορίζεται από το στενό του Γιβραλτάρ και το ΝΔ άκρο της Ιβηρικής χερσονήσου, 4) Η θαλάσσια περιοχή που ορίζεται από τα ΒΔ παράλια της Αλγερίας, μέχρι τις ΝΑ περιοχές των Βαlearίδων νήσων, 5) Η περιοχή ανάμεσα στις Δ ακτές της Τυνησίας και τις Ν ακτές της Σικελίας, με το νότιο όριο της να ορίζεται από τις Πελάγους νήσους και τη Μάλτα. Η πρώτη περιοχή που εντοπίζεται, συμπίπτει με τις παρατηρήσεις των Dekoutsidis & Feidas (2019), που μελέτησαν την ίδια περιοχή και περίοδο με δεδομένα του SEVIRI, καθώς και με τους Mannstein et al. (1999), που χρησιμοποίησαν το ραδιόμετρο AVHRR και τον αλγόριθμο CDA. Η πρώτη και η δεύτερη περιοχή υψηλής συχνότητας εντοπισμού contrails σημειώνονται και από τους Vázquez-Navarro et al. (2015).

Οι πέντε περιοχές υψηλής συχνότητας εντοπισμού contrails, βρίσκονται όλες πάνω από θάλασσα, ενώ οι περισσότερες βρίσκονται επίσης στα δυτικά παράλια ξηράς

σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Bakan et al. (1994). Αυξημένος εντοπισμός πάνω από τη θάλασσα παρατηρείται και από τους Mannstein & Meyer (1997) και Mannstein et al. (1999). Η γεωγραφική κατανομή των εντοπισμένων contrails φαίνεται να έχει ένα ομοιόμορφο πλατό, πάνω στο οποίο εντοπίζονται περιοχές με μέγιστους αριθμούς εντοπισμού. Οι αριθμοί των contrails που εντοπίζονται στις πέντε προαναφερθείσες περιοχές έχουν ημερήσιο αλλά και εποχιακό κύκλο, διακριτό ανά περιοχή.

Κάποια από τα εντοπισμένα contrails μπορούν να αντιστοιχηθούν με γνωστούς αεροδιαδρόμους πυκνής κυκλοφορίας. Πολύ χαρακτηριστικός είναι ο διάδρομος που ενώνει την Ευρώπη με τις Κανάριες νήσους και τη Νότια Αμερική, στα δυτικά της Γαλλίας και της Ιβηρικής χερσονήσου. Γενικότερα όμως, η κατανομή των contrails δεν φαίνεται να έχει κάποια σημαντική αντιστοιχία με την πυκνότητα πτήσεων στην ίδια περιοχή. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Vázquez-Navarro et al. (2015), που χρησιμοποιούν όμοια δεδομένα και μέθοδο, καθώς και οι Duda et al. (2013), οι οποίοι εντοπίζουν λιγότερα contrails στις περιοχές με πυκνή αεροπορική κυκλοφορία τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α.. Αντίθετα οι Duda et al. (2004), παρατηρούν συμφωνία των εντοπισμένων contrails με την αεροπορική κυκλοφορία, μετά, όμως από την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών. Ο μη εντοπισμός contrail σε περιοχές με πυκνή αεροπορική κυκλοφορία πάνω από την ξηρά, όπως για παράδειγμα στο διάδρομο που συνδέει την Κωνσταντινούπολη με το Λονδίνο, ίσως οφείλονται σε αδυναμία του αλγορίθμου, λόγω των ανωμαλιών της επιφάνειας και τον μεγάλο αριθμό περίπλοκων ακτογραμμών. Επιπλέον, ο εντοπισμός των contrails με βάση τη μορφολογία τους, καθίσταται πιο δύσκολος, όταν υπάρχουν πολλά επικαλυπτόμενα contrails σε μία περιοχή. Συνεπώς είναι πιο δύσκολο να εντοπιστούν από τον αλγόριθμο περιοχές όπου διασταυρώνονται πολλά αεροσκάφη (Duda et al., 2013; Mannstein et al., 1999).

Η ανάπτυξη και διατήρηση των contrails, ευνοείται σε περιοχές όπου παρατηρείται υπερκορεσμός ως προς τον πάγο (Duda et al., 2004; Iwabuchi et al., 2012). Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται τα περισσότερα contrails σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, είναι σε καλή συμφωνία με τις περιοχές όπου παρατηρείται πιο συχνά υπερκορεσμός παγοκρυστάλλων (Spichtinger et al., 2003).

Η μελέτη των μορφολογικών χαρακτηριστικών των contrails που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, τα μήκη τους κυμαίνονται από 225 km έως 292,5 km, με τα περισσότερα να βρίσκονται στο κατώτερο όριο αυτού του εύρους. Το κατώτερο όριο ορίστηκε σαν παράμετρος στην διαδικασία εντοπισμού από τον αλγόριθμο για τη μείωση σφαλμάτων. Τα μήκη των contrails που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, είναι σε συμφωνία με το μήκος των 264 km που υπολόγισαν οι Iwabuchi et al. (2012) χρησιμοποιώντας το MODIS. Είναι όμως αρκετά μεγαλύτερα σε σύγκριση με τους Mannstein et al. (1999), που χρησιμοποίησαν δεδομένα του AVHRR και το CDA και εντόπισαν contrails με μήκη από 2,4 km έως 600 km, με το μέσο όρο όμως να είναι 20 km. Με οπτική ανάλυση εικόνων του AVHRR ο Travis (1996) εντόπισε contrails με μέσο μήκος 136,5 km και τυπική απόκλιση 96,4 km, ενώ και οι Vázquez-Navarro et al. (2015) υπολόγισαν μέσο μήκος των contrails 130 km χρησιμοποιώντας δεδομένα του SEVIRI και τον αλγόριθμο εντοπισμού CDA (Mannstein et al., 1999).

Συνολικά τα εντοπισμένα contrails στην παρούσα εργασία, έχουν μέσα πλάτη με εύρος 5,1 km έως 8,1 km, με τα περισσότερα να έχουν μέσο πλάτος περίπου 6,5 km έως 7,5 km. Τα πλάτη αυτά είναι αρκετά μεγαλύτερα τόσο από τους Mannstein et al. (1999), 2,8 km, και από τον Travis (1996), 2,9 km, που χρησιμοποίησαν εικόνες του AVHRR με αυτόματο (CDA) και οπτικά μέσα εντοπισμού αντίστοιχα, καθώς και τους Duda et al. (2013), 3,75 – 5,23 km που χρησιμοποίησαν εικόνες του MODIS. Είναι όμως σε καλύτερη συμφωνία με τους Vázquez-Navarro et al. (2015), που βρήκαν μέσο πλάτος 7,8 km (τυπική απόκλιση 2 km), χρησιμοποιώντας ίδια δεδομένα του SEVIRI, παρόμοιο αλγόριθμο (CDA) και ίδια μέθοδο υπολογισμού, καθώς και με τους Iwabuchi et al. (2012) και Duda et al. (2004), που υπολόγισαν μέσο πλάτος 6,5 km και 8 km αντίστοιχα.

Οι περιοχές στην ανώτερη τροπόσφαιρα/κατώτερη στρατόσφαιρα στις οποίες εντοπίζεται υπερκορεσμός σε παγοκρυστάλλους και ευνοείται η ανάπτυξη και διατήρηση των contrails έχουν διάμετρο 100 – 200 km (Travis, 1996) και 150 km (Gierens & Spichtinger, 2000). Συνεπώς τα μήκη και πλάτη των contrails που έχουν υπολογιστεί στην παρούσα εργασία συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις διαστάσεις αυτών των περιοχών, με τις οποίες ταυτίζονται γεωγραφικά. Τέλος, το εμβαδόν των contrails που εντοπίστηκαν βρίσκεται μεταξύ 993 km² και 1463 km². Το μήκος, το μέσο πλάτος και το εμβαδόν των contrails, δεν παρουσιάζουν κάποιο ημερήσιο ή εποχιακό κύκλο.

Με βάση το εμβαδόν των contrails, υπολογίστηκε η ολική κάλυψη της εκάστοτε σκηνής από contrails. Βρέθηκε ότι η πλειονότητα των σκηνών καλύπτονταν από contrails σε ποσοστό 0,0255 % – 0,029 % της έκτασής τους. Η μεγαλύτερη κάλυψη που εντοπίστηκε ήταν περίπου 0,085%. Τα ποσοστά κάλυψης ήταν όμοια την ημέρα και τη νύχτα, εντοπίζεται όμως εποχιακός κύκλος με το μέγιστο να είναι τους χειμερινούς μήνες. Σε παγκόσμια κλίμακα έχει υπολογιστεί κάλυψη από contrails 0,06 % – 0,27 % από τους Frömming et al. (2011) και 0,23 % από τους Burkhardt & Kärcher (2011). Για το βόρειο ημισφαίριο, οι Duda et al. (2013), υπολόγισαν κάλυψη 0,07% - 0,4%, χρησιμοποιώντας τροποποιημένη έκδοση του CDA. Πάνω από την κεντρική Ευρώπη σε περιοχή όμοια με αυτή της παρούσας εργασίας, οι Mannstein & Meyer (1997) και Mannstein et al. (1999), βρήκαν μεγαλύτερη κάλυψη, $0,5\% \pm 0,25\%$ με τοπικά μέγιστα μέχρι και 1,2%, εφαρμόζοντας όμως τον αλγόριθμο αυτόματου εντοπισμού CDA στις εικόνες του ραδιομέτρου AVHRR. Στην ίδια εργασία εντοπίζεται και ημερήσιος κύκλος, με την κάλυψη από τα νυχτερινά contrails (0.2%) να είναι περίπου το ένα τρίτο των contrails που εντοπίστηκαν την ημέρα (0.7%). Όμοια οι Bakan et al. (1994), εντοπίζουν διπλάσια κάλυψης από contrails την ημέρα σε σχέση με τη νύχτα, ενώ αντιθέτως ο Travis (1996), υποστηρίζει ότι η χωρική κάλυψη από τα contrails είναι μεγαλύτερη τη διάρκεια της νύχτας. Τέλος η εποχιακή μεταβολή στον αριθμό και τη θέση των contrails που παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία (μέγιστη κάλυψη τον χειμώνα), συμφωνεί με τα αποτελέσματα πολλών άλλων ερευνητών (Bakan et al., 1994; Duda et al., 2013; Mannstein & Meyer, 1997; Mannstein et al., 1999; Palikonda et al., 2005). Η εμφανιζόμενη εποχική μεταβολή δύναται να οφείλεται στην καλύτερη ικανότητα εντοπισμού των contrails από τον αλγόριθμο σε αυτή την εποχή (Mannstein et al., 1999).

5.3. Ατμοσφαιρικές παράμετροι που ευνοούν την εμφάνιση contrails

Για κάθε εικονοστοιχείο που περιείχε contrail ταυτοποιήθηκαν η θερμοκρασία, η σχετική και ειδική υγρασία και η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Προέκυψε ότι τα contrails εντοπίστηκαν σε περιβάλλοντα με θερμοκρασίες από 204 K έως 232 K (-69,15 °C έως -41,15 °C) με τον μέγιστο αριθμό να βρίσκεται σε θερμοκρασίες από 218 K έως 226 K (-55,15 °C έως -47,15 °C). Οι θερμοκρασίες αυτές είναι μικρότερες από αυτές που βρήκαν οι Mannstein et al. (1999), και ήταν 264 K – 272 K (-9,15 °C έως -1,15 °C), αλλά

συμφωνούν με αυτές που υπολόγισαν οι Iwabuchi et al. (2012), 210 K – 231 K (-63,15 °C έως -42,15 °C).

Αναφορικά με τη σχετική υγρασία, τα περισσότερα contrails εντοπίζονται σε κορεσμένο ή υπερκορεσμένο περιβάλλον, δηλαδή $RH \geq 100\%$ περίπου. Οι Iwabuchi et al. (2012) εντοπίζουν τα contrails σε περιβάλλοντα με υπερκορεσμό ως προς τον πάγο, $RHI = 125\%$. Αυτή η τιμή μεταφράζεται σε κατάσταση κοντά στον κορεσμό ως προς την υγρή φάση $RH=100\%$. (Σχετική υγρασία 75% ως προς την υγρή φάση σε περιβάλλον με θερμοκρασία -30°C είναι κατάσταση υπερκορεσμού ως προς τον πάγο (Dominguez, 2011)). Για την ειδική υγρασία τέλος βρέθηκε ότι τα contrails εντοπίζονται στο εύρος $0,025\text{ gr/kg} - 0,05\text{ gr/kg}$. Τόσο η θερμοκρασία, όσο και η σχετική και ειδική υγρασία, που επικρατούν όταν εντοπίζονται contrails, δεν εμφανίζουν σημαντικές ημερήσιες ή εποχικές μεταβολές.

Ο άνεμος μελετήθηκε αρχικά ως προς τις δύο συνιστώσες του (ζωνική και μεσημβρινή) και στη συνέχεια, διανυσματικά. Από την ζωνική συνιστώσα προέκυψε ότι τα contrails σχηματίζονται συχνότερα σε περιβάλλοντα με Δυτικό άνεμο ταχύτητας από 5 m/s έως 35 m/s . Στην μεσημβρινή συνιστώσα δεν εντοπίστηκε προτίμηση σε κάποια φορά του ανέμου. Το μέγιστο των εντοπισμένων contrails βρίσκεται στο εύρος από -10 m/s (Βοριάς) έως 10 m/s (Νοτιάς). Τέλος αφότου υπολογίστηκε ο διανυσματικός άνεμος, προέκυψε ότι τα περισσότερα contrails παρατηρήθηκαν σε περιβάλλοντα με ανέμους έντασης από 10 m/s έως 30 m/s που είναι αρκετά μικρές τιμές για αυτό το επίπεδο της ατμόσφαιρας. Όσο για τη διεύθυνση του διανυσματικού ανέμου, τα περισσότερα contrails εντοπίζονται όταν ο άνεμος πνέει από τις 240° έως τις 260° , δηλαδή είναι Δ – ΝΔ. Οι ταχύτητες και διευθύνσεις του ανέμου που επικρατεί όταν εντοπίζονται contrails, δεν εμφανίζουν σημαντική ημερήσια ή εποχική μεταβολή.

5.4. Μελέτη περίπτωσης

Η εργασία ολοκληρώθηκε με την εκπόνηση μιας μελέτης περίπτωσης. Επιλέχθηκε μία σκηνή στις 11/08/2016 και ώρα 06:00 UTC. Σε αυτή τη χρονική στιγμή στην περιοχή της Κεντρικής και Βόρειας Γαλλίας και το Βισκαϊκό κόλπο, εντοπίζεται μια έξαρση των contrails. Σύμφωνα με τους Mannstein et al. (1999) τα contrails συνήθως εμφανίζονται σε μεγάλες ομάδες που εντοπίζονται σε περιοχές όπου στο μέσο ύψος πτήσης των

αεροσκαφών υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξή τους. Η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων μεμονωμένων καναλιών του SEVIRI, καθώς και διαφορών θερμοκρασίας και χρωματικών συνδυασμών RGB, οδήγησε στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την ίδια την μικροφυσική των contrails αλλά και για το περιβάλλον στο οποίο εντοπίζονται. Από τα τρία «ηλιακά» κανάλια, Ch1 0.6 μm , Ch2 0.8 μm και Ch3 1.6 μm , αυτά δηλαδή που εντοπίζουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, προέκυψε ότι τα contrails είναι στοιχεία με μικρό οπτικό πάχος. Παράλληλα, από το κανάλι Ch3, συμπεραίνεται ότι αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους. Στα κανάλια των υδρατμών, Ch5 6.2 μm , και Ch6 7.3 μm , εντοπίζονται και πάλι τα contrails, ενώ στην ευρύτερη περιοχή της έξαρσης γίνονται εμφανή και πολλά νέφη τύπου cirrus. Επίσης εντοπίζεται ένα σύνορο με απότομη μεταβολή της υγρασίας, που διαχωρίζει την περιοχή που παρατηρείται η έξαρση. Τέλος από τα κανάλια του ατμοσφαιρικού παραθύρου, Ch7 8.7 μm , Ch9 10.8 μm και Ch10 12.0 μm προκύπτουν όμοια συμπεράσματα.

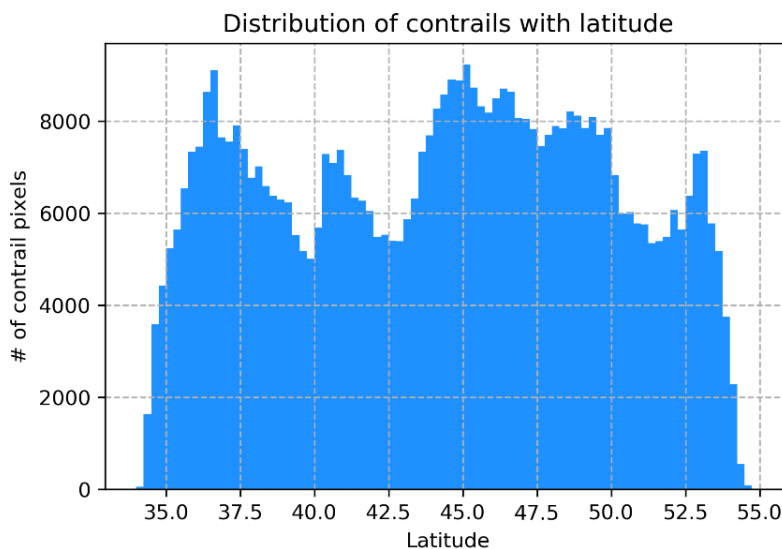
Η διαφορά θερμοκρασίας Ch9 10.8 μm – Ch10 12.0 μm αποτελεί το βασικό εργαλείο εντοπισμού των contrails (Lee, 1989). Το έντονο λευκό χρώμα με το οποίο αναπαρίστανται, επιβεβαιώνει την σύνθεσή τους από παγοκρυστάλλους. Το χαρακτηριστικό αυτό παρατηρείται και στη χρωματική σύνθεση φυσικού χρώματος. Από την χρωματική σύνθεση των αερίων μαζών, προκύπτει ότι η αέρια μάζα στην οποία παρατηρείται η έξαρση των contrails είναι ψυχρή και με αρκετά μεγάλα ποσά υγρασίας σε συμφωνία με τους Iwabuchi et al. (2012). Η αέρια αυτή μάζα έχει διακριτά όρια από τις θερμότερες γειτονικές της. Τέλος από την χρωματική σύνθεση των καταιγίδων προκύπτει ότι τα contrails αποτελούνται κατά πάσα πιθανότητα από μικρού και μετρίου μεγέθους παγοκρυστάλλους, όπως παρατηρείται και από τους Gayet et al. (1996), Gothe & Graßl (1993) και Schumann et al. (2012).

6. Παράρτημα

6.1. Γεωγραφικό πλάτος και μήκος

Το ιστόγραμμα της κατανομής των *contrails* ως προς το γεωγραφικό πλάτος δίνεται στην Εικόνα 93. Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή του ιστογράμματος, βρέθηκε το γεωγραφικό πλάτος κάθε εικονοστοιχείου που ανήκει σε *contrail*, εντοπισμένο από τον αλγόριθμο εντοπισμού. Στο ιστόγραμμα εμφανίζονται τέσσερις κορυφές. Άρα εντοπίζονται και τέσσερις ζώνες γεωγραφικών πλατών στις οποίες είναι πιο συχνός ο εντοπισμός των *contrails*.

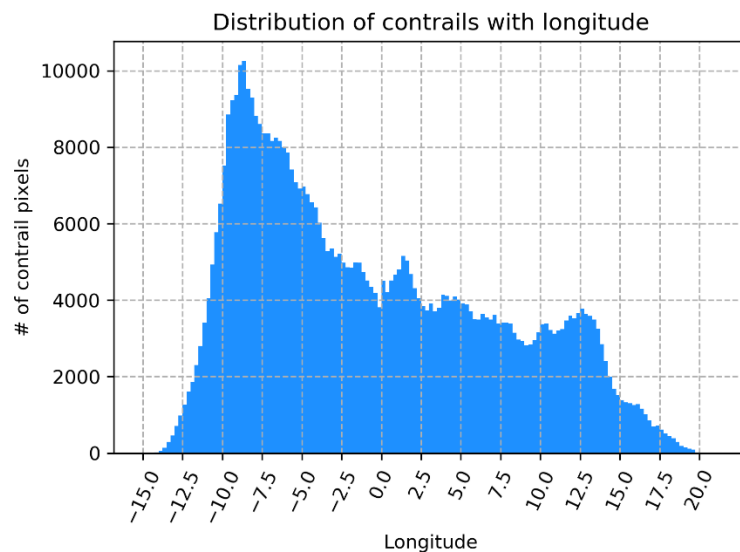
Η πρώτη από αυτές τις ζώνες, έχει το μέγιστό της περίπου στις 37° Β. Πρόκειται για μια λεπτή ζώνη, στην οποία όμως εμφανίζονται *contrails* αρκετά συχνά. Η δεύτερη ζώνη εντοπίζεται στις 40°-41° Β. Πρόκειται και πάλι για στενή ζώνη, στην οποία εντοπίζονται *contrails* με μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές, αλλά μικρότερη σε σχέση με την πρώτη ζώνη. Η τρίτη ζώνη είναι αρκετά εκτεταμένη, καθώς καλύπτει μία περιοχή περίπου από τις 43° Β μέχρι τις 50° Β. Σε αυτή τη ζώνη εμφανίζεται ο μεγαλύτερος αριθμός των εντοπισμένων *contrails*. Τέλος η τέταρτη ζώνη είναι όμοια με την δεύτερη. Είναι στενή, καλύπτει περιοχή περίπου από τις 52,5° Β, μέχρι τις 53° Β, και περιλαμβάνει αριθμό *contrails* όμοιο με την δεύτερη ζώνη.



Εικόνα 93: Ιστόγραμμα κατανομής των εικονοστοιχείων των *contrails* με βάση το γεωγραφικό τους πλάτος. Έτος: 2016, Περιοχή: ΔΟ1.

Συνολικά, παρατηρείται ότι τα contrails εντοπίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, σε μία ζώνη από τις 43° Β μέχρι τις 50° Β, με εξαίρεση μία λεπτή ζώνη μεγάλης συχνότητας περίπου στις 37° Β. Γενικά όμως, αν και η συχνότητα με την οποία εντοπίζονται contrails σε αυτές τις δύο ζώνες είναι μεγάλη, παρατηρείται μία σχετική ομοιομορφία στην κατανομή.

Το αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατανομή των contrail με το γεωγραφικό μήκος παρατίθεται στην Εικόνα 94. Σε αντίθεση με την κατανομή ως προς το γεωγραφικό πλάτος, στην κατανομή ως προς το γεωγραφικό μήκος, εμφανίζεται μία εμφανής κορυφή. Μία ζώνη περίπου από τις 10° Δ, μέχρι περίπου τις 5° Δ, περιλαμβάνει μακράν περισσότερα εντοπισμένα contrails απ' ότι οποιαδήποτε άλλη ζώνη γεωγραφικών μηκών.



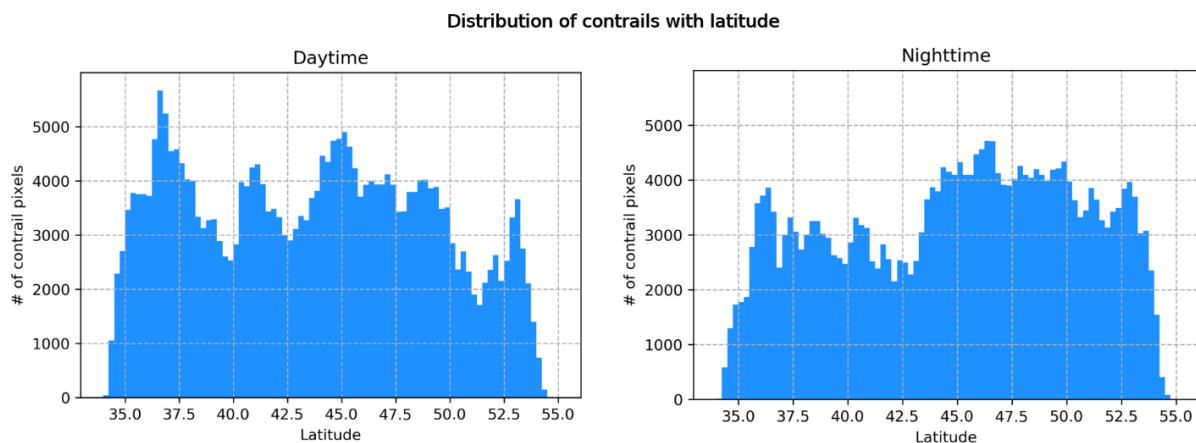
Εικόνα 94: Ιστόγραμμα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails με βάση το γεωγραφικό τους μήκος. Έτος: 2016, Περιοχή: ΔΟ1.

- Αποτελέσματα από σύγκριση ημέρας – νύχτας

Αρχικά εξετάζεται και πάλι η κατανομή των contrails με βάση το γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Στην Εικόνα 95, παρακάτω, φαίνονται τα ιστογράμματα για την κατανομή των contrails την ημέρα και τη νύχτα, ως προς το γεωγραφικό πλάτος.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η κατανομή εμφανίζει τέσσερις κορυφές, δηλαδή τέσσερις ζώνες γεωγραφικών πλατών στις οποίες εντοπίστηκε μεγαλύτερος αριθμός από contrails. Η πρώτη τέτοια ζώνη είναι αρκετά λεπτή και βρίσκεται περίπου στις 37° Β. Η δεύτερη ζώνη περιέχει μικρότερο αριθμό από contrails. Είναι επίσης αρκετά στενή και

εκτείνεται περίπου στις 40° B – 42°B. Η τρίτη ζώνη είναι η πιο εκτεταμένη από τις τέσσερις. Βρίσκεται στην περιοχή από 44°B έως 50°B. Η μέγιστη συχνότητα εντοπισμού contrails σε αυτή τη ζώνη εντοπίζεται περίπου στις 45° B. Τέλος η τέταρτη κορυφή είναι και πάλι στενή και βρίσκεται περίπου στις 53° B. Περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό contrails από τις γειτονικές περιοχές αλλά μικρότερο από τις άλλες κορυφές.



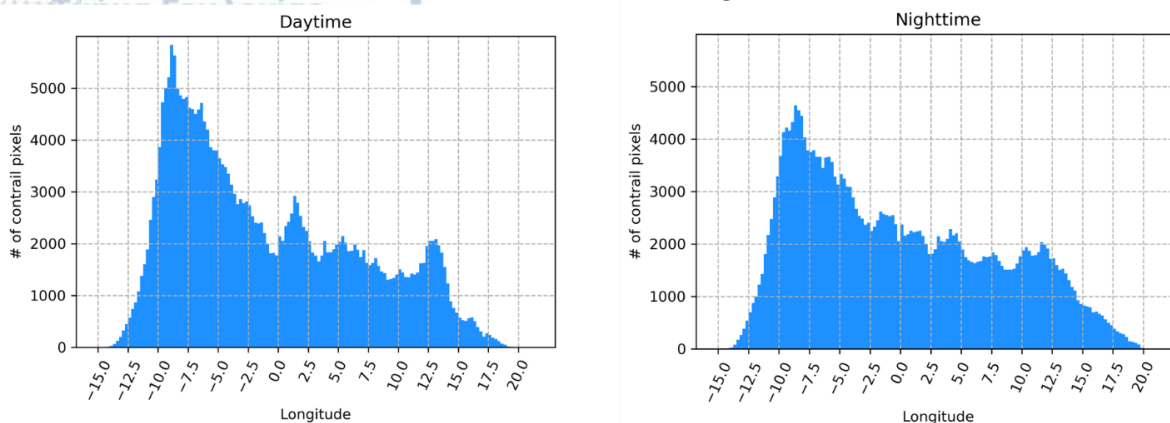
Εικόνα 95: Σύγκριση ημέρας (αριστερά) – νύχτας (δεξιά), για την κατανομή των contrails ως προς το γεωγραφικό πλάτος. Περιοχή D01, 2016

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η εικόνα του ιστογράμματος είναι αρκετά διαφορετική. Η κορυφή που εντοπίζεται και κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 37° B παραμένει, αλλά περιλαμβάνει μικρότερο αριθμό από contrails. Η πλειονότητα των contrails εντοπίζεται σε μία ζώνη από τις 43° B μέχρι τις 53° B.

Συγκεφαλαιώνοντας, κατά τη διάρκεια της ημέρας προκύπτει ότι, αν και υπάρχουν κάποιες ζώνες με μεγαλύτερες τιμές εντοπισμένων contrails, γενικά υπάρχει μια αρκετά ομοιόμορφη κατανομή. Αντίθετα κατά τη διάρκεια της νύχτας υπάρχει μια σαφής προτίμηση για εντοπισμό των contrails στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, πάνω από τις 43° B.

Τα αντίστοιχα ιστογράμματα για την κατανομή των συχνοτήτων εντοπισμού των contrail ως προς το γεωγραφικό μήκος, δίδονται στην Εικόνα 96. Σε αντίθεση με το γεωγραφικό πλάτος, εδώ οι δύο κατανομές εμφανίζουν πολλές ομοιότητες. Τόσο την ημέρα, όσο και τη νύχτα ο μεγαλύτερος αριθμός των contrails εντοπίζεται περίπου στις 10° Δ. Σαφώς εμφανίζονται και άλλες κορυφές στα δύο ιστογράμματα, όμως περιλαμβάνουν πολύ μικρότερους αριθμούς εντοπισμένων contrails.

Distribution of contrails with longitude



Εικόνα 96: Σύγκριση ημέρας (αριστερά) – νύχτας (δεξιά), για την κατανομή των contrails ως προς το γεωγραφικό μήκος. Περιοχή D01, 2016

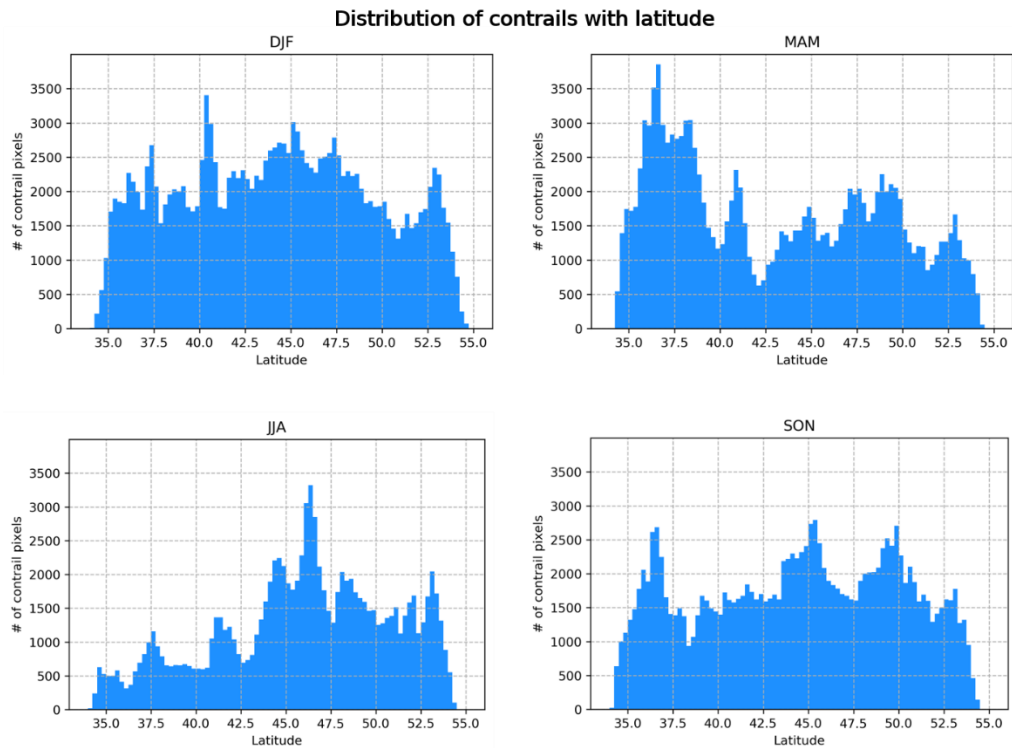
Εν κατακλείδι, προέκυψε ότι η κατανομή των συχνοτήτων εντοπισμού των contrails ως προς το γεωγραφικό πλάτος παρουσιάζει διαφοροποίηση μεταξύ ημέρας και νύχτας. Την ημέρα η κατανομή είναι σχετικά ομοιόμορφη με μία ζώνη στις 37° B να περιλαμβάνει τα περισσότερα contrails. Αντίθετα, τη νύχτα υπάρχει μία προτίμηση στον εντοπισμό των contrails στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, βόρεια των 43°B. Για την κατανομή ως προς το γεωγραφικό μήκος όμως οι διαφορές μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι μικρές. Τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα ο μέγιστος αριθμός των contrails εμφανίζεται σε μία ζώνη με μέγιστο τις 10° Δ.

- Αποτελέσματα από σύγκριση εποχών

Σχετικά με την γεωγραφική κατανομή των contrails, μελετάται αρχικά, και πάλι, η κατανομή των εντοπισμένων contrail ως προς το γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Τα ιστογράμματα από την εποχιακή ανάλυση για την κατανομή των contrail ως προς το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, παρατίθενται παρακάτω, Εικόνα 97 και Εικόνα 98 αντίστοιχα.

Αναφορικά με το γεωγραφικό πλάτος, σε όλες τις εποχές, παρατηρείται αυξημένη συχνότητα εντοπισμού contrails από τις 43° B μέχρι και τις 50° B περίπου. Σε όλες τις εποχές, εκτός από το καλοκαίρι, εντοπίζεται μία ζώνη με μεγάλη συχνότητα εντοπισμού contrails στα μικρά γεωγραφικά πλάτη. Ειδικότερα την άνοιξη και το φθινόπωρο, υπάρχει μία σαφής προτίμηση στον εντοπισμό των contrails κάτω από τις 38° B. Το καλοκαίρι, αντιθέτως, εντοπίζεται μια ζώνη περίπου στις 46° B, στην οποία

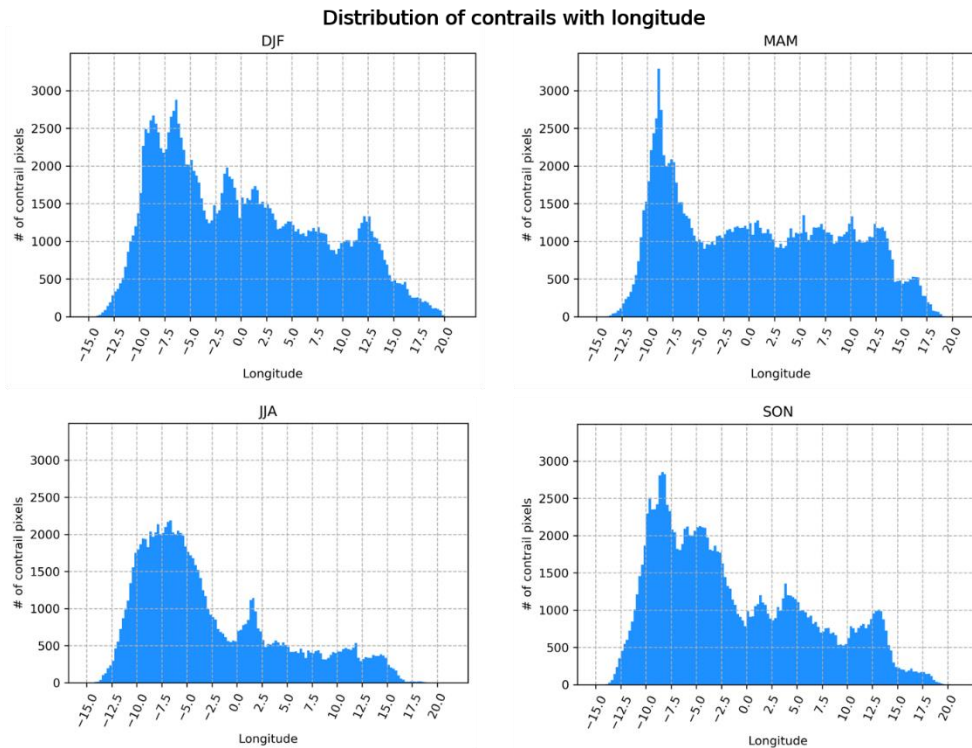
μεγιστοποιείται ο αριθμός των εντοπισμένων contrails. Χαρακτηριστικά μικρή είναι η συχνότητα εντοπισμού contrails στα μικρά γεωγραφικά πλάτη, τα οποία προτιμώνται τις άλλες εποχές. Το χειμώνα οι συχνότητες εντοπισμού contrails είναι αρκετά μοιρασμένες, και δεν εμφανίζεται κάποια σημαντική κορυφή.



Εικόνα 97: Εποχιακή ιστογράμματα κατανομής εντοπισμού contrails ως προς γεωγραφικό πλάτος. Περιοχή D01, 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

Από τα παραπάνω, και τα ιστογράμματα της Εικόνας 97, προκύπτει ότι με την εναλλαγή των εποχών, υπάρχει και μεταβολή των ζωνών γεωγραφικού πλάτους, στις οποίες εντοπίζονται τα περισσότερα contrails. Το χειμώνα, δεν υπάρχει κάποια σαφής ζώνη στην οποία τα contrails εντοπίζονται με σημαντικά μεγαλύτερη συχνότητα. Ελαφρά μεγαλύτερη συχνότητα εντοπισμού υπάρχει σε μία ζώνη από τις 43° Β μέχρι τις 47,5° Β περίπου. Μεταβαίνοντας στην άνοιξη, εμφανίζεται πλέον μία ξεκάθαρη ζώνη με μεγαλύτερες συχνότητες εντοπισμού. Η ζώνη αυτή βρίσκεται σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη απ' ότι το χειμώνα, και είναι περίπου στις 36° Β με 38° Β. Το καλοκαίρι τα αποτελέσματα αλλάζουν σημαντικά. Η ζώνη μικρών γεωγραφικών πλατών που σημειώθηκε την άνοιξη, περιλαμβάνει πλέον τα λιγότερα contrails. Η ζώνη με τον μεγαλύτερο αριθμό εντοπισμένων contrails, είναι πλέον βορειότερα, περίπου στις 44° Β

με 47° Β. Τέλος με την μετάβαση στο φθινόπωρο, παρατηρούνται και πάλι μεγάλες τιμές εντοπισμού contrails στις ζώνες μικρών γεωγραφικών πλατών. Όμως γενικότερα η συμπεριφορά μοιάζει με αυτή του χειμώνα. Χωρίς ξεκάθαρες ζώνες μεγάλων τιμών εντοπισμού, αλλά με μία ελαφριά προτίμηση στην περιοχή 44° Β με 50° Β.

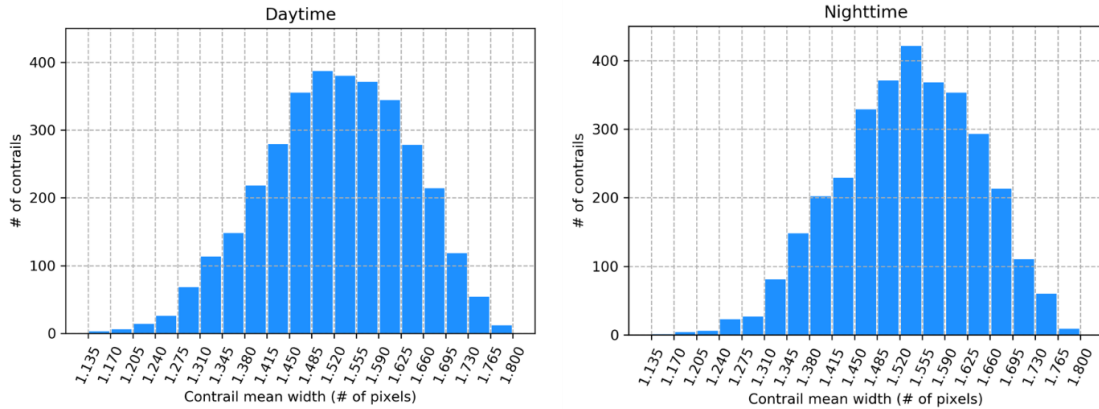


Εικόνα 98: Εποχιακή ιστογράμματα κατανομής εντοπισμού contrails ως προς γεωγραφικό μήκος. Περιοχή D01, 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

Τα αποτελέσματα για την κατανομή των contrails κατά γεωγραφικό μήκος, για τις τέσσερις εποχές, συνοψίζονται στα ιστογράμματα της Εικόνας 98. Αμέσως γίνεται εμφανές ότι η εποχιακή μεταβολή είναι πάρα πολύ μικρή. Και στις τέσσερις εποχές, ο εντοπισμός των contrails γίνεται με μέγιστη συχνότητα σε μία ζώνη από τις 11° Δ έως τις 3° Δ περίπου. Το μέγεθος αυτής της ζώνης, και ο αριθμός των εντοπισμένων contrails, εμφανίζουν πολύ μικρές μεταβολές. Το καλοκαίρι η ζώνη αυτή είναι σχεδόν η μοναδική κορυφή του ιστογράμματος και περιλαμβάνει με μεγάλη διαφορά το μεγαλύτερο αριθμό εντοπισμένων contrails. Όμοια είναι η εικόνα και την άνοιξη. Το χειμώνα και το φθινόπωρο εντοπίζονται contrails με αρκετά μεγάλη συχνότητα και σε άλλες περιοχές. Από αυτές ξεχωρίζει ελαφρά μία ζώνη περίπου στις 12,5° Α.

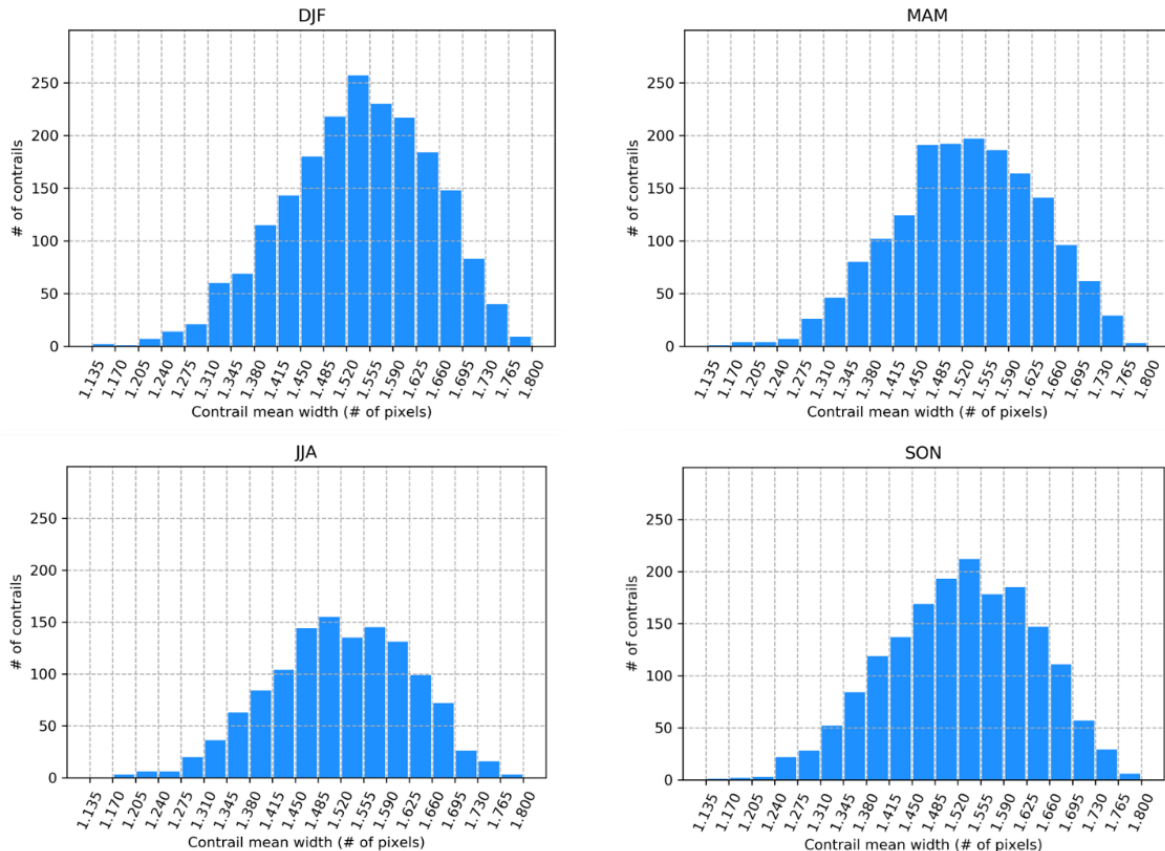
6.2. Μέσο πλάτος

Contrail mean width in pixels



Εικόνα 99: Ιστογράμματα κατανομής των εντοπισμένων contrails ως προς το μέσο πλάτος τους. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

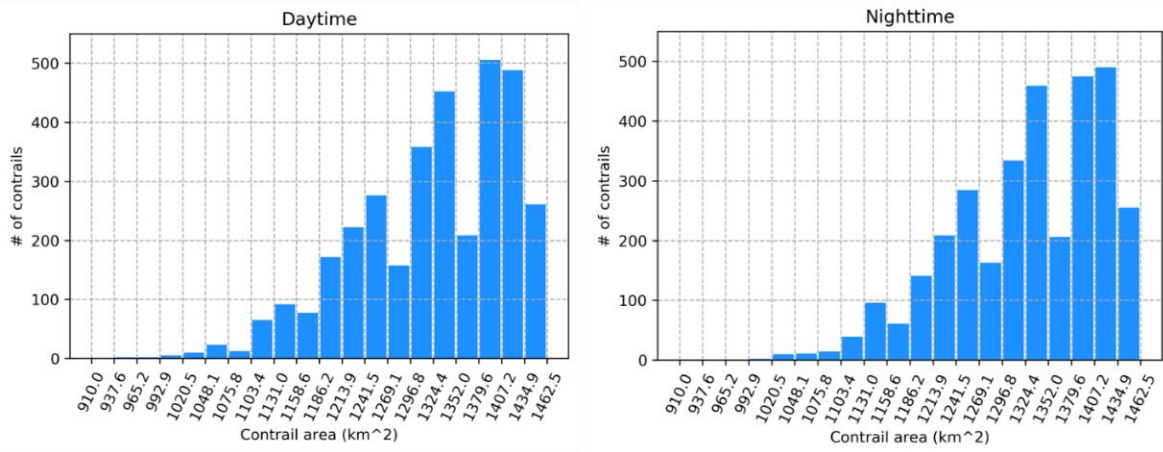
Contrail mean width in pixels



Εικόνα 100: Εποχιακή σύγκριση κατανομών των contrails ως προς το μέσο πλάτος τους. Περιοχή D01, 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

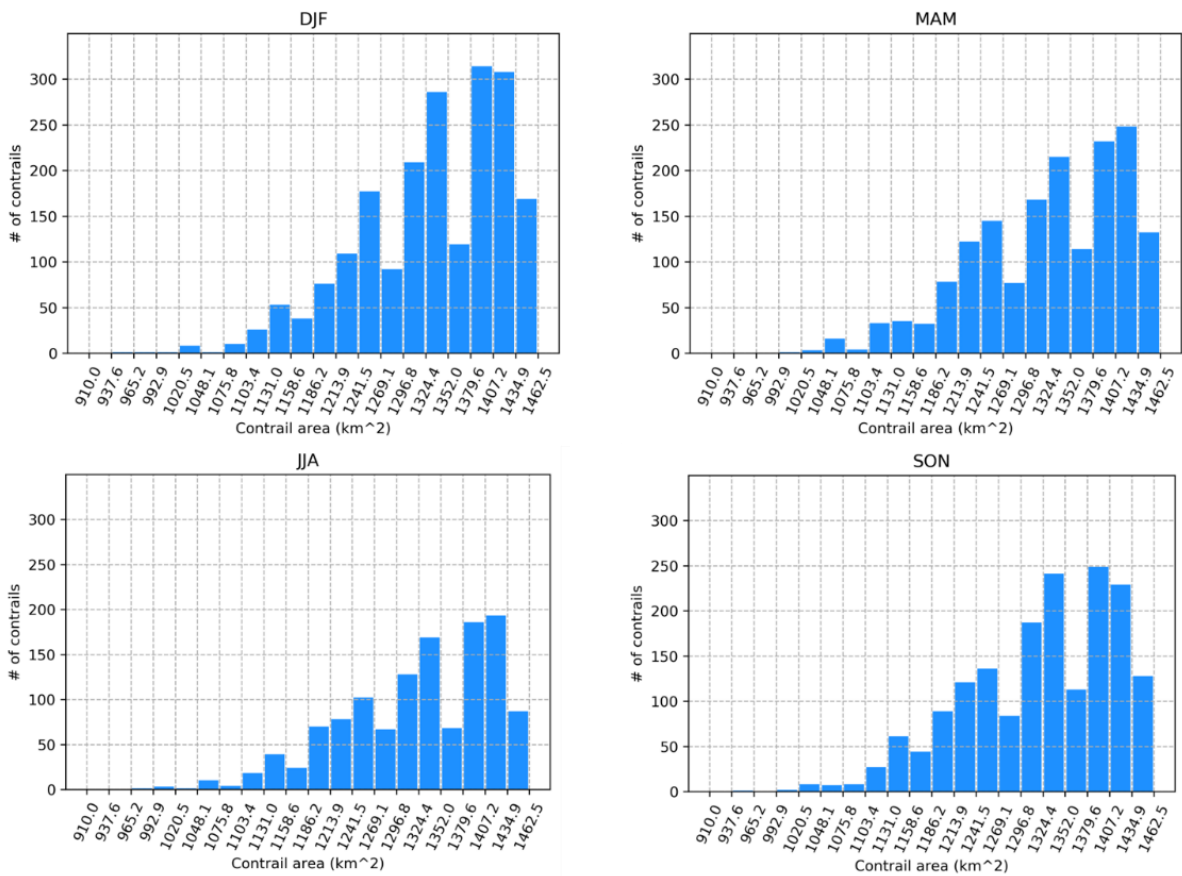
6.3. Εμβαδόν

Contrail area in km²



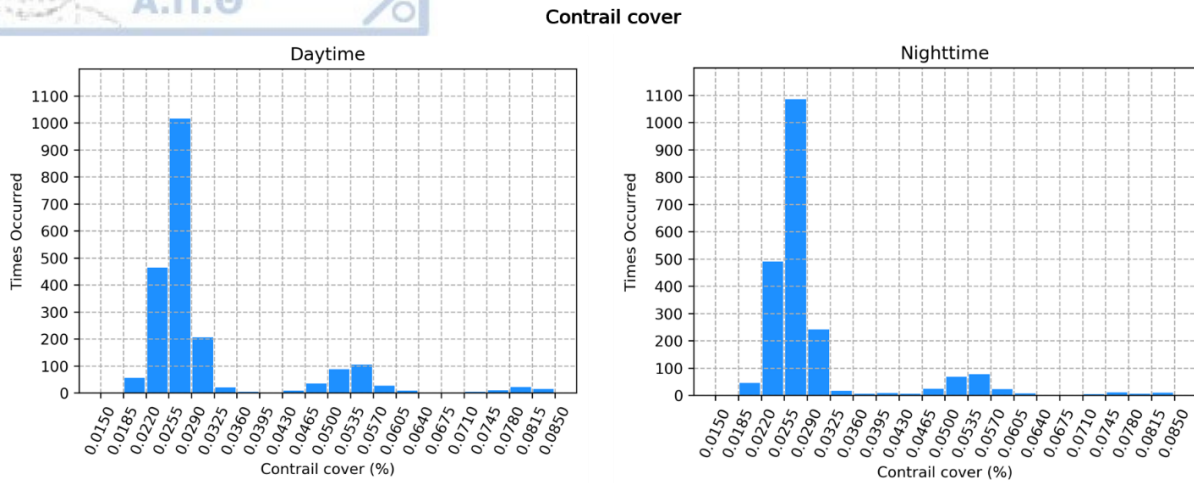
Εικόνα 101: Ιστογράμματα κατανομής των εντοπισμένων contrails ως προς το εμβαδό τους. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: Δο1, Έτος: 2016.

Contrail area in km²



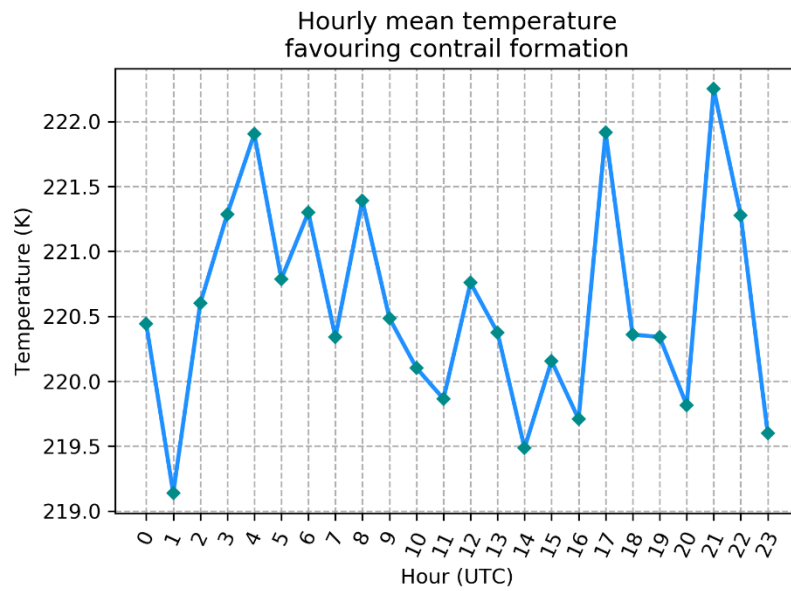
Εικόνα 102: Εποχιακή σύγκριση κατανομών των contrails ως προς το εμβαδό τους. Περιοχή Δο1, 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

6.4. Κάλυψη



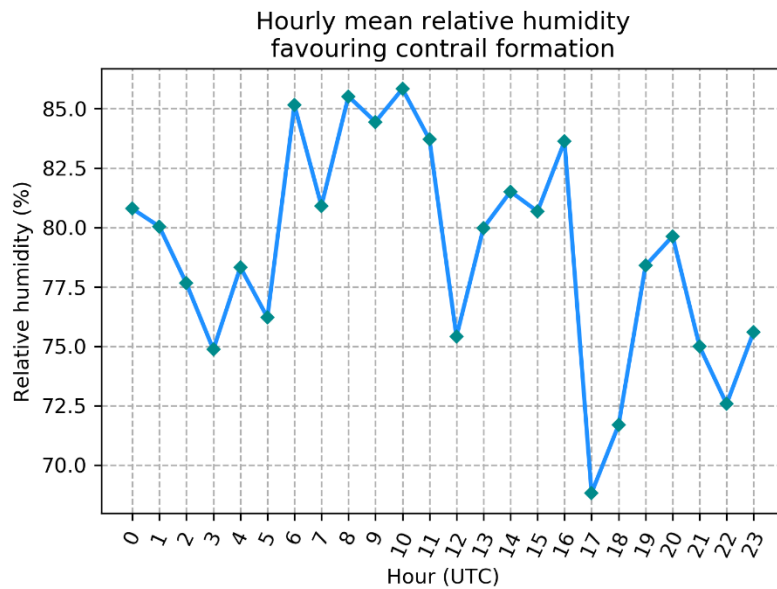
Εικόνα 103: Σύγκριση ποσοστού κάλυψης της σκηνής από contrails την ημέρα (αριστερά) και τη νύχτα (δεξιά). Περιοχή D01, 2016.

6.5. Θερμοκρασία

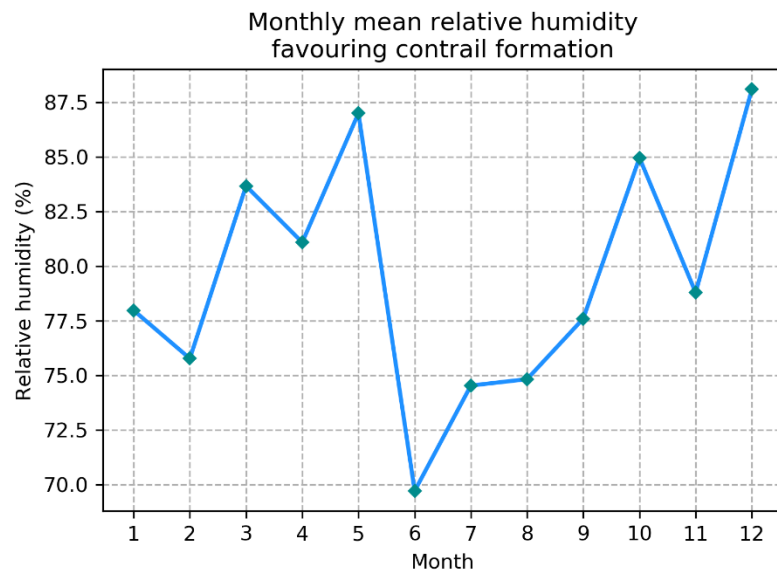


Εικόνα 104: Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

6.6. Σχετική υγρασία

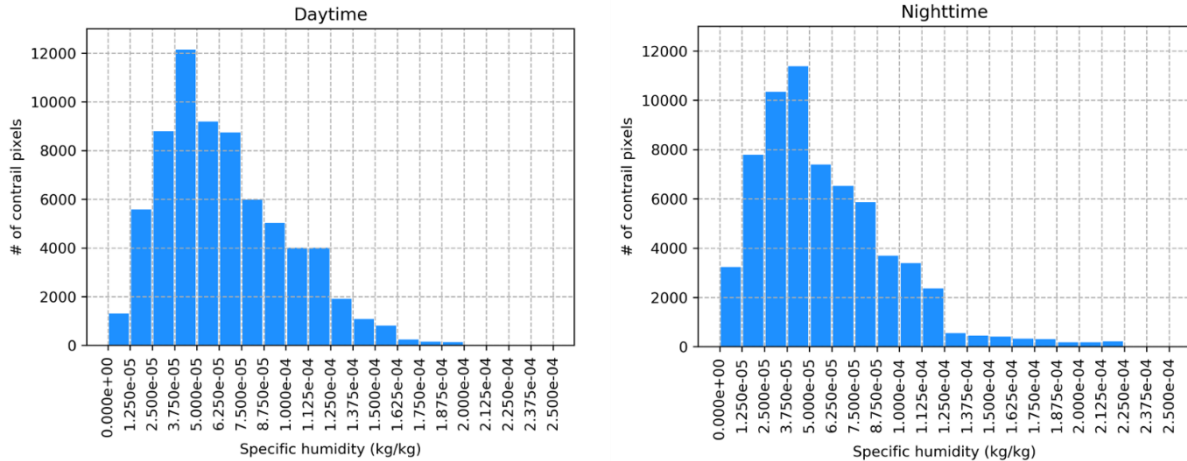


Εικόνα 105: Σχετική υγρασία στα εικονοστοιχεία των contrails. Μέσες τιμές για κάθε ώρα. Περιοχή D01, Έτος 2016.



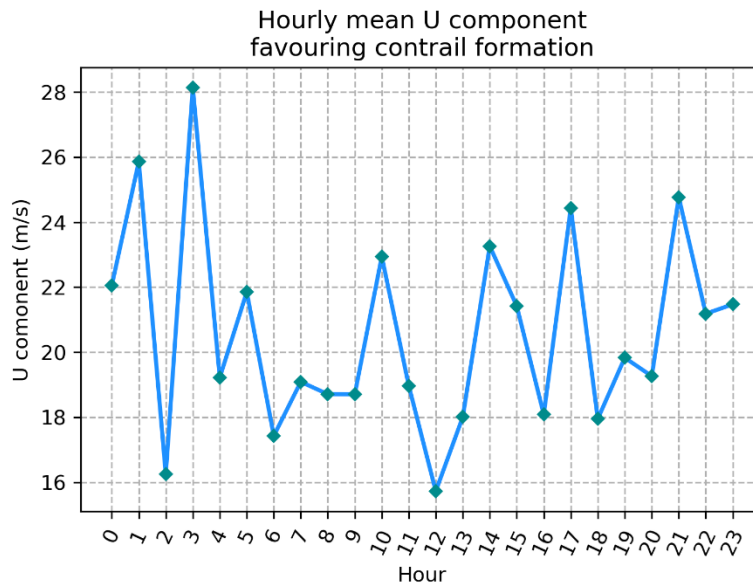
Εικόνα 106: Σχετική υγρασία στα εικονοστοιχεία των contrails. Μέσες τιμές για κάθε μήνα. Περιοχή D01, Έτος 2016.

Specific humidity favoring contrail formation

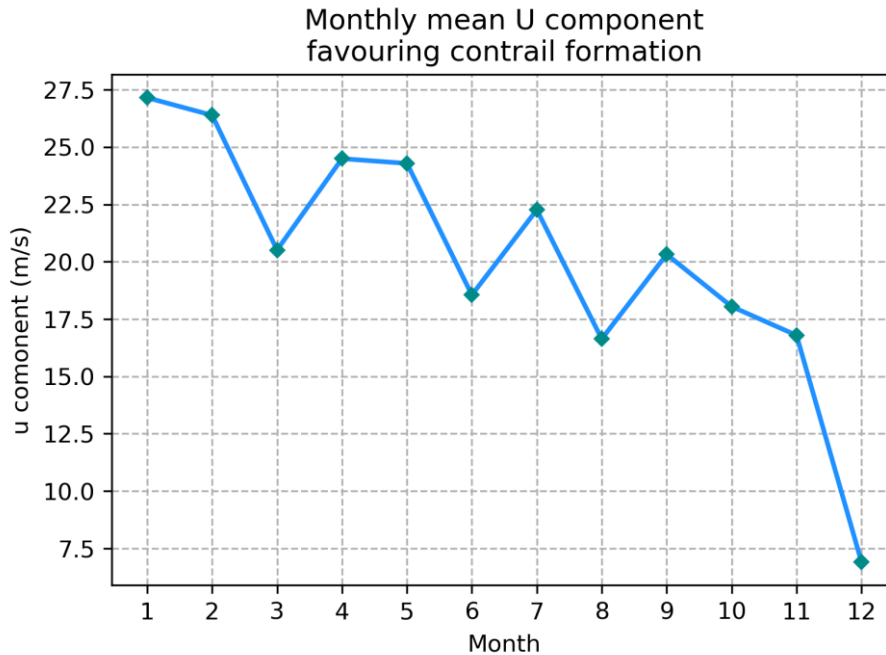


Εικόνα 107: Ιστογράμματα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την ειδική υγρασία. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: ΔΟ1, Έτος: 2016.

6.8. Ζωνική συνιστώσα του ανέμου

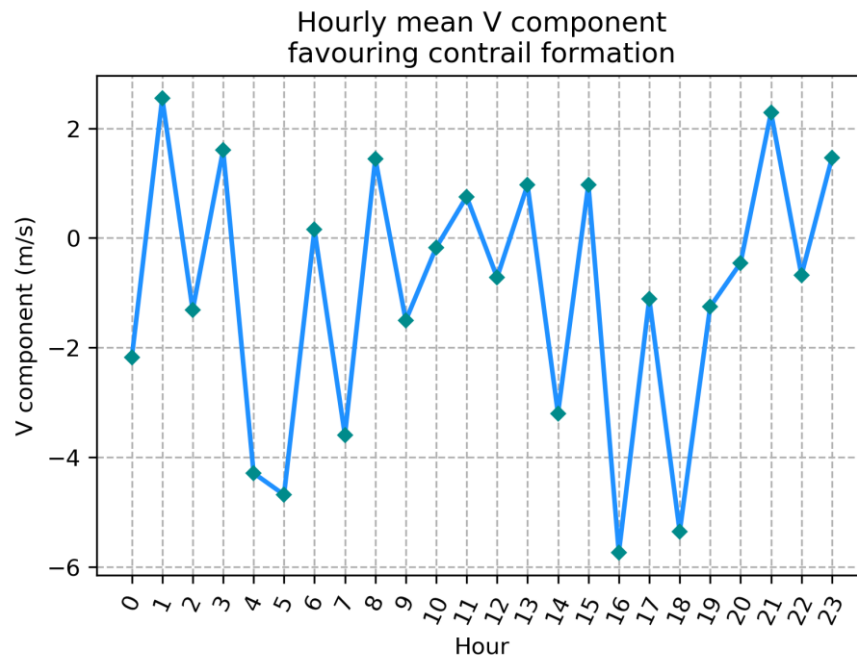


Εικόνα 108: Μέσες ωριαίες τιμές έντασης ζωνικής συνιστώσας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: ΔΟ1, Έτος: 2016.



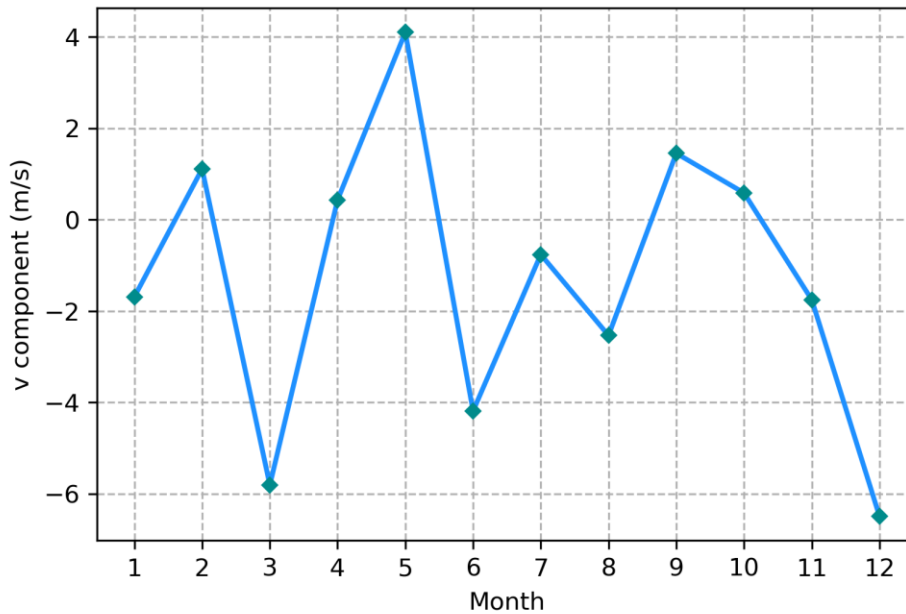
Εικόνα 109: Μέσες μηνιαίες τιμές έντασης ζωνικής συνιστώσας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

6.9. Μεσημβρινή συνιστώσα του ανέμου



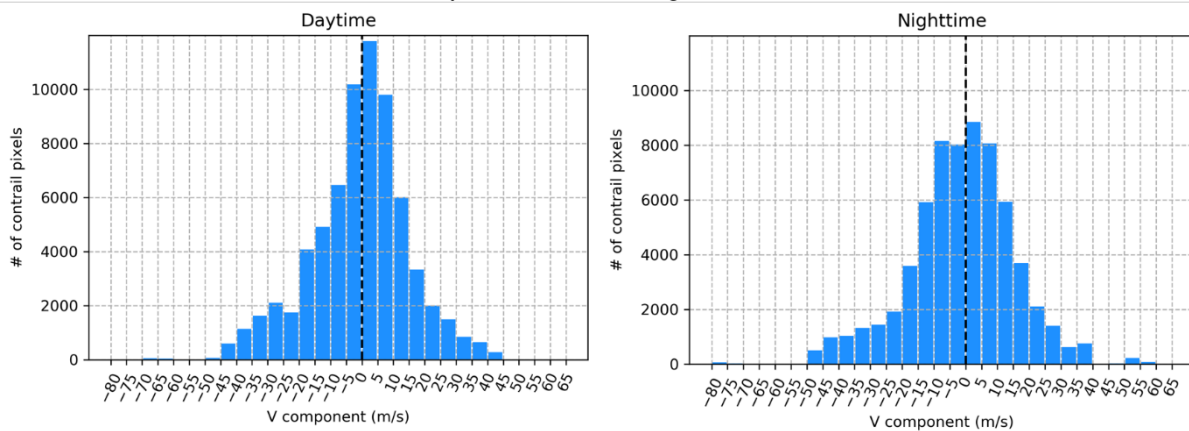
Εικόνα 110: Μέσες ωριαίες τιμές έντασης μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

Monthly mean V component favouring contrail formation



Εικόνα 111: Μέσες μηνιαίες τιμές έντασης μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: DO1, Έτος: 2016.

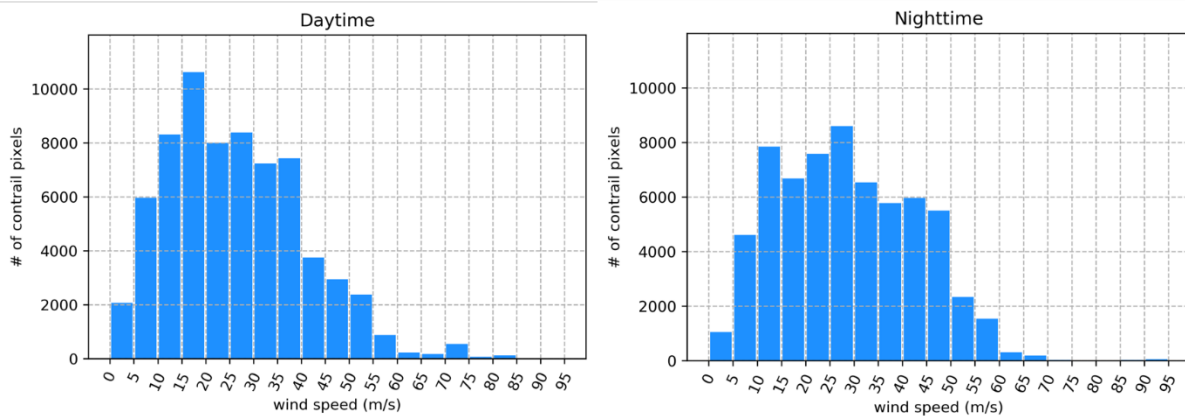
V component of wind favoring contrail formation



Εικόνα 112: Ιστογράμματα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την ένταση της μεσημβρινής συνιστώσας του ανέμου. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: DO1, Έτος: 2016.

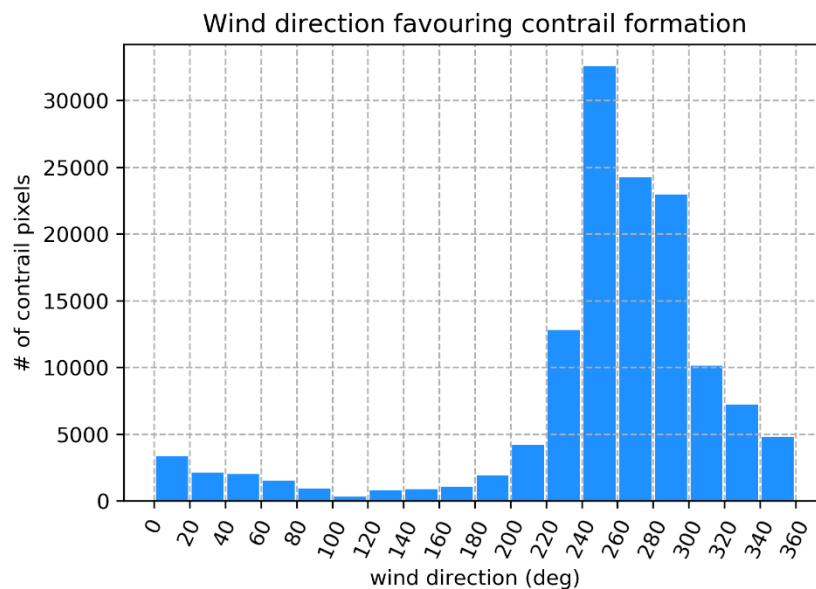
6.10. Ταχύτητα του ανέμου

Wind speed favoring contrail formation

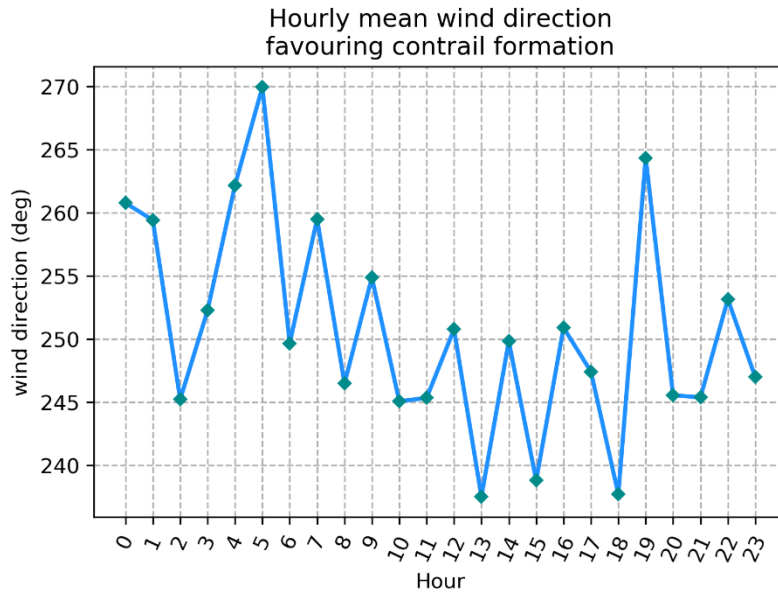


Εικόνα 113: Ιστογράμματα κατανομής των εικονοστοιχείων των *contrails* ως προς την ταχύτητα του ανέμου. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

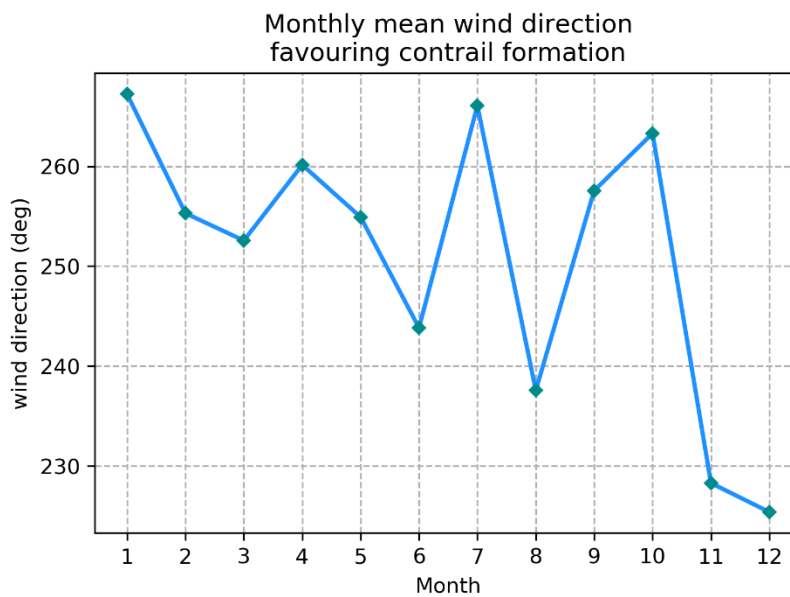
6.11. Διεύθυνση του ανέμου



Εικόνα 114: Ιστογράμματα κατανομής των εικονοστοιχείων των *contrails* ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

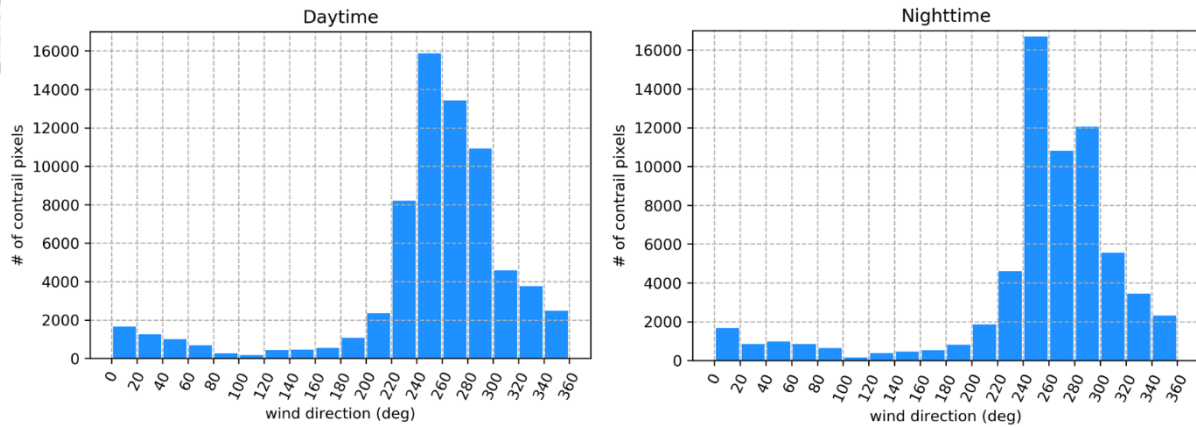


Εικόνα 115: Μέσες ωριαίες τιμές κατεύθυνσης του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.



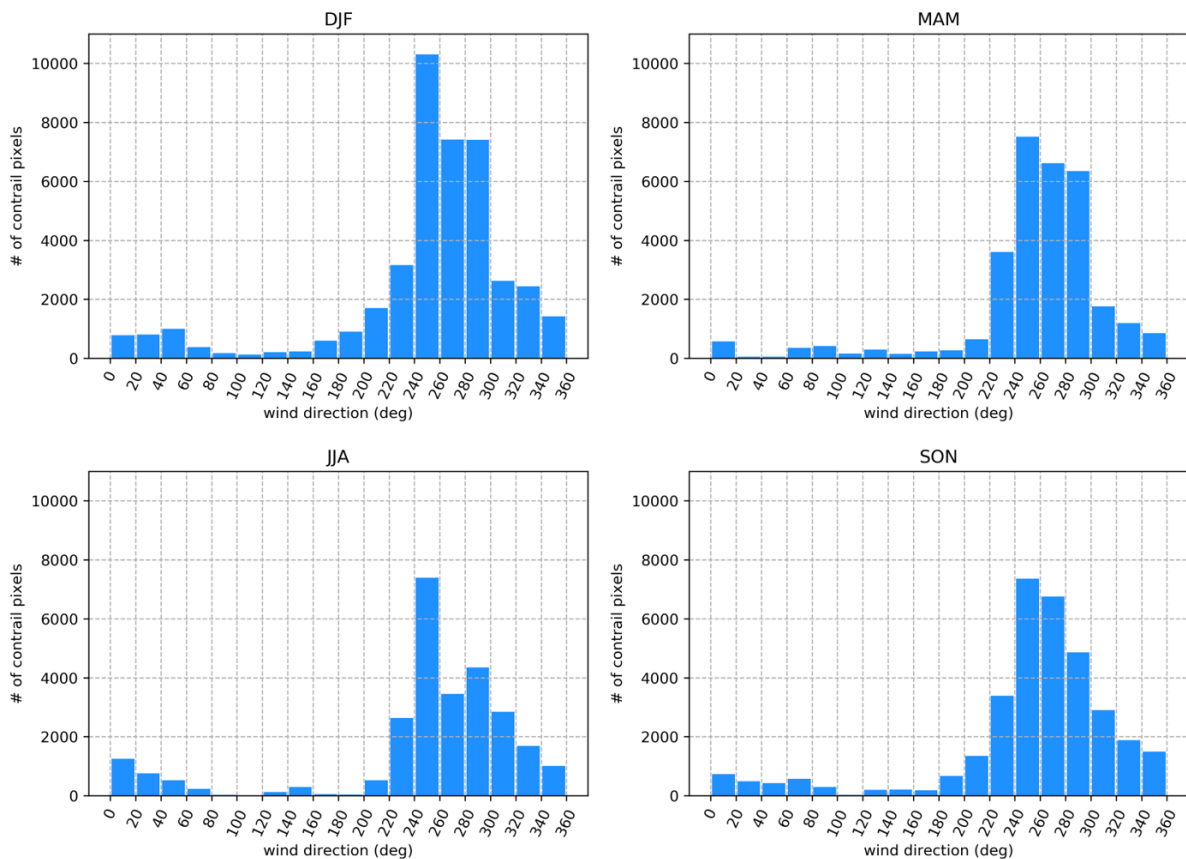
Εικόνα 116: Μέσες μηνιαίες τιμές κατεύθυνσης του ανέμου στα εικονοστοιχεία των contrails. Περιοχή: D01, Έτος: 2016.

Wind direction favoring contrail formation



Εικόνα 117: Ιστογράμματα κατανομής των εικονοστοιχείων των contrails ως προς την διεύθυνση του ανέμου. Ημέρα (αριστερά), Νύχτα (δεξιά). Περιοχή: ΔΟ1, Έτος: 2016.

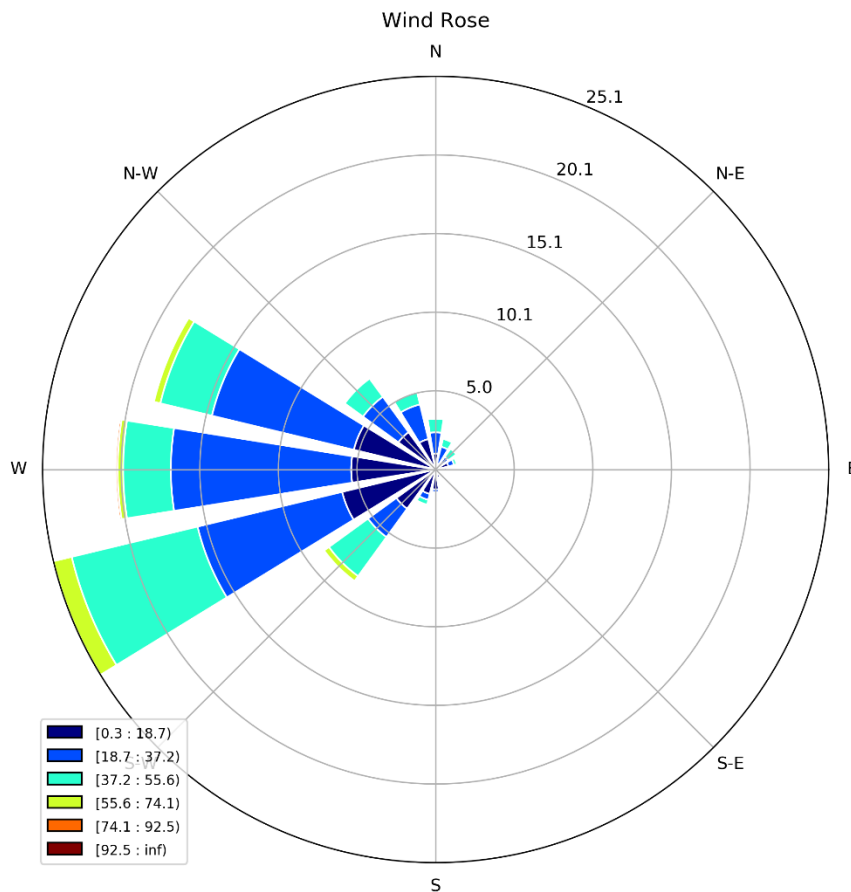
Wind direction favoring contrail formation



Εικόνα 118: Εποχιακή σύγκριση κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς τη διεύθυνση πνοής του ανέμου. Περιοχή ΔΟ1, 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

6.12. Ροδογράμματα

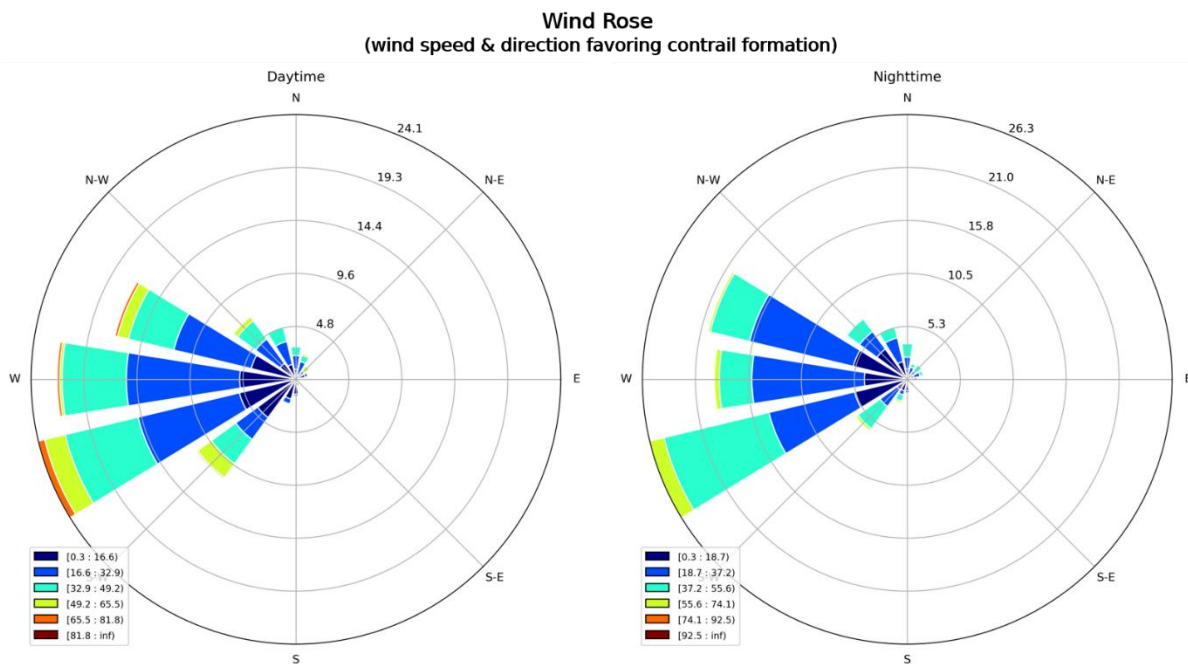
Τα ροδογράμματα είναι γραφήματα μεγάλης αξίας, καθώς περιλαμβάνουν πληροφορία για την κατανομή των εντοπισμένων εικονοστοιχείων τόσο ως προς τον αριθμό τους ανά κατεύθυνση, όσο και για την ταχύτητα του ανέμου. Στο ροδόγραμμα της Εικόνας 119, παρουσιάζεται αυτή ακριβώς η κατανομή της πυκνότητας εικονοστοιχείων ανά κατεύθυνση και ανά κλάση ταχύτητας. Τόσο από άποψη κατεύθυνσης όσο και από άποψη ταχύτητας προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα που αναλύονται στο κύριο μέρος της εργασίας. Υπάρχει σαφής προτίμηση στον σχηματισμό των contrails όταν πνέουν Δυτικοί άνεμοι μετρίων για το υψόμετρο εντάσεων.



Εικόνα 119: Ροδόγραμμα κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Με την χρωματική κλίμακα αποδίδεται η ένταση του ανέμου. Τα εμβαδά των διαφόρων χρωμάτων αποτυπώνουν την συχνότητα εμφάνισης της εκάστοτε ταχύτητας. Περιοχή ΔΟ1, Έτος 2016.

Στην Εικόνα 120, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για contrails που εντοπίστηκαν τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Αναφορικά με την κατανομή των

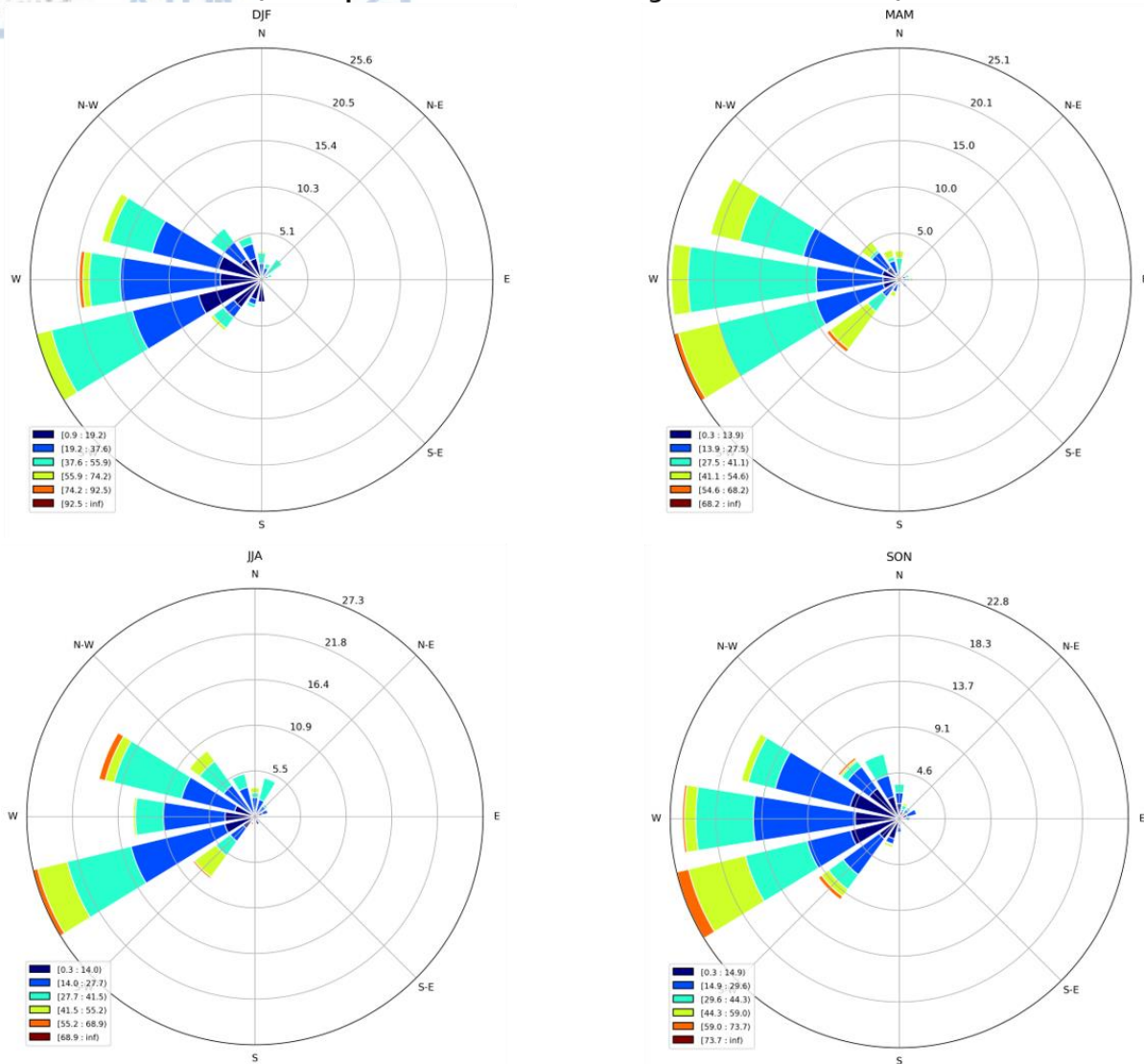
εικονοστοιχείων ως προς τις διευθύνσεις του ανέμου, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ ημέρας και νύχτας. Παραμένει εμφανής η προτίμηση σε ανέμους δυτικών διευθύνσεων. Αναφορικά με την ταχύτητα, την διάρκεια της νύχτας παρατηρείται μία ελαφριά αύξηση των εικονοστοιχείων με ταχύτητες μεγαλύτερες από ότι τη διάρκεια της ημέρας.



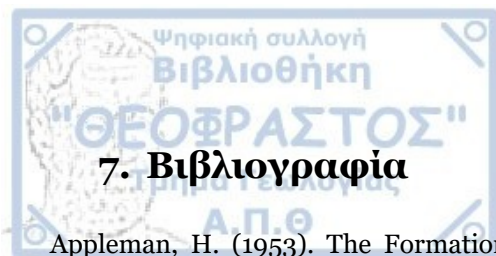
Εικόνα 120: Συγκριτικά ροδογράμματα για ημέρα (αριστερά) και νύχτα (δεξιά). Αποδίδουν την κατανομή εικονοστοιχείων contrails ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Με την χρωματική κλίμακα αποδίδεται η ένταση του ανέμου. Τα εμβαδά των διαφόρων χρωμάτων αποτυπώνουν την συχνότητα εμφάνισης της εκάστοτε ταχύτητας. Περιοχή D01, Έτος 2016.

Η Εικόνα 121, τέλος, περιλαμβάνει τα εποχιακά ροδογράμματα. Και πάλι τα αποτελέσματα που προκύπτουν συμφωνούν με όσα αναφέρθηκαν στο κείμενο, κατά την εποχιακή ανάλυση. Σε όλες σχεδόν τις εποχές είναι εμφανής η προτίμηση στον σχηματισμό των contrails όταν επικρατούν δυτικοί άνεμοι. Το καλοκαίρι η προτίμηση αυτή είναι πιο έντονη. Το φθινόπωρο και ιδίως το καλοκαίρι παρατηρούνται και εικονοστοιχεία με μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου.

Wind Rose (wind speed & direction favoring contrail formation)

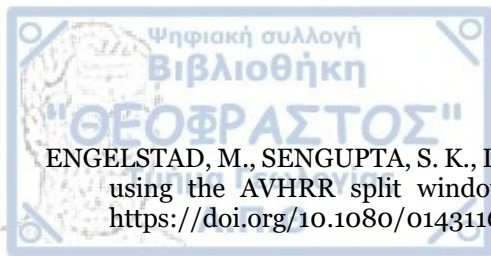


Εικόνα 121: Εποχιακά ροδογράμματα της κατανομής εικονοστοιχείων contrails ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Με την χρωματική κλίμακα αποδίδεται η ένταση του ανέμου. Τα εμβαδά των διαφόρων χρωμάτων αποτυπώνουν την συχνότητα εμφάνισης της εκάστοτε ταχύτητας. Περιοχή D01, Έτος 2016. Χειμώνας: επάνω αριστερά, Άνοιξη: επάνω δεξιά, Καλοκαίρι: κάτω αριστερά, Φθινόπωρο: κάτω δεξιά.

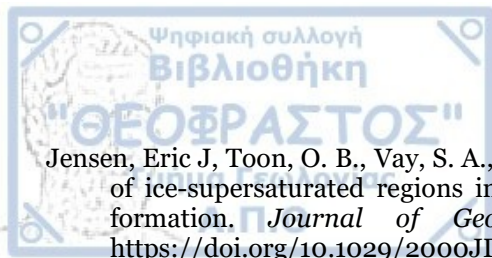


7. Βιβλιογραφία

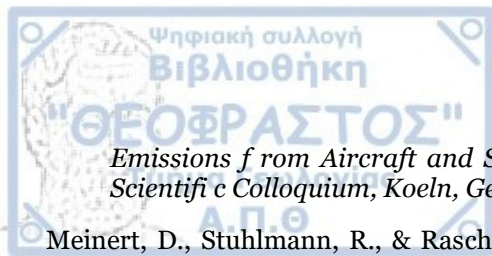
- Appleman, H. (1953). The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34(1), 14–20. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-34.1.14>
- Atlas, D., Wang, Z., & Duda, D. (2006). Contrails to Cirrus---Morphology, Microphysics, and Radiative Properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology - J APPL METEOROL CLIMATOL*, 45, 5–19. <https://doi.org/10.1175/JAM2325.1>
- Bakan, S., Betancor, M., Gayler, V., & Graßl, H. (1994). Contrail frequency over Europe from NOAA-satellite images. *Annales Geophysicae*, 12(10), 962–968. <https://doi.org/10.1007/s00585-994-0962-y>
- Bedka, S. T., Minnis, P., Duda, D. P., Chee, T. L., & Palikonda, R. (2013). Properties of linear contrails in the Northern Hemisphere derived from 2006 Aqua MODIS observations. *Geophysical Research Letters*, 40(4), 772–777. <https://doi.org/10.1029/2012GL054363>
- Bock, L., & Burkhardt, U. (2019). Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(12), 8163–8174. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8163-2019>
- Brewer, A. W. (1946). CONDENSATION TRAILS. *Weather*, 1(2), 34–40. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1946.tb00024.x>
- Bugliaro, L., Mannstein, H., & Kox, S. (2012). Ice Cloud Properties From Space BT - Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends. In Ulrich Schumann (Ed.) (pp. 417–432). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30183-4_25
- Burkhardt, U., & Kärcher, B. (2011). Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change*, 1(1), 54–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1068>
- Busen, R., & Schumann, U. (1995). Visible contrail formation from fuels with different sulfur contents. *Geophysical Research Letters*, 22(11), 1357–1360. <https://doi.org/10.1029/95GL01312>
- Chauvigné, A., Jourdan, O., Schwarzenboeck, A., Gourbeyre, C., Gayet, J. F., Voigt, C., ... Schumann, U. (2018). Statistical analysis of contrail to cirrus evolution during the Contrail and Cirrus Experiment (CONCERT). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(13), 9803–9822. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9803-2018>
- Dekoutsidis, G., & Feidas, H. (2019). Contrails and contrail-cirrus clouds characteristics based on satellite images and their relation to the atmospheric conditions. In *Climatic Change, Variability and Climatic Risks* (pp. 391–396). Thessaloniki.
- Dietmüller, S., Ponater, M., Sausen, R., Hoinka, K.-P., & Pechtl, S. (2008). Contrails, Natural Clouds, and Diurnal Temperature Range. *Journal of Climate*, 21(19), 5061–5075. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2255.1>
- Dominguez, F. (2011). Introduction to Physical Meteorology - Cold Clouds. Retrieved from www.atmo.arizona.edu
- Duda, D., Minnis, P., Nguyen, L., & Palikonda, R. (2004). A Case Study of the Development of Contrail Clusters over the Great Lakes. *Journal of The Atmospheric Sciences - J ATMOS SCI*, 61, 1132–1146. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1132:ACSOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1132:ACSOTD>2.0.CO;2)
- Duda, D. P., Minnis, P., Khlopenkov, K., Chee, T. L., & Boeke, R. (2013). Estimation of 2006 Northern Hemisphere contrail coverage using MODIS data. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 612–617. <https://doi.org/10.1002/grl.50097>
- Eichenlaub, V. L. (1982). Comments on “Midwestern Cloud, Sunshine and Temperature Trends since 1901; Possible Evidence of Jet Contrail Effects.” *Journal of Applied Meteorology*, 21(12), 1946–1948. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021<1946:COCSAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021<1946:COCSAT>2.0.CO;2)



- ENGELSTAD, M., SENGUPTA, S. K., LEE, T., & WELCH, R. M. (1992). Automated detection of jet contrails using the AVHRR split window. *International Journal of Remote Sensing*, 13(8), 1391–1412. <https://doi.org/10.1080/01431169208904199>
- Ettenreich, R. (1919). Wolkenbildung über einer Feuersbrunst und an Flugzeugabgasen. *Meteorologische Zeitschrift*, 36, 355–356.
- Forkert, T., Strauss, B., & Wendling, P. (1993). A New Algorithm for the Automated Detection of Jet Contrails from NOAA-AVHRR Satellite Images. In *Proc. of the 6th AVHRR Data Users' Meeting* (pp. 513–519). EUMETSAT - Joint Research Centre of the Commission of the EC. Retrieved from <https://elib.dlr.de/31899/>
- Freudenthaler, V., F. H., & H, J. (1995). Ground-based mobile scanning LIDAR for remote sensing of contrails. *Annales Geophysicae*, 12. <https://doi.org/10.1007/s005850050117>
- Frömming, C., Ponater, M., Burkhardt, U., Stenke, A., Pechtl, S., & Sausen, R. (2011). Sensitivity of contrail coverage and contrail radiative forcing to selected key parameters. *Atmospheric Environment*, 45(7), 1483–1490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.033>
- Gayet, J.-F., Febvre, G., Brogniez, G., Chepfer, H., Renger, W., & Wendling, P. (1996). Microphysical and Optical Properties of Cirrus and Contrails: Cloud Field Study on 13 October 1989. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, 126–138. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<0126:MAOPOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<0126:MAOPOC>2.0.CO;2)
- Gierens, K., Kärcher, B., Mannstein, H., & Mayer, B. (2009). Aerodynamic Contrails: Phenomenology and Flow Physics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(2), 217–226. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2767.1>
- Gierens, K. M. (1996). Numerical Simulations of Persistent Contrails. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53(22), 3333–3348. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<3333:NSOPC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<3333:NSOPC>2.0.CO;2)
- Gierens, K., & Spichtinger, P. (2000). On the size distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratosphere. *Annales Geophysicae*, 18(4), 499–504. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0499-7>
- Gothe, M. B., & Graßl, H. (1993). Satellite remote sensing of the optical depth and mean crystal size of thin cirrus and contrails. *Theoretical and Applied Climatology*, 48(2), 101–113. <https://doi.org/10.1007/BF00864917>
- Graf, K., Schumann, U., Mannstein, H., & Mayer, B. (2012). Aviation induced diurnal North Atlantic cirrus cover cycle. *Geophysical Research Letters*, 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL052590>
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A., ... Zhang, S. (2005). Efficacy of climate forcings. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D18). <https://doi.org/10.1029/2005JD005776>
- Haywood, J. M., Allan, R. P., Bornemann, J., Forster, P. M., Francis, P. N., Milton, S., ... Thorpe, R. (2009). A case study of the radiative forcing of persistent contrails evolving into contrail-induced cirrus. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D24). <https://doi.org/10.1029/2009JD012650>
- Höhndorf, F. (1941). Beitrag zum Problem der Vermeidung von Auspuffwolken hinter Motorflugzeugen. *Deutsche Luftfahrtforschung, Aerologisches Institut, Deutsche Forschungsanstalt Für Segelflug, FB*, (1371), 15.
- Iwabuchi, H., Yang, P., Liou, K., & Minnis, P. (2012). Physical and optical properties of persistent contrails: Climatology and interpretation. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 117, 6215. <https://doi.org/10.1029/2011JD017020>
- Jensen, E J, Toon, O. B., Kinne, S., Sachse, G. W., Anderson, B. E., Chan, K. R., ... Miake-Lye, R. C. (1998). Environmental conditions required for contrail formation and persistence. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D4), 3929–3936. <https://doi.org/10.1029/97JD02808>

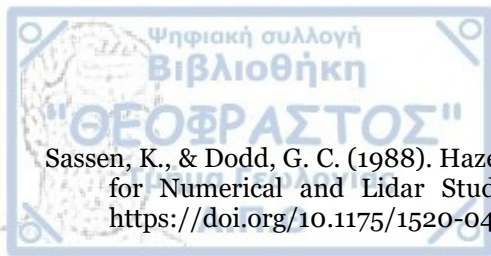


- Jensen, Eric J, Toon, O. B., Vay, S. A., Ovarlez, J., May, R., Bui, T. P., ... Schumann, U. (2001). Prevalence of ice-supersaturated regions in the upper troposphere: Implications for optically thin ice cloud formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D15), 17253–17266. <https://doi.org/10.1029/2000JD900526>
- Kärcher, B, Busen, R., Petzold, A., Schröder, F. P., Schumann, U., & Jensen, E. J. (1998). Physicochemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles: 2. Comparison with observations and sensitivity studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D14), 17129–17147. <https://doi.org/10.1029/98JD01045>
- Kärcher, B, Kleine, J., Sauer, D., & Voigt, C. (2018). Contrail Formation: Analysis of Sublimation Mechanisms. *Geophysical Research Letters*, 45(24), 13,513–547,552. <https://doi.org/10.1029/2018GL079391>
- Kärcher, B, Mayer, B., Gierens, K., Burkhardt, U., Mannstein, H., & Chatterjee, R. (2009). Aerodynamic Contrails: Microphysics and Optical Properties. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(2), 227–243. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2768.1>
- Kärcher, Bernd. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*, 9(1), 1824. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- Lee, D S, Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., ... Sausen, R. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4678–4734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>
- Lee, David S, Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., ... Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22), 3520–3537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>
- Lee, T. F. (1989). Jet Contrail Identification Using the AVHRR Infrared Split Window. *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)*, 28(9), 993–995. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/26185248>
- Liou, K.-N. (1986). Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes: A Global Perspective. *Monthly Weather Review*, 114. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<1167:IOCCOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<1167:IOCCOW>2.0.CO;2)
- Liou, K. N., Ou, S. C., & Koenig, G. (1990). An Investigation on the Climatic Effect of Contrail Cirrus BT - Air Traffic and the Environment – Background, Tendencies and Potential Global Atmospheric Effects. In U Schumann (Ed.) (pp. 154–169). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mannstein, H, Brömser, A., & Bugliaro, L. (2010). Ground-based observations for the validation of contrails and cirrus detection in satellite imagery. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(3), 655–669. <https://doi.org/10.5194/amt-3-655-2010>
- Mannstein, H, & Meyer, R. (1997). Contrail Observations using NOAA-AVHRR Infrared Data. In *Proc. 1997 Meteorol. Satellite Data Users' Conference* (pp. 203–212).
- Mannstein, Hermann, Meyer, R., & Wendling, P. (1999). Operational detection of contrails from noaa-avhrr-data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(8), 1641–1660. <https://doi.org/10.1080/014311699212650>
- Mannstein, Hermann, Vázquez-Navarro, M., Graf, K., Duda, D. P., & Schumann, U. (2012). Contrail Detection in Satellite Images BT - Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends. In Ulrich Schumann (Ed.) (pp. 433–447). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30183-4_26
- Meerkötter, R., Schumann, U., Doelling, D. R., Minnis, P., Nakajima, T., & Tsushima, Y. (1999). Radiative forcing by contrails. *Annales Geophysicae*, 17(8), 1080–1094. <https://doi.org/10.1007/s00585-999-1080-7>
- Meinert, D. (1994). Training a neural network to detect jet contrails in satellite images. In *Impact of*



Emissions from Aircraft and Spacecraft upon the Atmosphere, Proceedings of an International Scientific Colloquium, Koeln, Germany, 18- 20 April 1994 (pp. 401–406).

- Meinert, D., Stuhlmann, R., & Raschke, E. (1997). Impact of jet condensation trails upon the radiation budget over Northwest Europe and the North Atlantic.
- Meyer, R, Buell, R., Leiter, C., Mannstein, H., Pechtl, S., Oki, T., & Wendling, P. (2007). Contrail observations over Southern and Eastern Asia in NOAA/AVHRR data and comparisons to contrail simulations in a GCM. *International Journal of Remote Sensing*, 28(9), 2049–2069. <https://doi.org/10.1080/01431160600641707>
- Meyer, Richard, Mannstein, H., Meerkötter, R., & Wendling, P. (2002). *Contrail and Cirrus Observations over Europe from 6 Years of NOAA-AVHRR Data. 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference* (Vol. EUM P).
- Minnis, P., Ayers, J., Palikonda, R., & Phan, D. (2004). Contrails, Cirrus Trends, and Climate. *Journal of Climate*, 17, 1671–1685. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1671:CCTAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1671:CCTAC>2.0.CO;2)
- Minnis, P., Palikonda, R., Walter, B., Ayers, J., & Mannstein, H. (2005). Contrail properties over the eastern North Pacific from AVHRR data. *Meteorologische Zeitschrift*, 14, 515–523. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0056>
- Minnis, P., Schumann, U., Doelling, D. R., Gierens, K., & Fahey, D. W. (1999). Global Distribution of Contrail Radiative Forcing. *Geophysical Research Letters*, 26, 1853–1856. <https://doi.org/10.1029/1999GL900358>
- Minnis, P., Young, D. F., Garber, D. P., Nguyen, L., Smith Jr., W. L., & Palikonda, R. (1998). Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS. *Geophysical Research Letters*, 25(8), 1157–1160. <https://doi.org/10.1029/97GL03314>
- Palikonda, R., Minnis, P., Duda, D., & Mannstein, H. (2005). Contrail coverage derived from 2001 AVHRR data over the continental United States of America and surrounding areas. *Meteorologische Zeitschrift*, 14, 525–536. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0051>
- Penner, J. E., Chen, Y., Wang, M., & Liu, X. (2009). Possible influence of anthropogenic aerosols on cirrus clouds and anthropogenic forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(3), 879–896. <https://doi.org/10.5194/acp-9-879-2009>
- Ponater, M, Brinkop, S., Sausen, R., & Schumann, U. (1996a). Parameterization of Contrails in a Comprehensive Climate Model. In *Proc. of the International Colloquium on the Impact of Aircraft Emissions upon the Atmosphere, Comité Avion-Ozone, Paris, 15-18 October 1996* (pp. 373–378). Retrieved from <https://elib.dlr.de/32309/>
- Ponater, M, Brinkop, S., Sausen, R., & Schumann, U. (1996b). Simulating the global atmospheric response to aircraft water vapour emissions and contrails: a first approach using a GCM. *Annales Geophysicae*, 14(9), 941–960. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-0941-6>
- Ponater, Michael, Marquart, S., & Sausen, R. (2002). Contrails in a comprehensive global climate model: Parameterization and radiative forcing results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D13), ACL 2-1-ACL 2-15. <https://doi.org/10.1029/2001JD000429>
- Pratt, W. (1991). *Digital Image Processing* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Pruppacher, H. R. (1995). A New Look at Homogeneous Ice Nucleation in Supercooled Water Drops. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(11), 1924–1933. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<1924:ANLAHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1924:ANLAHI>2.0.CO;2)
- Rosenow, J., & Fricke, H. (2019). Condensation trails in trajectory optimization. In *13th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar 2019*. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073417005&partnerID=40&md5=50d0751183cfe89f439274f8a51cae9f>



- Sassen, K., & Dodd, G. C. (1988). Haze Particle Nucleation Simulations in Cirrus Clouds, and Applications for Numerical and Lidar Studies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(19), 3005–3014. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3005:HPNSIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3005:HPNSIC>2.0.CO;2)
- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., & Ratier, A. (2002). AN INTRODUCTION TO METEOSAT SECOND GENERATION (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(7), 977–992. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2)
- Schmidt, E. (1941). Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. *Schriften Der Deutschen Akademie Der Luftfahrtforschung, Verlag R. Oldenbourg, München, Heft 44*. Verlag R. Oldenbourg, München. Retrieved from <https://elib.dlr.de/107948/>
- Schumann, U, & Wendling, P. (1990). Determination of contrails from satellite data and observational results. In *Air Traffic and the Environment—Background, Tendencies and Potential Global Atmospheric Effects* (pp. 138–153). Springer.
- Schumann, Ulrich. (1990). Influence of propulsion efficiency on contrail formation. *Aerospace Science and Technology*, 4(6), 391–401. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(00\)01062-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1270-9638(00)01062-2)
- Schumann, Ulrich. (1996). On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorologische Zeitschrift*, 5(1), 4–23. <https://doi.org/10.1127/metz/5/1996/4>
- Schumann, Ulrich, Graf, K., Mannstein, H., & Mayer, B. (2012). Contrails: Visible Aviation Induced Climate Impact BT - Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends. In Ulrich Schumann (Ed.) (pp. 239–257). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30183-4_15
- Spangenberg, D., Minnis, P., Bedka, S., Palikonda, R., Duda, D., & Rose, F. (2013). Contrail radiative forcing over the Northern Hemisphere from 2006 Aqua MODIS data. *Geophysical Research Letters*, 40, 595–600. <https://doi.org/10.1002/grl.50168>
- Spichtinger, P., Gierens, K., & Read, W. (2003). The Global Distribution of Ice-Supersaturated Regions as Seen by the Microwave Limb Sounder. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, 3391–3410. <https://doi.org/10.1256/qj.02.141>
- Stephens, G. L., & Webster, P. J. (1981). Clouds and Climate: Sensitivity of Simple Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(2), 235–247. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<0235:CACSOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<0235:CACSOS>2.0.CO;2)
- Travis, D. J. (1996). Variations in Contrail Morphology and Relationships to Atmospheric Conditions. *Journal of Weather Modification*, 28(4), 50–58.
- Vázquez-Navarro, M., Mannstein, H., & Kox, S. (2015). Contrail life cycle and properties from 1 year of MSG/SEVIRI rapid-scan images. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8739–8749. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8739-2015>
- Zhang, G., Zhang, J., & Shang, J. (2018). Contrail recognition with convolutional neural network and contrail parameterizations evaluation. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 14, 132–137. <https://doi.org/10.2151/SOLA.2018-023>
- Καρτάλης, Κ., & Φείδας, Χ. (2006). *Αρχές και εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης* (1η). Αθήνα: Γκιούρδας Β.