



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική μελέτη δημιουργίας, μετακίνησης και συμπεριφορών αερολυμάτων
σκόνης μεταξύ Γης και Άρη**

Γεώργιος Κ. Κωνσταντόπουλος

Επιβλέπουσα: Μαρία Χατζάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά σε μία συγκριτική μελέτη της δημιουργίας, μετακίνησης και των συμπεριφορών των αερολυμάτων σκόνης στους πλανήτες της Γης και του Άρη. Γι' αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιήθηκαν οι βάσεις δεδομένων MCD, του εργαστηρίου δυναμικής μετεωρολογίας CNRS στο Παρίσι, σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο της Οξφόρδης και την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) και του Εθνικού Κέντρου Διαστημικών Μελετών (CNES) της Γαλλίας. Με τη βοήθεια των προγραμμάτων IDL 8.5 και raporly, κατασκευάστηκαν ατμοσφαιρικοί χάρτες της συγκέντρωσης των αερολυμάτων κάθε εποχής του Άρη για τα αρειανά χρόνια MY24-MY32, όπως και ατμοσφαιρικοί χάρτες για κάθε μήνα από το 2008 μέχρι το 2013 της παγκόσμιας συγκέντρωσης αερολυμάτων της Γης.

Τα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι παρά την αραιότερη ατμόσφαιρα του Άρη, οι τοπικοί του άνεμοι φτάνουν το απαραίτητο κατώφλι ταχυτήτων για την αιώρηση της σκόνης και την ανύψωσή της στην ατμόσφαιρα. Επίσης, φάνηκε ότι οι τροχιές των αερολυμάτων στον Άρη είναι μεγαλύτερες από αυτές στην Γη, όπως μεγαλύτερη είναι και η διάρκεια που παραμένουν στην ατμόσφαιρα, καθώς και ότι οι συνθήκες αυτές μαζί με την απουσία κατακρημνισμάτων και ωκεανών στον Άρη δημιουργούν παγκόσμιας κλίμακας καταιγίδες σκόνης (dust storms) μεγαλύτερης έκτασης και σφοδρότητας από αυτές που εκδηλώνονται στη Γη.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: αερολύματα, καταιγίδες σκόνης, ατμοσφαιρικοί χάρτες, τοπικοί άνεμοι, ανύψωση, Γη, Άρης.

ABSTRACT

This thesis concerns a comparative study of the creation, movement, and the various behaviors of dust aerosols between those existing on Earth and on Mars. For that purpose, we used the MCD database created by the Dynamic Meteorology Laboratory CNRS in Paris in collaboration with the University of Oxford, the European Space Agency (ESA) and the French National Center for Space Studies (CNES). Using the IDL 8.5 and Panoply programs, we created atmospheric maps for the concentration of aerosols for every season on Mars for the Martian years MY24-MY32, as such we created atmospheric maps for the global concentration of aerosols on Earth.

From the results we concluded that even though Mars has a much thinner atmosphere than of Earth, local winds in Mars can reach the threshold speed that is needed for particles to become airborne and remain suspended in the atmosphere. In addition, the trajectories of the aerosol particles are much longer and the duration that aerosols are suspended in the Martian atmosphere is longer. The lack of precipitation and oceans in Mars combined with the Martian aerosol properties makes it easier for the appearance of global dust storms that engulf the whole planet.

KEYWORDS: aerosols, dust storms, dust storms, atmospheric maps, local winds, Earth, Mars

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	7
2.1 Δημιουργία του ηλιακού συστήματος.....	7
2.2 Γη.....	7
2.2.1 Αερολύματα στη Γη.....	8
2.2.2 Αερολύματα και ηλιακή ακτινοβολία.....	10
2.2.3 Έρημοι και καταιγίδες σκόνης.....	13
2.2.4 Έρημοι ως πηγές αερολυμάτων.....	15
2.2.5 Τροχιές μετακίνησης των αερολυμάτων.....	16
2.2.6 Τρόποι πρόγνωσης επεισοδίων σκόνης.....	16
2.3 Άρης.....	18
2.3.1 Γεωλογία του Άρη.....	21
2.3.2 Επιφάνεια του Άρη.....	21
2.3.3 Γεωγραφία του Άρη.....	22
2.3.4 Τεκτονική του Άρη.....	24
2.3.5 Εσωτερικό του Άρη.....	24
3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	25
3.1 Δεδομένα Γης.....	25
3.2 Δεδομένα Άρη.....	26
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	28
4.1 Ανάλυση δεδομένων στον Άρη.....	28
4.2 Ανάλυση δεδομένων στη Γη.....	29
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	30
5.1 Κλιματολογική ανάλυση της σκόνης στον Άρη.....	30

5.2	Κλιματολογική ανάλυση της σκόνης στη Γη	36
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	54

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Άρης είναι ο αμέσως επόμενος πλανήτης, που ενδιαφέρει τον άνθρωπο περισσότερο στην εξερεύνηση και κατανόηση του, μετά από την προσεδάφιση του στη Σελήνη. Όμως μέχρι και σήμερα δεν έχει σταλεί επανδρωμένη αποστολή στον κόκκινο πλανήτη καθώς εγκυμονούν πολύ κίνδυνοι που αποτρέπουν από αυτόν τον στόχο, όπως η αφιλόξενη ατμόσφαιρα του Άρη. Γι' αυτό και η μελέτη της ατμόσφαιράς του είναι πολύ σημαντική. Ένας τρόπος μελέτης και κατανόησης της ατμόσφαιρας του Άρη είναι η σύγκριση της με την καλύτερα μελετημένη ατμόσφαιρα που γνωρίζουμε, δηλαδή αυτήν της Γης. Σημαντική πρόοδος στη μελέτη του πλανήτη Άρη έγινε από το 2005 και μετά με μη επανδρωμένες αποστολές για την εξερεύνηση αυτού και της ατμόσφαιρας του που οδήγησαν σε περαιτέρω προώθηση αυτών των μελετών, λόγω των μετρήσεων που έγιναν διαθέσιμες από το Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS) της αποστολής ESA, Mars Express (MEX) (Picardi et al., 2004).

Παρακάτω θα αναλυθεί η ατμόσφαιρα του Άρη και θα επιχειρηθεί η σύγκριση της με την ατμόσφαιρα της Γης, με στόχο να παρατηρήσουμε τυχόν ομοιότητες και διαφορές των τρόπων δημιουργίας, μετακίνησης και διασποράς των αερολυμάτων στους δυο πλανήτες. Αυτό θα αναζητηθεί με την κατασκευή ατμοσφαιρικών χαρτών, τόσο του πλανήτη Άρη όσο και της Γης, που περιγράφουν την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα αερολύματα με το πρόγραμμα IDL 8.5. Η σύγκριση αυτή ευελπιστούμε να δώσει τυχόν πολύτιμα δεδομένα, τα οποία ενδεχομένως να διευρύνουν την κατανόηση του Άρη και της ατμόσφαιρας του και πιθανόν να βοηθήσουν στις μετέπειτα μη-επανδρωμένες ή και επανδρωμένες αποστολές. Αυτά μπορεί να αφορούν στην αποφυγή τεραστίων καταιγίδων σκόνης (dust storms) και στην εύρεση του κατάλληλου σημείου και χρόνου προσεδάφισης.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Δημιουργία του ηλιακού συστήματος

Για να καταλήξουμε στον κόκκινο πλανήτη που είναι η περιοχή μελέτης μας θα κάνουμε μια αναδρομή μέχρι τη δημιουργία του. Το ηλιακό σύστημα αποτελείται από τον ήλιο, τους πλανήτες, δορυφόρους, κομήτες, αστεροειδείς και κομμάτια σκόνης. Η δημιουργία των πλανητών έγινε με συσσώρευση σκόνης και μικρότερων αντικειμένων, σχηματίζοντας έτσι τους πρωτοπλανήτες. Σταδιακά, με την αύξηση του μεγέθους των πρωτοπλανητών αυξήθηκε και η βαρυτική τους δύναμη με αποτέλεσμα να προσελκύουν και άλλα συσσωρευμένα αντικείμενα και έτσι να δημιουργηθούν οι πλανήτες που γνωρίζουμε σήμερα.

Οι πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος ξεκινώντας από τον πλησιέστερο στον ήλιο είναι: Ερμής, Αφροδίτη, Γη, Άρης, Δίας, Κρόνος, Ουρανός, και Ποσειδώνας. Εμείς θα επικεντρωθούμε στον Άρη και στη Γη.

Διάφορα στοιχεία των γήινων πλανητών, στους οποίους ανήκουν ο Άρης και η Γη, όταν αυτοί άρχισαν να ψύχονται και να δημιουργούν φλοιό, συνδυάστηκαν και κρυσταλοποιήθηκαν σε πετρώματα και ορυκτά. Τα στοιχεία αυτά ήταν οξυγόνο, πυρίτιο, μαγγάνιο, νάτριο, ασβέστιο, κάλιο και αλουμίνιο και σε διάφορα στάδια δημιουργήθηκαν τα πυριτικά ορυκτά που είναι οι κύριοι συστατικοί λίθοι για τα περισσότερα πετρώματα στον φλοιό της Γης.

2.2 Γη

Η Γη έχει διάμετρο 12,742 km, μάζα $5,8 \times 10^{24}$ kg, ο άξονας περιστροφής της έχει κλίση $23,4^\circ$ με την κάθετο στο επίπεδο τροχιάς της άξονα, ο ένας χρόνος της είναι 365 μέρες, έχει 4 εποχές και η μια μέρα της έχει 24 ώρες. Οι θεμελιώδεις διεργασίες που διαμορφώνουν την επιφάνεια της Γης είναι ο τεκτονισμός, η διάβρωση, η ηφαιστειότητα και οι συγκρούσεις ουράνιων σωμάτων με αυτήν.

Τα αποτελέσματα της τεκτονικής στην επιφάνεια της Γης είναι εμφανή, καθώς ο φλοιός μπορεί να σπάσει, να καμφθεί από ρήγματα και πτυχές, αντιστοίχως.

Η διάβρωση είναι η διαδικασία της θρυματοποίησης των πετρωμάτων στην επιφάνεια της γης και η αποσάθρωση είναι η μεταφορά των προϊόντων της διάβρωσης.

Αιολική διαδικασία είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας με την επιφάνεια. Ο άνεμος περιέχει δυναμική ενέργεια καθώς κινείται πάνω από μια επιφάνεια και η διέγερση των σωματιδίων σε κίνηση εξαρτάται από αυτή τη διαδικασία καθώς υπάρχουν όρια ταχυτήτων για να πραγματοποιηθεί η διέγερση τους.

2.2.1 Αερολύματα στη Γη

Τα αερολύματα (aerosols) είναι μικρά σωματίδια υγρής ή στερεάς μορφής παγιδευμένα σε κάποιο αέριο (e.g., Seinfeld and Pandis, 2006, amongst others). Παραδείγματα των μικρών σωματιδίων αυτών είναι η άμμος, τα σωματίδια ιλύος, το θαλασσινό αλάτι, η ηφαιστειακή τέφρα καθώς και προϊόντα του άνθρακα. Το 40% της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με αερολύματα υφίσταται λόγω της σκόνης. Στη Βόρεια Αφρική, το κύριο είδος αερολυμάτων είναι η ορυκτή σκόνη από τη Σαχάρα, ενώ στη Δυτική Αφρική, η δημιουργία των αερολυμάτων προκύπτει από το κάψιμο βιομάζας. Τα αερολύματα έχουν πολλές επιδράσεις στην φύση, κάποιες από αυτές είναι η διασπορά τους και η απορρόφηση της ηλιακής και θερμικής ακτινοβολίας (Engelstaedter et al., 2006). Ένα από τα αποτελέσματα τους είναι η αύξηση του οπτικού βάθους (optical depth) που είναι το μέγεθος που υπολογίζει την εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τη σκόνη και την αχλύ που περιορίζουν την ορατότητα και οδηγούν σε αλλαγή της θερμικής ισορροπίας στην ατμόσφαιρα.

Το εύρος μεγέθους των αερολυμάτων είναι από μερικά νανόμετρα μέχρι μικρόμετρα και έχουν διάμετρο όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Παρατηρούνται σε ένα εύρος από την επιφάνεια της γης μέχρι την στρατόσφαιρα. Τα περισσότερα αερολύματα παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μικρές περιόδους, μεταξύ τεσσάρων ημερών και μιας εβδομάδας και μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις. Αυτά που κινούνται στην ατμόσφαιρα με 5m/s ταξιδεύουν χιλιάδες χιλιόμετρα μέσα σε μια εβδομάδα. Παραδείγματα του φαινομένου αυτού είναι, οι θύσανοι σκόνης (dust plumes) από τη Σαχάρα που φτάνουν στην Καραϊβική, τα αερολύματα της Ασίας, ειδικά από την έρημο Gobi, οι ρύποι της Κίνας που περνάνε από την Ιαπωνία και καταλήγουν στα κεντρικά του Ειρηνικού Ωκεανού· και οι καπνοί από τις πυρκαγιές της Σιβηρίας και του Καναδά που φτάνουν στα παγοκαλύμματα της Αρκτικής.

Τα αερολύματα από διάφορους ειδικούς κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος τους, το σχήμα τους και τη χημική σύστασή τους. Οι τοξικολόγοι αναφέρονται στα αερολύματα ως λεπτή, υπέρ-λεπτή ή χονδρόκοκκη ύλη. Ενώ οι μετεωρολόγοι χρησιμοποιούν τον όρο

αιωρούμενα σωματίδια. Αλλά οι περισσότεροι όροι είναι ατελείς καθώς τα αερολύματα συχνά συσσωρεύονται μαζί και δημιουργούν πιο περίπλοκες δομές.

Όσον αφορά στην προέλευσή τους, το 90% των αερολυμάτων έχουν φυσική προέλευση, όπως από τα ηφαίστεια τα οποία εκλύουν τεράστιες στήλες στάχτης στον αέρα, καθώς και διοξείδιο του θείου και άλλα αέρια. Από τις πυρκαγιές που παράγουν μερικώς καμένο/οξειδωμένο οργανικό άνθρακα (burned organic carbon). Από κάποια φυτά που παράγουν αέρια που αντιδρούν με ουσίες στον αέρα που σχηματίζουν αερολύματα, όπως ο "καπνός" στα Great smoky mountains της Αμερικής. Επίσης, στον Ωκεανό υπάρχουν είδη μικροάλγης που παράγουν ένα θειούχο αέριο που καλείται διμεθυλοσουλφίδιο (dimethylsulfidiae) που μπορεί να μετατραπεί σε σουλφίδια στην ατμόσφαιρα.

Το θαλασσινό αλάτι και η σκόνη είναι αερολύματα σε αφθονία, καθώς οι αμμοθύελλες σηκώνουν μικρά κομμάτια ορυκτής σκόνης από τις ερήμους στην ατμόσφαιρα και έντονοι άνεμοι μεταφέρουν αλάτι.

Το υπόλοιπό 10% των αερολυμάτων είναι ανθρωπογενές, από δραστηριότητες όπως καύση ορυκτών καυσίμων, αμάξια, ερημοποίηση, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και άλλα που παράγουν διάφορα σωματίδια όπως, σουλφίδια, σωματίδια αιθάλης (black carbon) και άλλα.

Με το πέρασμα του χρόνου οι εκπομπές αερολυμάτων έχουν αλλάξει σημαντικά. Στην Ασία οι ανθρωπογενείς εκπομπές έχουν αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες καθώς η αστικοποίηση και η βιομηχανοποίηση επικράτησαν. Σε αντίθεση, η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη με την επιλογή της μετακίνησης των εργοστασίων τους στις αναπτυσσόμενες χώρες και την υιοθέτηση αυστηρότερων νόμων για ένα καθαρό μέλλον κρατάνε τις περιοχές τους καθαρές αλλά επιβαρύνουν τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Συγκεκριμένα παραδείγματα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων είναι η υπεργεωργία, η κατασκευή δρόμων, η αποξήρανση λιμνών ακόμα και ο πόλεμος, τα οποία δημιουργούν ερημοποίηση, διατάραξη του χρώματος των ήδη υπάρχοντων ερήμων, με αποτέλεσμα τα πιο εκτεθειμένα τμήματα να υφίστανται την δράση των αιολικών διεργασιών ευκολότερα. Εκτός από τη φύση, η μεταφορά των αερολυμάτων έχει αρνητικές επιπτώσεις και στην υγεία του ανθρώπου, καθώς μέσω αυτών μεταφέρονται μύκητες και βακτήρια που προκαλούν ασθένειες. Επίσης, και από μόνη της η σκόνη είναι επικίνδυνη για τους ανθρώπους με αναπνευστικά προβλήματα. Βέβαια η μεταφορά των αερολυμάτων δεν έχει μόνο καταστροφική δράση, αλλά και ευεργετική. Η άμμος που μεταφέρεται από τις

ερήμους, λειτουργεί σαν λίπασμα καθώς εμπλουτίζει το χώμα με σουλφίδια, φωσφορικό άλας, κάλιο, νάτριο και νιτρικό άλας, όταν αποτίθεται στον Αμαζόνιο. Και όταν αποτίθεται στις θάλασσες και στους ωκεανούς προσφέρει σίδηρο στο περιβάλλον και ενισχύεται έτσι η παραγωγή χλωροφύλλης (Mahowald et al., 2005). Τέλος, σημαντική συνέπεια είναι η αποδυνάμωση των τροπικών καταιγίδων (Engelstaedter et al., 2006).

2.2.2 Αερολύματα και ηλιακή ακτινοβολία¹

Πολλή από την ενέργεια που φτάνει στη Γη από τον ήλιο ανακλάται πίσω στο διάστημα από τα αερολύματα και τα νέφη. Διαφορετικά αερολύματα σκεδάζουν ή απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με τις φυσικές τους ιδιότητες. Οι κλιματολόγοι περιγράφουν αυτά τα φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης σαν το "άμεσο φαινόμενο" των αερολυμάτων στο πεδίο ακτινοβολιών της Γης.

Όμως, καθώς τα αερολύματα αποτελούνται από μια ευρεία συλλογή από σωματίδια το συνολικό φαινόμενο δεν είναι καθόλου απλό.

Τα αερολύματα μπορεί να έχουν τεράστια επίδραση στο κλίμα αναλόγως εάν σκεδάζουν ή απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς έτσι αντίστοιχα ψύχουν ή θερμαίνουν την ατμόσφαιρα. Και παρόλο που τα περισσότερα αερολύματα ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία κάποια την απορροφούν. Η επίδραση που θα έχει ένα αερόλυμα στο φως εξαρτάται κυρίως από την σύσταση και το χρώμα των σωματιδίων του.

Τα αερολύματα που ανακλούν το φως είναι σε γενικές γραμμές τα διαφανή αερολύματα ή αυτά με έντονα χρώματα, τα οποία ανακλούν την ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις και πίσω στο διάστημα. Επίσης, είναι τα καθαρά θειικά και νιτρικά αερολύματα που ανακλούν σχεδόν όλη την ακτινοβολία που συναντούν και ψυχραίνουν την ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια άλατος που και αυτά τείνουν να ανακλούν όλη την ηλιακή ακτινοβολία που συναντούν. Και τα σουλφίδια, τα οποία συμβάλλουν και αυτά στο να ψύχουν την ατμόσφαιρα.

Τα αερολύματα που απορροφούν την ακτινοβολία είναι τα σκουρόχρωμα αερολύματα, όπως είναι ο μαύρος άνθρακας που απορροφώντας την ακτινοβολία θερμαίνει την ατμόσφαιρα και ο οργανικός άνθρακας που αναλόγως και της φωτεινότητας του

¹ Σε αυτή την παράγραφο έχουν ληφθεί στοιχεία από την ιστοσελίδα <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>

υποκείμενου εδάφους μπορεί και αυτός να θερμάνει την ατμόσφαιρα. Ενώ η σκόνη επηρεάζει την ακτινοβολία ανάλογα με τη σύσταση των ορυκτών από τα οποία αποτελούνται οι κόκκοι της και από το εάν είναι καλυμμένοι από μαύρο ή οργανικό άνθρακα.

Παράδειγμα αερολυμάτων που σκέδασαν το φως και μείωσαν την θερμοκρασία είναι αυτό της έκρηξης του ηφαιστείου στο όρος Pinatubo στις Φιλιππίνες όπου εκτινάχθηκαν παραπάνω από 20 εκατομμύρια τόνοι διοξειδίου του θείου, οι οποίοι αντέδρασαν με ουσίες στην ατμόσφαιρα και δημιούργησαν θειικά αερολύματα. Αυτά τα σωματίδια παρέμειναν πάνω από τα σύννεφα, δεν ξεπλενόταν από τη βροχή, αποτέθηκαν στην επιφάνεια μετά από αρκετά χρόνια και οι κλιματολόγοι προέβλεψαν ότι θα υπάρξει μείωση της θερμοκρασίας παγκοσμίως. Η πρόβλεψη αυτή αποδείχτηκε σωστή και οι παγκόσμιες θερμοκρασίες μειώθηκαν, για περίπου 2 χρόνια κατά 0,6°C. Το γεγονός αυτό δεν είναι μεμονωμένο, ανά δεκαετία υπάρχει τουλάχιστον ένα γεγονός που μπορεί να έχει τα ίδια αποτελέσματα.

Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι η ψύξη που προκαλείται στην ατμόσφαιρα από σουλφίδια και άλλα ανακλώντα αερολύματα μπορεί να υπερνικήσει τη θέρμανση που προκαλείται από τα αερολύματα μαύρου άνθρακα και από άλλα απορροφώντα αερολύματα σε όλο το πλανήτη. Υπάρχουν μοντέλα που δείχνουν ότι τα ανακλώντα αερολύματα έδρασαν ευεργετικά και απώθησαν την επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου από το 1880. Όμως τα αερολύματα δεν κατανέμονται ισόποσα στον πλανήτη όπως τα αέρια του θερμοκηπίου και γι' αυτό η επίδραση τους φαίνεται σε περιοχική κλίμακα. Και οπωσδήποτε, παρόλη τη σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες, η μελέτη των επιδράσεων των αερολυμάτων είναι μια πρόσφατη προσπάθεια. Από τα 25 κλιματικά μοντέλα που συμπεριλήφθηκαν στην 4^η έκθεση του IPCC (*Adam Voiland et al., 2010*) λιγότερο από 5 συμπεριλάμβαναν τις άμεσες επιδράσεις των αερολυμάτων πέρα από αυτές των σουλφιδίων.

Άλλη μια επίδραση των αερολυμάτων στο κλίμα γίνεται μέσω των νεφών, καθώς τα αερολύματα έχουν περίπλοκες επιδράσεις στα νέφη, βοηθούν στον σχηματισμό τους, στην αύξηση της λευκαύγειας και στην κατακρήμνιση.

Γνωρίζουμε ότι τα σύννεφα σχηματίζονται όταν αρκετοί υδρατμοί συμπυκνώνονται, όμως σε αυτή τη διαδικασία βρίσκονται παρόντα και τα αερολύματα, καθώς ο σχηματισμός των περισσότερων νεφών γίνεται χάρη σε αυτά. Τα αερολύματα λειτουργούν σαν μικροί σπόροι που καλούνται cloud condensation nuclei (πυρήνες συμπύκνωσης νεφών). Οι πιο συχνοί πυρήνες συμπύκνωσης είναι τα φυσικής προέλευσης αερολύματα όπως σουλφίδια,

αλάτι και αμμωνιακά άλατα. Σε αντίθεση, ο μολυσμένος αέρας συνήθως περιέχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση σε υδατό-διάλυτα σωματίδια που σημαίνει ότι νέφη πλούσια σε ρύπους τείνουν να έχουν περισσότερα, αλλά μικρότερα σταγονίδια. Τα μικρότερα σταγονίδια κάνουν τα σύννεφα να είναι φωτεινότερα από ό,τι θα ήταν κανονικά. Έτσι, όπως οι φωτεινές επιφάνειες ανακλούν ηλιακή ακτινοβολία και ψύχουν το κλίμα ενώ οι σκούρες επιφάνειες απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνουν το κλίμα και παραδείγματα αυτών των φαινομένων είναι οι μεγάλες εκτάσεις πάγου που ανακλούν την ακτινοβολία και ο ωκεανός που απορροφά ηλιακή ακτινοβολία και τα κομμάτια θρυμματισμένου πάγου δίνουν στο φως περισσότερη επιφάνεια να ανακλαστεί, με αποτέλεσμα να γίνεται ακόμη πιο φωτεινό από ένα συμπαγές κομμάτι πάγου. Το ίδιο λοιπόν και στα νέφη, αν το νερό είναι διαμερισμένο σε μεγάλο αριθμό μικρών σταγονιδίων, θα ανακλά περισσότερο φως.

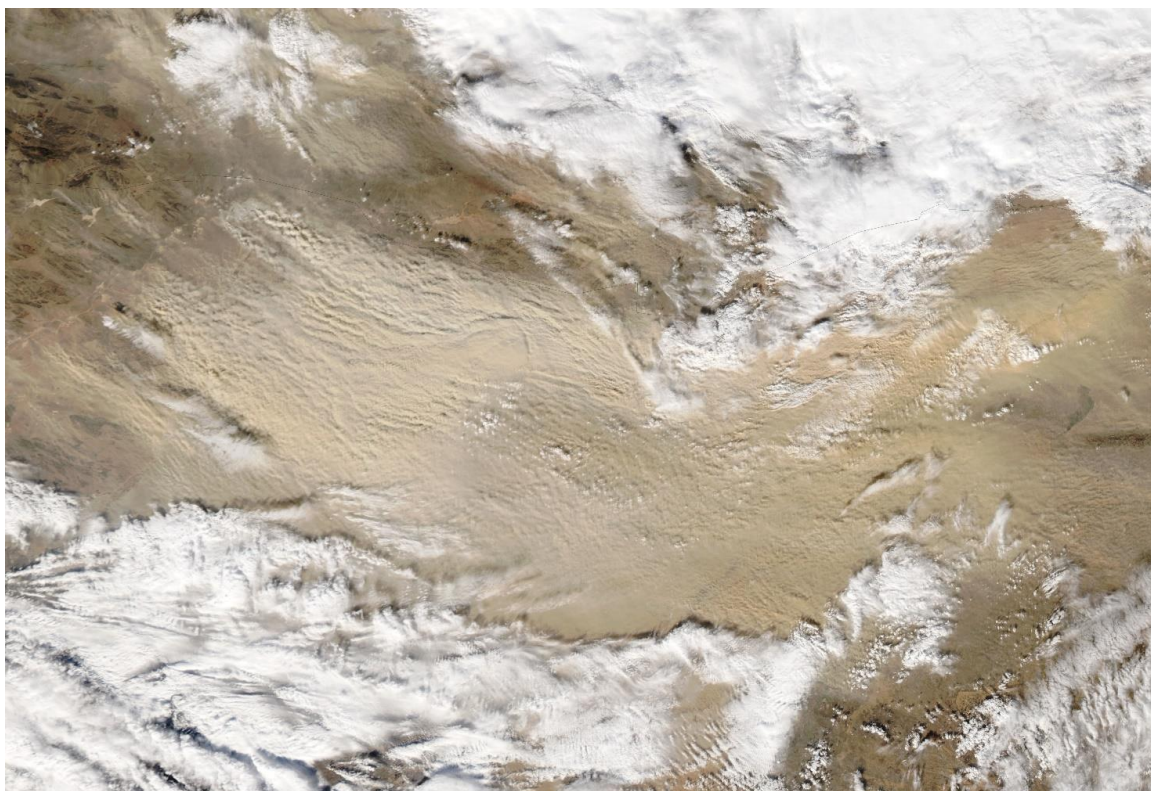
Τα ανακλώντα αερολύματα, επίσης, τείνουν να κάνουν τα νέφη πιο φωτεινά εκτείνοντας τον κύκλο ζωής τους, ενώ ο μαύρος άνθρακας από την αιθάλη μπορεί να έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Αυτή η επίδραση των αερολυμάτων καλείται -cloud albedo affect- λευκαύγεια νεφών, δημιουργεί τα φωτεινότερα νέφη, τα οποία αποτρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια της Γης, σκιάζοντας τον πλανήτη και προκαλώντας ψύξη. Και έτσι, μπορεί να έχουν μεγάλη επίδραση στο κλίμα. Αν και πρόσφατα ξεκίνησε η αποκωδικοποίηση της επίδρασης της λευκαύγειας των νεφών, πιστεύεται ότι τα νέφη ψύχουν την επιφάνεια της Γης με το να σκιάζουν το 60% του πλανήτη. Και ότι, με μόνο μια αύξηση της τάξης του 5% στη λευκαύγεια των νεφών θα μπορούσε να εξισορροπηθεί η θέρμανση που οφείλεται στα αέρια του θερμοκηπίου, ενώ αντίθετα μια μακροπρόθεσμη μείωση των νεφών θα είχε καταστροφικές επιπτώσεις. Βέβαια, επειδή τα αερολύματα δεν κατανέμονται ισόποσα στον πλανήτη, όπως τα αέρια του θερμοκηπίου, η επίδραση τους φαίνεται μόνο σε περιοχική κλίμακα. Και γι' αυτό, λόγω αυτής της διαφορετικής κατανομής των αερολυμάτων στον πλανήτη, δεν συνυπάρχουν στην ίδια περιοχή για να ακυρώνει το ένα την επίδραση του άλλου.

Ακόμη, θεωρείται ότι τα αερολύματα καταστέλλουν την κατακρήμνιση καθώς τα σωματίδια μειώνουν το μέγεθος των σταγόνων νερού μέσα στα σύννεφα. Μελέτες της ρύπανσης στον ινδικό ωκεανό και στο κάψιμο οργανικών υλικών στον Αμαζόνιο έχουν δείξει ότι ο μαύρος άνθρακας θερμαίνει την ατμόσφαιρα της περιοχής και ότι προκαλεί την εξάτμιση των σταγονιδίων των σύννεφων. Αυτή η διαδικασία που αποκαλείται έμμεση επίδραση, μετατρέπει τα σύννεφα σε αχλύ καπνού (smoky haze) που αναστέλλει την κατακρήμνιση.

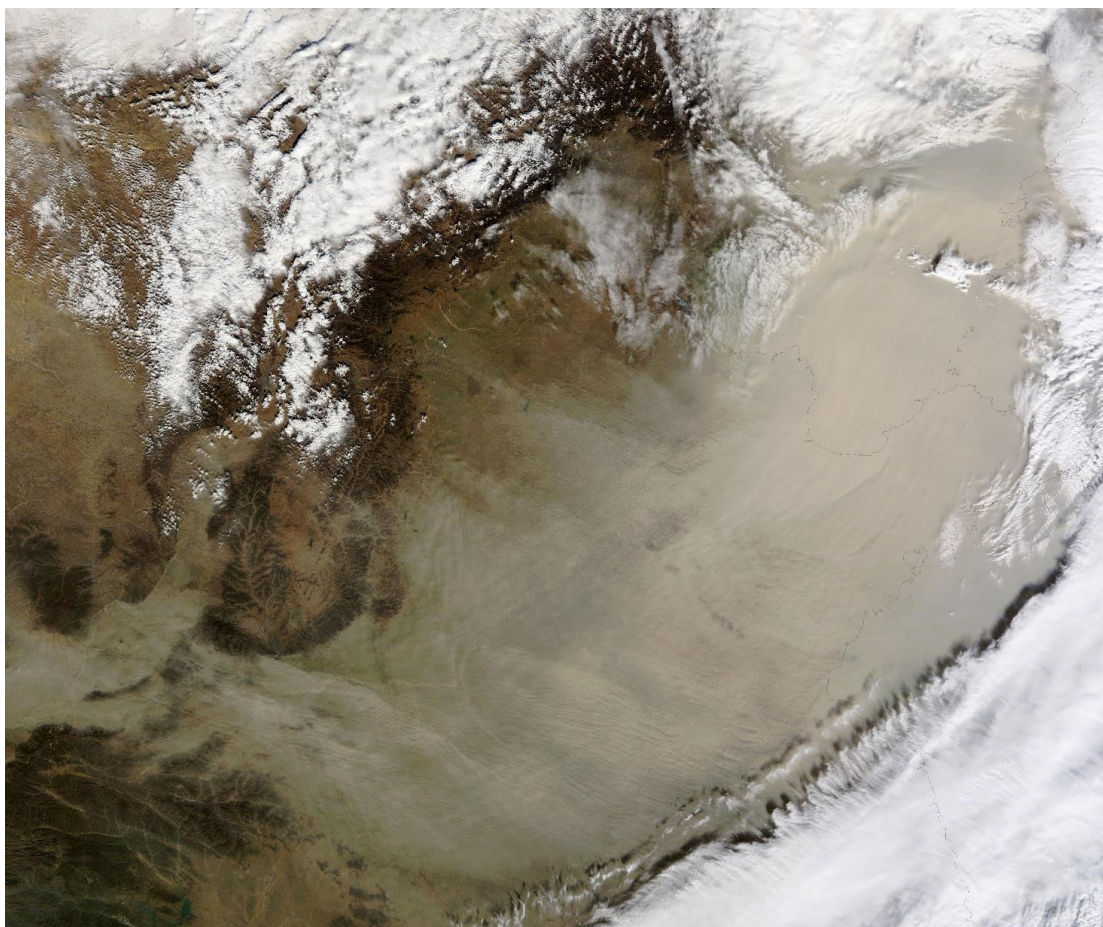
Αν και κάτω από κάποιες περιβαλλοντικές συνθήκες, τα αερολύματα μπορούν να σχηματίσουν μεγαλύτερα σύννεφα που είναι περισσότερο πιθανά να παράγουν αστραπές και ισχυρή κατακρήμνιση. Σε συγκεκριμένα μέρη, οι μετεωρολόγοι έχουν διακρίνει ένα περιοδικό φαινόμενο στο οποίο η συχνότητα των καταιγίδων σχετίζεται με τα μεσοβδόμαδα υψηλά/μέγιστα (peaks) σε εκπομπές αερολυμάτων.

2.2.3 Έρημοι και καταιγίδες σκόνης

Όπως αναφέραμε μεγάλο ποσοστό αερολυμάτων δημιουργείται από τις διάφορες ερήμους της Γης, οι σημαντικότερες από αυτές είναι η Σαχάρα και η Gobi στην Κίνα. Όμως τι ορίζεται ως έρημος; Είναι η περιοχή στην οποία η μέση απώλεια επιφανειακού νερού είναι μεγαλύτερη από τις επιφανειακές κατακρημνίσεις. Συγκεκριμένα, όταν τα ετήσια κατακρημνίσματα της περιοχής είναι <250-500 mm θεωρείται έρημος. Η αιολική δράση στις ερήμους δεν προκαλεί μόνο απλή αιώρηση σωματιδίων αλλά και καταιγίδες σκόνης (dust storms). Συνήθως, οι καταιγίδες σκόνης (dust storms) παρερμηνεύονται για αμμοθύελλες όμως είναι διαφορετικά φαινόμενα. Οι αμμοθύελλες δρουν τοπικά, με ύψος μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω από το έδαφος και πλάτος έκτασης δεκάδων χιλιομέτρων, αποτελούνται από μεγάλα σωματίδια άμμου και γι' αυτό έχουν μικρή διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα, της τάξης των μερικών ωρών και είναι έντονα καταστροφικά φαινόμενα. Οι καταιγίδες σκόνης (dust storms) είναι πολύ μεγαλύτερης έκτασης φαινόμενα, αποτελούνται από λεπτά σωματίδια ιλύος και πηλού τα οποία μεταφέρονται σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων από το σημείο δημιουργίας του φαινομένου και σε υψόμετρα μερικών χιλιομέτρων, αλλά παρότι μπορούν και αυτές να αποβούν καταστροφικές, είναι μικρότερης έντασης και καταστροφικότητας φαινόμενα από τις αμμοθύελλες.



Εικόνα 2.1 Καταιγίδα σκόνης που δημιουργήθηκε από την έρημο Gobi το 2010, καταγράφηκε από το MODIS του Aqua δορυφόρου της NASA.



Εικόνα 2.2 Αμμοθύελλα που σχηματίστηκε μια μέρα μετά το dust storm του 2010 στην έρημο Gobi, καταγράφηκε από το MODIS στο Terra δορυφόρο της NASA.

2.2.4 Έρημοι ως πηγές αερολυμάτων

Σημαντικό κομμάτι της μελέτης αυτής είναι η συσχέτιση των τρόπων δημιουργίας της σκόνης στη Γη με αυτούς στον Άρη. Για να γίνει αυτό πρέπει να αναλυθούν καλύτερα οι διαδικασίες που δημιουργούν τη σκόνη όπως σε ποιες περιοχές δρουν και γιατί.

Η περιοχή με τη μεγαλύτερη παραγωγή σκόνης παγκοσμίως και υπεύθυνη για τον εμπλουτισμό του χώματος του Αμαζονίου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ονομάζεται Chad δυτικά του Σουδάν, συγκεκριμένα από μια περιοχή που ονομάζεται Bodélé Depression (16° -18°N και 15° -19°E).



Εικόνα 2.3 Απεικόνιση της μεταφοράς σκόνης πάνω από το Bodélé Depression από το MODIS του δορυφόρου Terra της NASA, το 2019

Τον τίτλο της κυριότερης πηγής σκόνης του πλανήτη τον κέρδισε, γιατί σε αντίθεση με τις άλλες περιοχές, είναι ενεργή όλο τον χρόνο, ακόμα και τους φθινοπωρινούς - χειμερινούς μήνες. Αλλά, η περιοχή αυτή δεν είναι μόνο η κυριότερη πηγή σκόνης, η επιφάνεια της αποτελείται από κοιτάσματα διατομιτών που αποτέθηκαν 6000 χρόνια πριν, στην παλαιολίμνη του Chad. Ως αποτέλεσμα η περιοχή περιέχει μεγάλη ποσότητα διαβρώσιμου υλικού και λόγω αυτού και του μεγέθους τους τα σωματίδια του εδάφους πολύ εύκολα έρχονται σε αιώρηση από τους ανέμους. Επίσης, η περιοχή χαρακτηρίζεται από μια τοπική αιολική διεργασία ονόματι “Bodélé Low Level Jet” (Washington and Todd, 2005), η οποία ξεκινάει τη διαδικασία της αναπήδησης, πρώτα των πιο μεγάλων σωματιδίων τα οποία

έχουν μεταφερθεί από τη Σαχάρα και βρίσκονται μαζί με τα τοπικά μικρότερα που διεγείρονται έτσι ώστε να αιωρηθούν και αυτά (Banks et al., 2010).

2.2.5 Τροχιές μετακίνησης των αερολυμάτων

Με κύρια πηγή αερολυμάτων την Αφρική παρατηρούμε τις εξής πορείες μετακίνησης: Τις δυτικές τροχιές, όπου η σκόνη διασχίζει τον Ατλαντικό και καταλήγει στη Νότια Αμερική. Σύμφωνα με τους Goudie and Middleton, 2006, το 30-50% της συνολικής σκόνης από την Σαχάρα διασχίζει τον Ατλαντικό και βάσει των δεδομένων του MODIS (Kaufman et al., 2005), η ποσότητα αυτή ισοδυναμεί σε 240 ± 80 Tg σκόνης ανά χρόνο. Ο χρόνος μεταφοράς της μάζας αυτής είναι 5-7 μέρες. Η δυτική Αφρική τροφοδοτεί την περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού και το Bodélé Depression τροφοδοτεί τον Αμαζόνιο. Τις νότιες τροχιές, οι οποίες έχουν σημείο εκκίνησης βόρειο-δυτικά της Σαχάρας και μεταφέρουν την σκόνη, περνώντας πάνω από την μεσόγειο, στην Ευρώπη. Το φαινόμενο της μεταφοράς σκόνης στην Ευρώπη είναι πολύ συχνό και κάθε χρόνο μεταφέρονται $80-120 \times 10^6$ τόνοι. Η τροχιά αυτή περνά από τον Βισκαϊκό όρμο, μέσω ανέμων της μέσης τροπόσφαιρας και η σκόνη μεταφέρεται στην Αγγλία, τη Βόρεια Ευρώπη ακόμα και τη Σκανδιναβία (Middleton and Goudie, 2001). Η εναπόθεση της σκόνης στην Ευρώπη γίνεται κυρίως μέσω κατακρημνισμάτων. Τέλος, υπάρχουν ενδείξεις ότι η σκόνη από τη Σαχάρα μπορεί να φτάσει και πιο ανατολικά από την Ασία. Έχει παρατηρηθεί επεισόδιο σκόνης (dust event) στο British Columbia του Καναδά τον Μάρτιο του 2005 που θεωρείται ότι έκανε δυο εβδομάδες να διασχίσει Ασία και Ειρηνικό μέχρι τον Καναδά (McKendry et al., 2007)

2.2.6 Τρόποι πρόγνωσης επεισοδίων σκόνης

Λόγω της παγκόσμιας κλίμακας της δράσης του φαινομένου αυτού, της μεταφοράς αερολυμάτων και ορυκτής σκόνης και των πολλαπλών επιπτώσεων του σε διάφορους τομείς χρειάστηκε να δημιουργηθούν μέθοδοι κατανόησης της δημιουργίας τους για την καλύτερη προετοιμασία των πληγείσων περιοχών. Κάποια από αυτά τα μοντέλα είναι τα DREAM (Nickovic et al., 2001), DEAD (Zender et al., 2003), GOCART (Ginoux et al., 2001), και RegCM3 (Zakey et al., 2006), τα οποία καταγράφονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Παραδείγματα μοντέλων μεταφοράς αερολυμάτων και ορυκτής σκόνης. Τα μοντέλα αερολυμάτων τείνουν να έχουν την σκόνη ως μία συνιστώσα, ενώ τα μοντέλα της σκόνης επικεντρώνονται στις διεργασίες της σκόνης

Model	Reference	Model type	Domain	Horizontal resolution
CHIMERE	Bessagnet et al. (2004)	Aerosol	Regional	0.5 °
DEAD	Zender et al. (2003)	Dust	Global	2.8125 °
DREAM	Nickovic et al. (2001)	Dust	Regional	4-100 km
GOCART	Ginoux et al. (2001)	Aerosol	Global	2 ° lat., 2.5 ° lon.
LM-MUSCAT-DES	Heinold et al. (2007)	Dust	Regional	0.125 ° (14 km)
MesoNH	Grini et al. (2006)	Aerosol	Regional	Variable
MOCAGE	Bousserez et al. (2007)	Aerosol	Regional	Variable- 0.5 °, 2 °
ModelE	Miller et al. (2006)	Aerosol	Global	4 ° lat., 5 ° lon.
RegCM3	Zakey et al. (2006)	Dust	Regional	20-80 km
SHAMAL		Dust	Regional	0.25 °/0.5 °

Παρόλο που ανακαλύφθηκε πριν 40 χρόνια ότι τα αερολύματα μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα, οι απαραίτητες μετρήσεις για να κατανοηθούν τα φαινόμενα αυτά ήταν μη επαρκείς. Τώρα με την πρόοδο της επιστήμης, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν μια γκάμα από δορυφόρους, αεροσκάφη και επίγεια όργανα που επιτρέπουν την παρατήρηση των αερολυμάτων. Τα ραδιόμετρα, όργανα που ποσοτικοποιούν το ποσό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (φως), είναι τα πιο σημαντικά υπάρχοντα όργανα.

Το κύριο μέγεθος που καταγράφουν είναι το οπτικό βάθος των αερολυμάτων (aerosol optical depth - AOD), μια μέτρηση του μεγέθους του φωτός που σκεδάζεται ή απορροφάται από τα αερολύματα στην ατμόσφαιρα. Ένα AOD μικρότερο του 0,05 υποδηλώνει καθαρό ουρανό με σχετικά λίγα αερολύματα και πλήρη ορατότητα, ενώ η τιμή 1 υποδηλώνει ομιχλώδεις συνθήκες. Τιμές μεγαλύτερες από 2 ή 3 δηλώνουν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αερολυμάτων. Άλλο ένα μέγεθος που μετράνε τα όργανα παρατήρησης αερολυμάτων είναι η λευκαύγεια μονής σκέδασης (single scattering albedo - SSA), το ποσό του φωτός που σκεδάζεται σε σχέση με το σύνολο. Οι τιμές για τα περισσότερα αερολύματα κυμαίνονται από 0,7 για τα απορροφητικά σωματίδια ενώ από 1 για τα αερολύματα που μόνο ανακλούν φως. Το πρώτο όργανο μέτρησης οπτικού βάθους αερολυμάτων από το διάστημα ήταν το Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), το οποίο παίρνει μετρήσεις από το ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Επίσης, το AVHRR ήταν ένα ραδιόμετρο μέτρησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς ανακλούνταν από τα αερολύματα, χρησιμοποιώντας τον σκοτεινό ωκεανό ως υπόβαθρο.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν όργανα πολύ καλύτερα από τα προηγούμενα τα οποία μπορούν να μελετήσουν και τα αερολύματα πάνω από τη στεριά. Κάποια από αυτά είναι το Multi-angle Imaging Spectrodiometer ή MISR και το Moderate

Resolution Imaging Spectroradiometer ή MODIS, τα οποία είναι ικανά να παρατηρούν αερολύματα υπό πολύ περισσότερες γωνίες και για περισσότερα μήκη κύματος έτσι ώστε να μπορούν να παρέχουν πιο ακριβή αποτελέσματα.

Τα σύγχρονα όργανα μπορούν να δείξουν ιδιότητες του φωτός που τα παλαιότερα δεν μπορούσαν. Το Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observer ή CALIPSO χρησιμοποιεί μια τεχνολογία βασισμένη σε λέιζερ που παρέχει αναλυτικά κατακόρυφα προφίλ αερολυμάτων και νεφών. Ένα γαλλικό όργανο ονόματι Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances ή POLDER προσφέρει πληροφορίες για την πόλωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την διάδοσή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Αυτή η προηγουμένως μη μελετημένη ποσότητα είναι πολύ χρήσιμη για την απόκτηση πληροφοριών για τον τύπο των σωματιδίων.

Οι δορυφόροι μάς προσφέρουν μια σφαιρική παγκόσμια ανάλυση για το πώς τα αερολύματα επηρεάζουν το κλίμα της Γης, αλλά δεν είναι τα μόνα όργανα που μας δίνουν τέτοια δεδομένα. Δίκτυα από επίγειους αισθητήρες χρησιμοποιούνται για επαλήθευση των μετρήσεων των δορυφόρων καθώς και για τις πιο ακριβείς μετρήσεις του AOD.

Τέτοια δίκτυα έχει και η NASA. Ένα από αυτά είναι ένα παγκόσμιο δίκτυο επίγειων μετρητών ονόματι Aerosols Robotic Network (AERONET), το οποίο αποτελείται από περισσότερα από 200 ηλιακά φωτόμετρα που μετράνε το AOD ανά τον κόσμο. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να βρει την ποσότητα και τον τύπο αερολυμάτων στον ουρανό μετρώντας την ένταση του φωτός κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού.

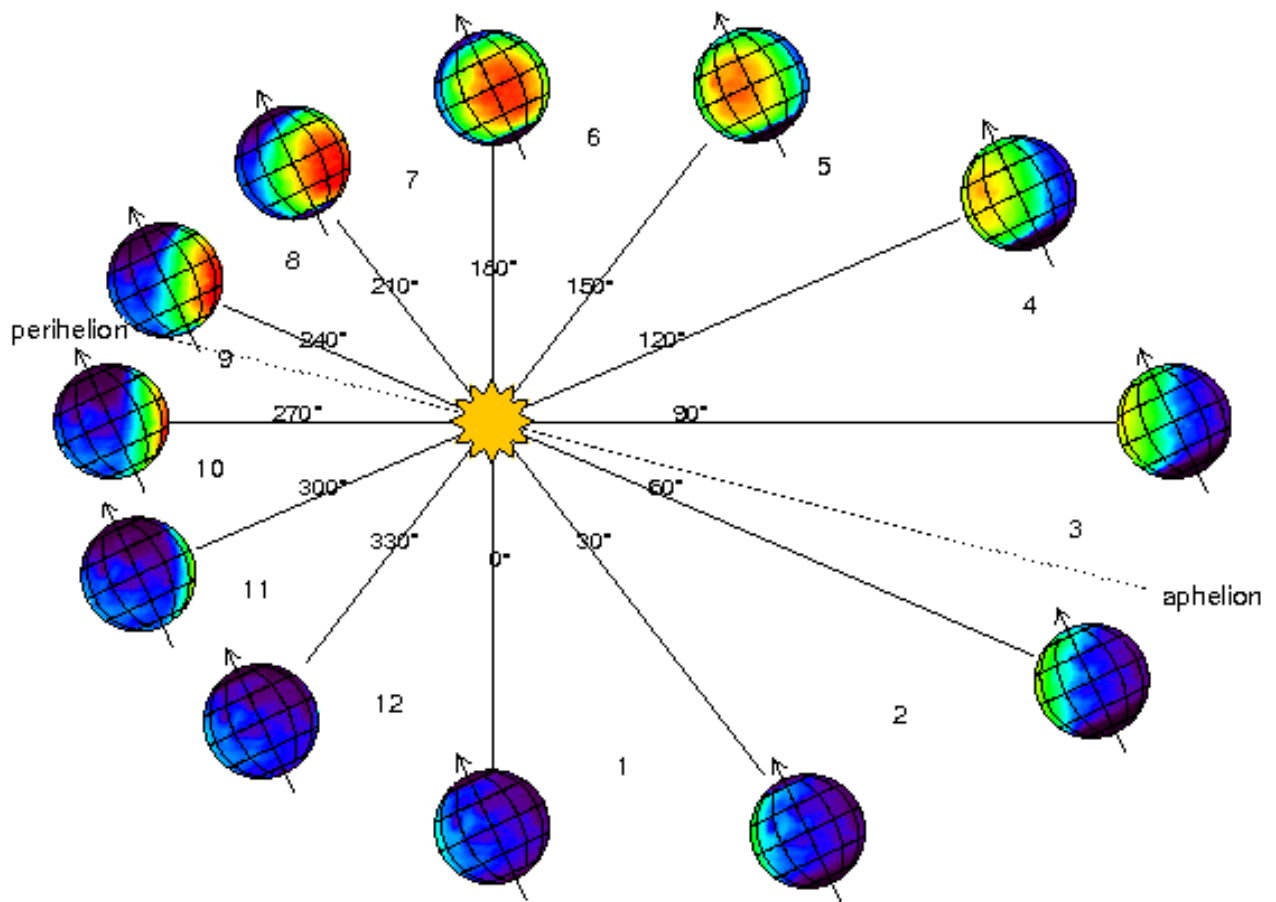
2.3 Άρης

Ο Άρης έχει διάμετρο 6,799 km, μάζα $6,4 \times 10^{23}$ kg, η επιτάχυνση της βαρύτητας στον Άρη είναι 0,370 φορές από αυτήν της Γης, ο άξονας περιστροφής του $25,19^\circ$ ως προς το επίπεδο της τροχιάς του, ο ένας χρόνος είναι 686,98 μέρες, έχει 24 μήνες και 4 εποχές, η μια μέρα έχει 24h 39m.

Οι εποχές του Άρη συγκριτικά με αυτές της Γης διαφέρουν λόγω της διαφορετικής τροχιάς του κάθε πλανήτη.

Η Γη έχει σχεδόν σφαιρική τροχιά και κινείται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα με αποτέλεσμα οι εποχές της να έχουν την ίδια διάρκεια, ενώ ο Άρης κινείται με ελλειπτική τροχιά η οποία δημιουργεί επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Ο Άρης βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον Ήλιο στο αφήλιο του, όπου έχει απόσταση 249

εκατομμύρια km και κινείται και πιο αργά. Την κοντινότερη απόσταση του προς τον Ήλιο την έχει στο περιήλιο του, 207 εκατομμύρια km όπου κινείται και πιο γρήγορα.



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση των solar longitude L_s και των "εποχών" του Άρη.

Σε αντίθεση με τη Γη, ο Άρης δεν έχει φεγγάρι με αργή περιστροφή έτσι ώστε να του "δώσει" μήνες και αν και υπάρχουν πολλά ημερολόγια για τον Άρη κανένα δεν είναι σε ευρεία χρήση. Ο τρόπος που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες για να ορίσουν το πέρασμα ενός χρόνου στον Άρη είναι τα solar longitude L_s , τα οποία είναι η γωνία Άρη-Ήλιου που μετρείται από την εαρινή ισημερία του βόρειου ημισφαιρίου που το $L_s=0$. Έτσι το $L_s=90$ αντιστοιχεί στο βόρειο θερινό ηλιοστάσιο όπως και το $L_s=180$ σηματοδοτεί τη βόρεια φθινοπωρινή ισημερία και το $L_s=270$ στο βόρειο χειμερινό ηλιοστάσιο.

Συγκεκριμένα

$L_s=0$ equinox(Ισημερία)

$L_s=90$ summer solstice (θερινό ηλιοστάσιο)

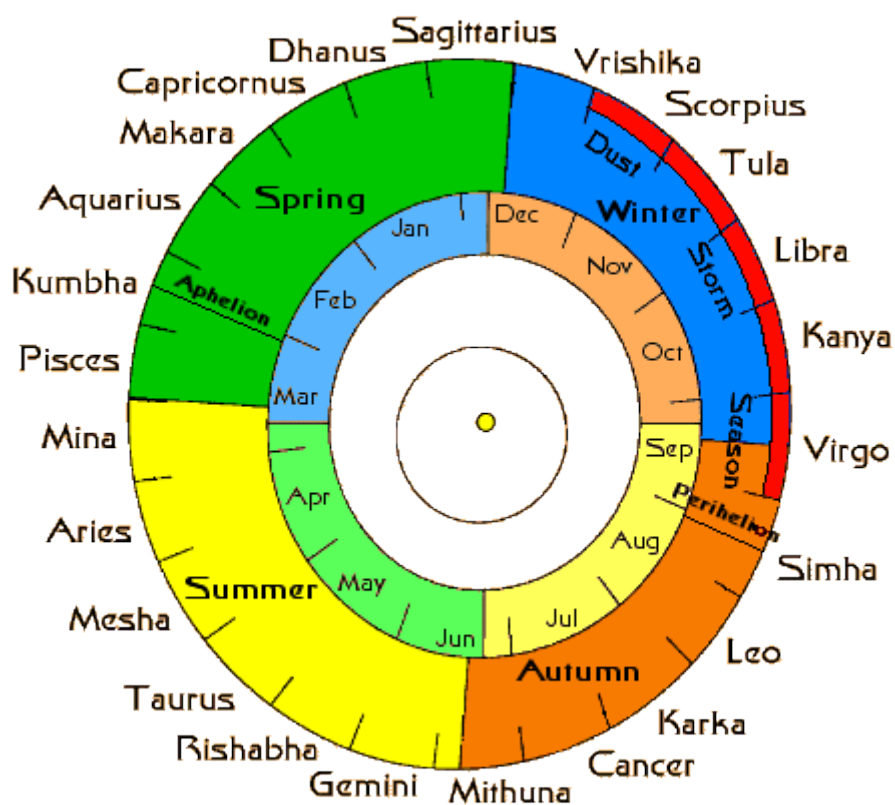
$L_s=180$ autumn equinox (φθινοπωρινή ισημερία)

Ls=270 winter solstice (χειμερινό ηλιοστάσιο)

Σύμφωνα με το ημερολόγιο Darian, το οποίο χρησιμοποιούμε σε αυτή την εργασία για την καλύτερη προσέγγιση των μεθόδων χρονομέτρησης του κόκκινου πλανήτη, ο ένας χρόνος στον Άρη χωρίζεται σε 686,98 γήινες μέρες που αποτελούνται από 24 ώρες και 39 λεπτά. Οι μήνες είναι 24 και κάθε μήνας αποτελείται από 28 sols (ονομασία αρειανών ημερών) μόνο ένας μήνας έχει 27 sols. Οι μήνες αποτελούνται από 4 εβδομάδες των 7 sols όπως και στη Γη. Το ημερολόγιο αυτό έχει δώσει ονομασίες για τον κάθε μήνα και μέρα της εβδομάδας όπου έχουν μεγάλο ενδιαφέρον και παρατίθενται παρακάτω.

Ο πρώτος μήνας του χρόνου είναι ο Sagittarius και μετά με την σειρά είναι: Dhanus, Capricornus, Makara, Aquarius, Kumbha, Pisces, Mina, Aries, Mesha, Taurus, Rishaba, Gemini, Mithuna, Cancer, Karka, Leo, Simha, Virgo, Kanya, Libra, Tula, Scorpius, Vrishika.

Και οι μέρες της εβδομάδας είναι οι εξής: Dies Solis, Dies Lunae, Dies Martis, Dies Mercurii, Dies Jovies, Dies Veneris, Dies Saturni.



Εικόνα 2.5 Απεικόνιση του ημερολογίου Darian για τους μήνες και τις εποχές του Άρη συγκριτικά με αυτές στη Γη

2.3.1 Γεωλογία του Άρη

Όλες οι πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί για τον Άρη προέρχονται από τηλεσκόπια, αεροσκάφη ακόμα και από μετεωρίτες που προέρχονται από τον Άρη. Οι περισσότεροι από αυτούς τους μετεωρίτες είναι πυριγενή πετρώματα όπως βασάλτες, ο παλαιότερος μετεωρίτης από τον Άρη είναι 4.1 δισεκατομμυρίων χρονών, ο οποίος αποτελείται ορυκτολογικά από την ομάδα ορυκτών του ορθοπυροξενιτή (NASA Mars Exploration, <https://mars.nasa.gov/>) και περιέχει ορυκτά τα οποία σχηματίστηκαν μέσω αντιδράσεων του μητρικού πετρώματος με νερό, πριν από 3.9 δισεκατομμύρια χρόνια. Τα αρχαιότερα ορυκτά του Άρη που γνωρίζουμε είναι ζιρκόνια 4.4 δισεκατομμυρίων χρόνων, τα οποία αποτελούν μέρος ενός μετεωρίτη 2.1 δισεκατομμυρίων ετών, ενώ τα νεότερα πετρώματα του Άρη είναι βασαλτικοί μετεωρίτες γνωστοί ως shergottites (σεργκοτίτες), οι νεότεροι αυτών είναι 180 εκατομμυρίων χρονών.

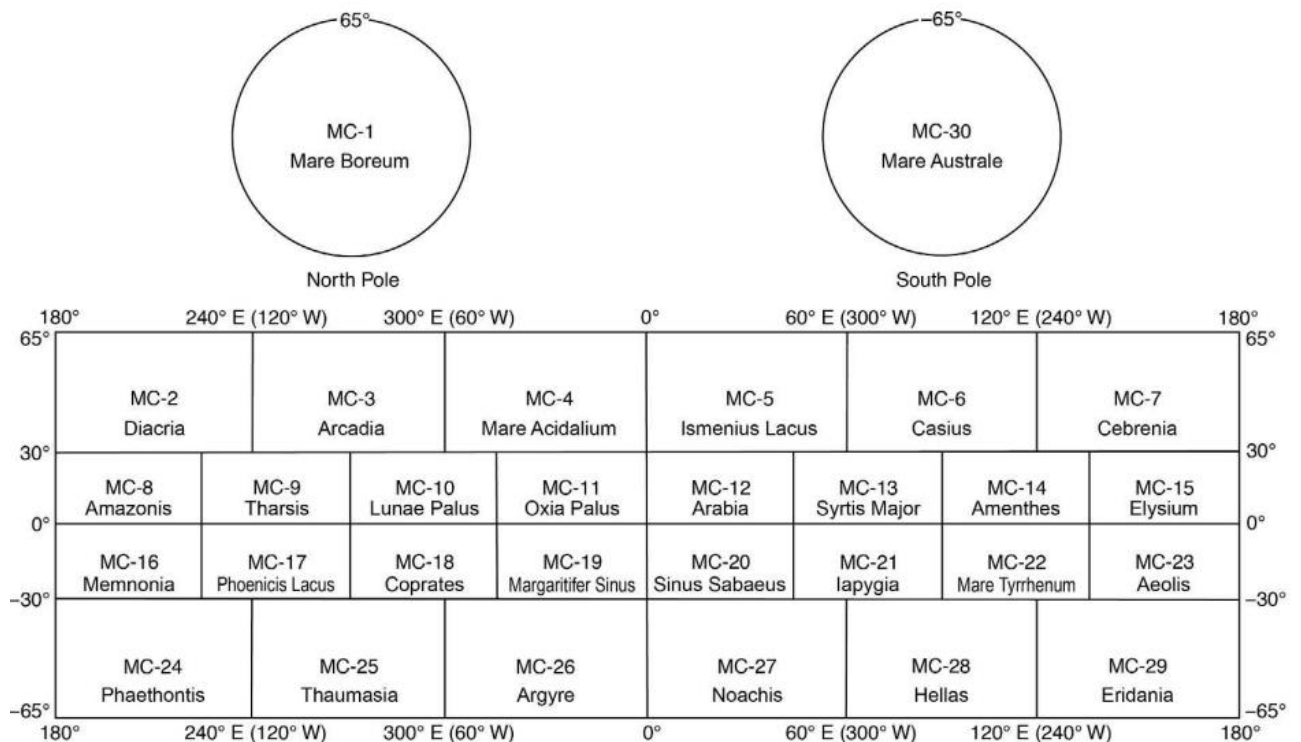
Στο έδαφος του Άρη, αλλά και σε μετεωρίτες από αυτόν, βλέπουμε μια ποικιλία πετρωμάτων, όπως πυριτικούς βασάλτες, ιζηματογενή sandstone, mudstone, impactites, εβαπορίτες. Αυτά τα πετρώματα αποτελούνται από ορυκτά όπως ο ολιβίνης, πυρόξενα, αμβιβολίτες (amphiboles), feldspar, carbonates, sulfates, silica, phyllosilicates, phosphates και iron oxides.

2.3.2 Επιφάνεια του Άρη

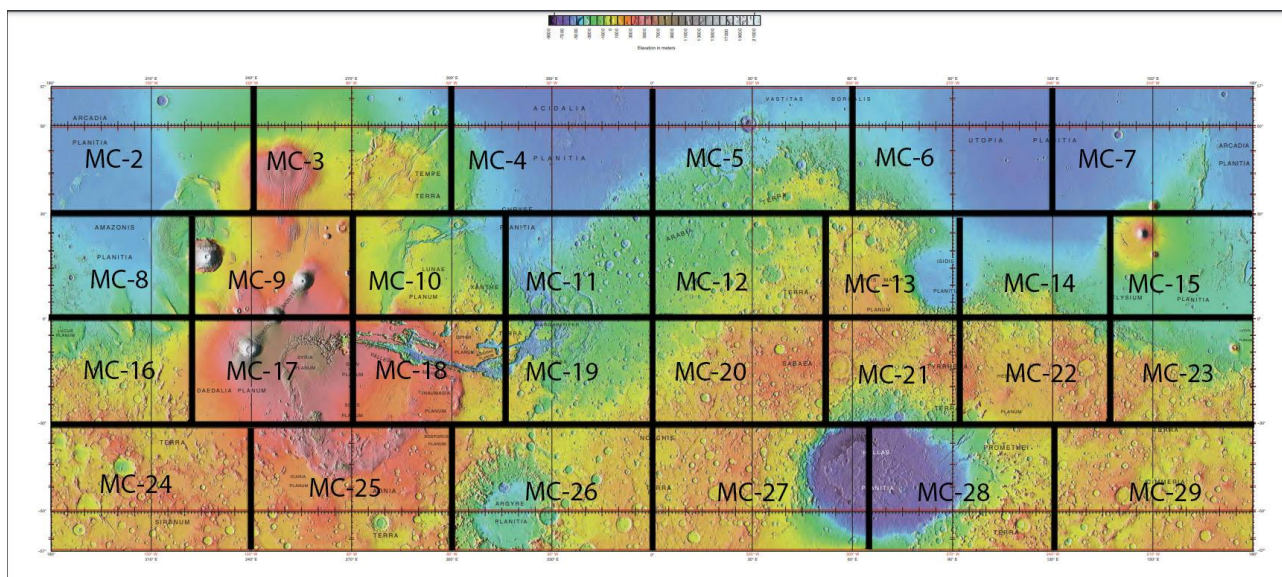
Η επιφάνεια του Άρη αποτελείται από γνωστές δομές, όπως θίνες αιολικής προέλευσης καθώς και δομές ιζηματογενής απόθεσης, γνωστές και ως transverse aeolian ridges (TARS) και Polar Layered Deposits (PLDs), οι οποίες εμφανίζονται και εξαφανίζονται καθώς η θερμοκρασία και οι εποχές του Άρη αλλάζουν. Παρόμοια μέρη υπάρχουν και στην Γη όπου και χρησιμοποιούνται συγκριτικά με αυτά του Άρη. Κάποια από αυτά είναι η Ισλανδία, στην οποία υπάρχουν βασάλτες με υψηλή συγκέντρωση σιδήρου όπως και στους βασάλτες του Άρη, η Ανταρκτική όπου όπως και στον Άρη επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και ξηρότητα, η έρημος Ατακάμα στη Χιλή, ξηρή μαζί με παρόμοια πετρώματα, η Αριζόνα όπου έχει βασαλτική ηφαιστειότητα πάνω σε διαβρωμένες και στρωματοποιημένες ακολουθίες πετρωμάτων και τέλος η Χαβάη που έχει μεγάλα ασπιδοφόρα ηφαίστεια όπως είναι και το όρος Όλυμπος στον Άρη.

2.3.3 Γεωγραφία του Άρη

Από την αρχή της εξερεύνησης του κόκκινου πλανήτη κατασκευάστηκαν πολλαπλοί χάρτες, ο πρώτος ιστορικά καταγεγραμμένος χάρτης κατασκευάστηκε το 1877 από τον Ιταλό αστρονόμο, Giovanni Schiaparelli. Από το 1877 μέχρι το 2022 η επιστήμη προόδευσε και συγκριτικά με τους πρώτους χάρτες που ήταν εντελώς εσφαλμένοι έχουμε μια πολύ καλύτερη προσέγγιση στο πως κατασκευάζουμε τους Αρειανούς χάρτες τώρα. Πέρα από μορφολογικούς χάρτες έχουμε κατασκευάσει ακόμα και χάρτες για την κατανομή σκόνης, χάρτες λευκαύγειας, χάρτες βαρύτητας Bouguer, χάρτες θερμικής αδράνειας και για πολλές άλλες μεταβλητές σημαντικές για την κατανόηση του Άρη. Όμως από τους πιο σημαντικούς χάρτες είναι ο γεωγραφικός, καθώς πρέπει να μπορούμε να κατανοήσουμε που δρουν όλες αυτές οι μεταβλητές που αναφέραμε και να έχουμε κοινά σημεία αναφοράς. Η εργασία αυτή βασίστηκε στον άτλαντα που κατασκεύασαν οι Coles et al. (2019). Ο άτλας αυτός χωρίζει τον Άρη σε 30 ξεχωριστούς χάρτες ονόματι map chart (MC-1....MC-30). Ο κάθε ένας από αυτούς έχει κλίμακα 1:5.000.000 και ονομάζεται τετράπλευρο. Στη γεωλογία χρησιμοποιούμε τον όρο τετράπλευρο για οποιοδήποτε χάρτη ακόμα και να μην έχει 4 γωνίες και έχοντας ορίσει αυτές τις παραδοχές μπορούμε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα για το πού και ποια αιολικά φαινόμενα δρουν στον Άρη



Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση του διαμερισμού του Άρη σε 30 χάρτες



Εικόνα 2.7 Μορφολογικός χάρτης του Άρη και απεικόνιση των τετραπλεύρων MC-2 έως MC-29

Η ατμόσφαιρα του Άρη αποτελείται κατά 95% από CO₂ το υπόλοιπο είναι αργό, O₂, άνθρακα, μονοξείδιο και υδρατμούς. Η θερμοκρασία της κυμαίνεται από -130 έως 27°C. Η πίεση στον πλανήτη είναι 0,60 Kpa και είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της Γης. Παρόλη τη χαμηλή πυκνότητα της ατμόσφαιρας, ο άνεμος και οι αιολικές διεργασίες κυριαρχούν στο τωρινό περιβάλλον. Άρα έχουμε και διεργασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης όπου τα προϊόντα των διεργασιών αυτών είναι εμφανή στην επιφάνεια του Άρη. Τα προϊόντα αυτά είναι κυρίως δομές όπως δομές ροής νερού, παγετώδεις δομές όπου υπάρχει και πάγος κάτω από αυτές. Επίσης, άλλες δομές που υπάρχουν είναι αιολικές και κατολίσθησης. Από το όχημα Rover της NASA και άλλους ερευνητικούς μηχανισμούς που βρίσκονται σε τροχιά έχουν παρατηρηθεί πάνω από 800 ανεμοστρόβιλοι και από μετέπειτα αποστολές ανακαλύφθηκαν περαιτέρω αιολικές δομές όπως θίνες, αιολικά διαβρωμένα πετρώματα κ.λπ. Όμως, το κυριότερο αιολικό φαινόμενο που εμφανίζεται στον Άρη είναι οι καταιγίδες σκόνης, οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν τηλεσκοπικά και από τη Γη. Κάποιες από αυτές σχηματίζονται από τοπική και περιοχική ανύψωση σκόνης και κάποιες περικλείουν όλο τον πλανήτη. Η ανύψωση σκόνης στον Άρη γίνεται μόνο από ισχυρούς ανέμους που είναι σπάνιο φαινόμενο, και σε αντίθεση με τη Γη όπου η διάμετρος της αιωρούμενης σκόνης είναι 10-20 μm, στον Άρη είναι εξαιρετικά λεπτή, μόνο μερικών μm. Το φαινόμενο της ανύψωσης της σκόνης και της αιώρησής της για μεγάλες αποστάσεις επιτυγχάνεται στον Άρη από διεργασίες όπως οι ανεμοστρόβιλοι που είναι πολύ πιο συχνοί από τους ισχυρούς ανέμους, σχηματίζονται από τη θέρμανση

της επιφάνειας και λειτουργούν σαν “ηλεκτρικές σκούπες” ρουφώντας τη σκόνη από την επιφάνεια.

2.3.4 Τεκτονική του Άρη

Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οφείλονται σε τεκτονική παραμόρφωση και διακρίνονται σε εφελκυστικά, που δημιουργούν δομές όπως, διακλάσεις, τεκτονικά βυθίσματα και χάσματα της Valles Marineris και συμπιεστικά που δημιουργούν δομές όπως, ράχες και lobate scraps, καμπυλόγραμες και μεγάλες δομές που βρίσκονται σε διάφορα ουράνια σώματα, πιστεύεται ότι οφείλονται από επωθήσεις (thrust faults) που αναπτύσσονται μέσα σε δομικά ακέραια πετρώματα (Watters, 1993; Watters et al., 1998).

2.3.5 Εσωτερικό του Άρη

Γνωρίζουμε ότι αποτελείται από πυρήνα, μανδύα, φλοιό όπου είναι μαφικός, ενώ δεν ξέρουμε το πάχος του κάθε στρώματος. Έχει πυκνότητα μικρότερη από αυτή της Γης. Τα μοντέλα που έχουμε για τη φύση του πυρήνα του Άρη είναι βασισμένα σε αυτά που ξέρουμε για τον πυρήνα της Γης. Αν ο πυρήνας του αποτελείται κυρίως από σίδηρο με μικρές ποσότητες οξυγόνου και σουλφιδίων, τα γεωφυσικά μοντέλα δείχνουν έναν πυρήνα με διάμετρο περίπου 4400 km, όμως, αν αποτελείται κυρίως από νικέλιο-σίδηρο τότε τα μοντέλα δείχνουν έναν πυρήνα με διάμετρο περίπου 2600km. Οπότε ανάλογα το μέγεθος του ο πυρήνας του Άρη μπορεί να έχει ακτίνα 1500-2100 km με πυκνότητα από 3.41 έως 3.52 g/cm³.

3. Δεδομένα

3.1 Δεδομένα Γης

Η ατμόσφαιρα της γης είναι ευρέως μελετημένη συγκριτικά με αυτήν του Άρη, όπως και τα όργανα μελέτης είναι καλύτερα ανεπτυγμένα καθώς και τα δεδομένα που έχουμε. Γι' αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον δορυφόρο METOPA και τον αισθητήρα του IASI (infrared Atmospheric Sounding Interferometer) και ο αλγόριθμος επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Τα δεδομένα προέκυψαν από παρατηρούμενες καταγραφές των ιδιοτήτων των αερολυμάτων με μεταβλητές τις:

- aerosol optical depth
- fine mode aerosol optical depth
- single scattering albedo
- aerosol layer height and
- aerosol extinction coefficient.

Τα δεδομένα αυτά βρίσκονται σε πλεγματική μορφή (gridded data), το πλέγμα προβάλλει γεωγραφικό μήκος και πλάτος με παγκόσμια οριζόντια κάλυψη. Η οριζόντια χωρική ανάλυση για τον συντελεστή εξασθένησης των αερολυμάτων (aerosol extinction coefficient) είναι $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ενώ για όλες τις άλλες μεταβλητές είναι $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Τα δεδομένα αυτά έχουν συλλεχθεί από το 1995 μέχρι σήμερα με 5 μήνες καθυστέρηση και βρίσκονται σε μορφή αρχείου NetCDF.

Οι κύριες μεταβλητές των δεδομένων είναι

1) Ο συντελεστής εξασθένησης αερολυμάτων (**Aerosol extinction coefficient, AEX**) που είναι το κλάσμα της ροής ακτινοβολίας που απορροφάται και σκεδάζεται από τα αερολύματα που βρίσκονται μέσα σε έναν όγκο ατμόσφαιρας, ανά μονάδα μήκους. Μονάδα μέτρησης km^{-1}

2) Το ύψος στρωμάτωσης αερολυμάτων (**aerosol layer height, ALH**) είναι το υψόμετρο που παρατηρείται η μέγιστη εξάλειψη αερολυμάτων. Μονάδα μέτρησης km

3) Το οπτικό βάθος αερολυμάτων (**aerosol optical depth, AOD**) είναι μια μονάδα μέτρησης του βαθμού με τον οποίο μειώνεται η μετάδοση του φωτός μέσω ενός όγκου ατμόσφαιρας, λόγω της εξάλειψης των αερολυμάτων. Ο συνήθης παγκόσμιος μέσος όρος

του οπτικού βάθους αερολυμάτων είναι περίπου 0.15, σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει 3.

4) Το οπτικό βάθος αερολυμάτων σκόνης (**dust aerosol optical depth**) είναι ένα τμήμα του συνολικού οπτικού βάθους αερολυμάτων που προκύπτει από την παρουσία σωματιδίων ορυκτής σκόνης.

5) Το οπτικό βάθος λεπτόκοκκων αερολυμάτων (**fine mode optical depth**) είναι τμήμα του συνολικού οπτικού βάθους αερολυμάτων που προκύπτει από την παρουσία σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη του ενός μικρομέτρου (τέτοια αερολύματα προκύπτουν από τις αναφλέξεις και πυρκαγιές)

6) Η λευκαύγεια μονής σκέδασης (**single scattering albedo, SSA**) παρέχει ένα κλάσμα της ολικής εξάλειψης αερολυμάτων λόγω της σκέδασης

7) Το ύψος στρώματος σκόνης αερολυμάτων (**dust aerosol layer height**), είναι το συγκεκριμένο ύψος για τα στρώματα αερολυμάτων ανάλογα των ειδών της σκόνης αερολυμάτων. Μονάδα μέτρησης Km

Τα δεδομένα αυτά απεικονίστηκαν στο λογισμικό Panoply.

3.2 Δεδομένα Άρη

Η ατμόσφαιρα του Άρη είναι ένα πλήρες και περίπλοκο σύστημα που κυβερνάται από συγκεκριμένες φυσικές, δυναμικές και χημικές διεργασίες οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν και να κατανοηθούν. Οι ημερήσιοι και εποχικοί κύκλοι σε συνδυασμό με την ακραία και ποικιλόμορφη τοπογραφία του, κάνουν το κλίμα του Άρη μεταβλητό στον χώρο και στον χρόνο. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων.

Η βάση δεδομένων αυτή ονομάζεται “Mars Climate Database” ή “MCD” η οποία δημιουργήθηκε στο εργαστήριο δυναμικής μετεωρολογίας CNRS στο Παρίσι, σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο της Οξφόρδης και το ινστιτούτο αστροφυσικής της Ανδαλουσίας, με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας και το Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών (CNES) της Γαλλίας.

Σκοπός της βάσης αυτής είναι να προσφέρει σε επιστήμονες, μηχανικούς και σε ενθουσιώδεις της επιστήμης μια ρεαλιστική και αξιόπιστη μοντελοποίηση του Αρειανού κλιματολογικού συστήματος. Και πετυχαίνει αυτόν τον στόχο με τη συλλογή

μετεωρολογικών δεδομένων, τα οποία προέρχονται από αριθμητικές προσομοιώσεις του γενικού μοντέλου κυκλοφορίας (GCM) της ατμόσφαιρας του Άρη και επικυρώνονται από τα διαθέσιμα παρατηρησιακά δεδομένα παρατήρησης.

Η βάση δεδομένων περιέχει διάφορες στατιστικά των δεδομένων των προσομοιώσεων σε ένα $5.625^{\circ} \times 3.75^{\circ}$ πλέγμα γεωγραφικού μήκους από την επιφάνεια μέχρι ένα κατ' εκτίμηση υψόμετρο 300 χλμ, όπως θερμοκρασία, άνεμος, πυκνότητα, πίεση, ακτινοβολία, ατμοσφαιρική σύσταση και συγκέντρωση αερίων και άλλα.

Από τα πεδία αυτά βγαίνει μέσος όρος και αποθηκεύονται δώδεκα φορές τη μέρα για δώδεκα Αρειανούς μήνες για να μπορούν να δώσουν μια ενδελεχή απεικόνιση των ετήσιων και ημερήσιων κύκλων. Κάθε μήνας καλύπτει 30° σε Ls και συνήθως διαρκεί 50-70 μέρες. Άρα η βάση δεδομένων σε κάθε "σημείο" του πλέγματος περιέχει 12 συνηθισμένες μέρες, μια για κάθε μήνα. Επίσης, πληροφορίες για την μεταβλητότητα των δεδομένων σε μηνιαία και ημερήσια βάση αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων, όπου με τη βοήθεια προγραμμάτων η μεταβλητότητα αυτή ανακατασκευάζεται και χρησιμοποιείται για την κατασκευή σεναρίων σκόνης,

Η βάση δεδομένων περιέχει διάφορους συνδυασμούς σεναρίων σκόνης και ηλιακών σεναρίων καθώς αυτά τα δυο είναι πολύ μεταβλητά από έτος σε έτος. Τα ηλιακά σενάρια περιγράφουν τις μεταβολές της ακραίας υπεριώδους ακτινοβολίας (extreme UV - EUV), που είναι ηλιακή ακτινοβολία μήκους κύματος στα 10-120 nm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι ηλιακές συνθήκες που επικρατούν στα σενάρια αυτά, περιγράφουν τις εναλλαγές στις ακραίες τιμές EUV ακτινοβολίας οι οποίες ελέγχουν τη θέρμανση της ατμόσφαιρας για υψόμετρα μεγαλύτερα από 120km. Τα σενάρια μπορεί να είναι σταθερά όπου τα ηλιακά μέγιστα, ελάχιστα και ο μέσος όρος παρέχονται, αλλά μπορεί να είναι και μεταβαλλόμενα όπου οι παρατηρούμενες τιμές μεταβάλλονται από μέρα σε μέρα. Το κύριο στοιχείο που ελέγχει την μεταβλητότητα της Αρειανής ατμόσφαιρας είναι το ποσό και η κατανομή της αιωρούμενης σκόνης. Εξαιτίας αυτής της μεταβλητότητας τα δεδομένα της κατανομής σκόνης και οι οπτικές ιδιότητες είναι ανακριβή και γι' αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκαν 5 μοντέλα σκόνης τα οποία είναι.

1. Το κλιματολογικό σενάριο (**clim scenario**), το οποίο είναι μια προσομοίωση που χρησιμοποιεί το πιο σύγχρονο μοντέλο του LMD Global Climate Model (GCM), η οποία παίρνοντας ανακατασκευασμένα δεδομένα της κατανομής σκόνης για τα Αρειανά χρόνια 24 με 31 μας δείχνει μια αναπαράσταση ενός "κανονικού" Αρειανού χρόνου δηλαδή χωρίς καμία παγκόσμια καταιγίδα σκόνης που να καλύπτει τον

πλανήτη. Το σενάριο αυτό περιέχει 3 συνθήκες EUV ακτινοβολίας, μια με ηλιακό ελάχιστο, μέσο όρο και μέγιστο.

2. Το ψυχρό σενάριο (**cold scenario**), αντιπροσωπεύει μια εντελώς καθαρή ατμόσφαιρα όπου η αδιαφάνεια της σκόνης είναι σε οποιαδήποτε τοποθεσία ορισμένη ως η ελάχιστη παρατηρούμενη στον πλανήτη από τα αρειανά χρόνια 24-31, περαιτέρω μειωμένη κατά 50%
3. Το θερμό σενάριο (**warm scenario**), αντιπροσωπεύει μια ατμόσφαιρα με σκόνη, αλλά δεν υποδηλώνει συνθήκες καταιγίδας σκόνης (δηλαδή, η αδιαφάνεια λόγω σκόνης είναι σε οποιοδήποτε τοποθεσία ορισμένη ως η μέγιστη παρατηρούμενη, με εξαίρεση τις συνθήκες καταιγίδας σκόνης, επαυξημένη κατά 50%), στο οποίο έχει συνυπολογιστεί και μία θερμόσφαιρα στο ηλιακό μέγιστο.
4. Το σενάριο καταιγίδας σκόνης, περιγράφει τον Άρη σε μια περίοδο ολοκληρωτικής κάλυψης του από μια καταιγίδα σκόνης. Οι οπτικές ιδιότητες της σκόνης έχουν οριστεί να αντιπροσωπεύουν την πιο σκούρα σκόνη από την τυπική. Το σενάριο αυτό διατίθεται όποτε αυτές οι καταιγίδες είναι πιθανό να προκύψουν, συνήθως σχηματίζονται στον Αρειανό φθινόπωρο και χειμώνα ($L_s=180-360$)
5. Τα σενάρια αρειανών χρόνων (MY24, MY25, ..., MY31, MY32) αντιστοιχούν στις καλύτερες προσομοιώσεις αυτών των συγκεκριμένων χρόνων λόγω φορτίου σκόνης, αλλά και ημερήσιας τιμής της ηλιακής EUV.

4. Μεθοδολογία

4.1 Ανάλυση δεδομένων στον Άρη

Τα δεδομένα του Άρη επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν στο πρόγραμμα "IDL 8.5" Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί την επιστημονική γλώσσα προγραμματισμού IDL (Interactive Data Language) για να δημιουργήσει οπτικοποιήσεις περίπλοκων αριθμητικών δεδομένων. Το εύρος των αρχείων που διαβάζει το λογισμικό είναι από τα βασικά αρχεία όπως TIFF, JPEG, PNG μέχρι τα επιστημονικά HDF, HDF-EOS, CDF και netCDF.

Τα αρχεία που λάβαμε από το MCD τύπου ".nc" ήταν προσαρμοσμένα στην ημερήσια κλιματολογία της σκόνης του Άρη. Η εργασία αυτή όμως μελετά την ετήσια κλιματολογία της σκόνης του Άρη και γι' αυτό το λόγο τα αρχεία χρειάστηκαν τροποποίηση. Η τροποποίηση έγινε μέσω του προγράμματος IDL 8,5 και από τις αρχικές διαστάσεις 72×36

τροποποιήθηκαν σε διαστάσεις 120×60. Η τροποποίηση αυτή ονομάζεται “regrid” και τα αρχεία “regridded”

4.2 Ανάλυση δεδομένων στη Γη

Τα δεδομένα της Γης απεικονίστηκαν με το πρόγραμμα Panoply, με το οποίο μπορούμε:

- Να σχεδιάσουμε γεω-αναφερόμενους πίνακες γεωγραφικού πλάτους-μήκους, μήκους-κατακορύφου, πλάτους-κατακορύφου, χρόνου-μήκους, χρόνου-πλάτους από διανύσματα προερχόμενα από μεγαλύτερες πολυδιάστατες μεταβλητές.
- Να σχεδιάσουμε βασικούς δισδιάστατους πίνακες από μεγαλύτερες πολυδιάστατες μεταβλητές.
- Να “κόψουμε” μονοδιάστατους πίνακες από μεγαλύτερες πολυδιάστατες μεταβλητές και να δημιουργήσουμε διαγράμματα .
- Να συνδυάσουμε δυο γεω-αναφερόμενους πίνακες σε ένα πεδίο? Διαφοροποιώντας, αθροίζοντας ή υπολογίζοντας τον μέσο όρο.
- Να σχεδιάσουμε δεδομένα γεωγραφικού μήκους γεωγραφικού πλάτους σε έναν παγκόσμιο ή τοπικό χάρτη χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε από 100 προσομοιώσεις χαρτών.
- Να επικαλύψουμε περίγραμμα ηπείρων πάνω σε πεδία χαρτών γεωγραφικού μήκους και πλάτους.
- Να χρησιμοποιήσουμε οποιοδήποτε από τους πίνακες χρωμάτων για τις κλίμακες και άλλες γραφικές αναπαραστάσεις.
- Να εξάγουμε πεδία χαρτών γεωγραφικού μήκους-πλάτους σε μορφή KMZ.
- Να εξάγουμε animations σαν βίντεο MP4 ή ως συλλογή μεμονωμένων εικόνων καρτέ.

5. Αποτελέσματα

5.1 Κλιματολογική ανάλυση της σκόνης στον Άρη

Μέσω του προγράμματος IDL 8.5 κατασκευάστηκαν 4 χάρτες για τη συγκέντρωση των αερολυμάτων σε κάθε εποχή του Άρη από τις αρειανές χρονιές 24 με 32 (MY24-MY32).

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων βρίσκονται πάνω από τα γεωγραφικά τετράγωνα MC-17, MC-10,11,18,19, MC-4 και MC-20-21. Η αναλυτική περιγραφή των MC(map charts) αναφέρεται ανωτέρω στο κεφάλαιο 2, σελ. 21-23.

Τα συγκεκριμένα γεωγραφικά τετράγωνα περιγράφονται παρακάτω :

Το MC-17 “Phoenicis Lacus” τετράπλευρο που βρίσκεται στην καρδιά της περιοχής “Tharsis” περιλαμβάνει υψηλά όρη όπως το όρος Arsia με υψόμετρο που φτάνει τα 11km. Όμως, εκτός από τις ανυψώσεις αυτές υπάρχουν οροπέδια χαμηλότερων υψομέτρων που καλύπτονται από μικρότερα ασπιδοφόρα ηφαίστεια. Επίσης, τα δυτικά και βόρεια όρια του Syria Planum περικλείονται από το Noctis Labyrinthus όπου πολλαπλά σύγκλινα και φαράγγια σχηματίζουν έναν σχηματισμό σαν λαβύρινθο. Γεωλογικά οι δομές ηφαιστειακές και τεκτονικές είναι διαφόρων μεγεθών και σχημάτων μακροχρόνιας μαγματικής προέλευσης. Το τετράπλευρο αυτό στο έδαφος έχει από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σκόνης.

Το MC-11 “Oxia Palus” τετράπλευρο κυριαρχείται στα ανατολικά από την ήμι-ανύψωση Arabia Terra και αρχαίο ανάγλυφο γεμάτο κρατήρες. Ενώ το δυτικό ήμισυ του τετράπλευρου περιέχει κομμάτια του Margaritifer Terra και τα ορεινά πεδιά “Xanthe Terra” τα οποία τέμνονται από γιγαντιαία κανάλια εκροής. Αυτά έχουν δημιουργηθεί από καταστροφικές πλημμύρες όπου σχημάτισαν κανάλια αυλακώσεων (grooved channels), streamlined islands και chaotic terrain. Στο δυτικό κομμάτι του Oxia Palus τετράπλευρου υπάρχουν απομονωμένα οροπέδια από ορεινά cratered υλικά και εξομαλυμένων, streamlined, σταγονοειδούς μορφής αναχωμάτων, τα οποία σχηματίζουν ένα αρχιπέλαγος στη μέση των καναλιών εκροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά ερμηνεύονται ως αποτελέσματα μέγα-πλημμυρών. Οπότε η γεωλογική ιστορία της περιοχής είναι έντονα συνδεδεμένη με τη διαδικασία της υδάτινης διάβρωσης, όπως φαίνεται με το τι υπάρχει σήμερα στο τετράπλευρο MC-11. Οι χαοτικές δομές, τα κανάλια αυλακώσεων και τα σταγονοειδούς μορφής αναχώματα εκτός από το ότι φανερώνουν τη γεωλογική ιστορία της περιοχής και

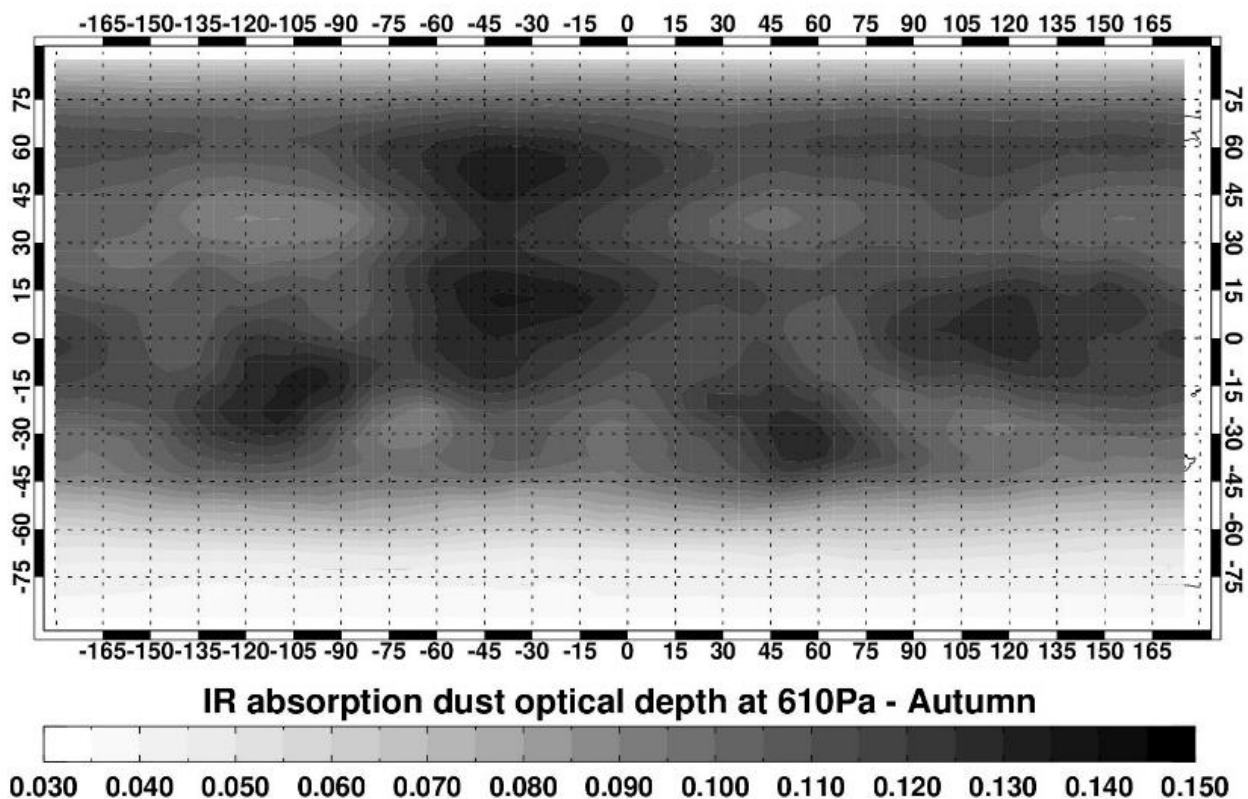
την έντονη διάβρωση που υπέστη, δείχνουν μια περιοχή με έντονη εναπόθεση σκόνης σε αυτή.

Το MC-4 “Mare Acidalium” τετράπλευρο περιέχει κυρίως τη βόρεια βυθιζόμενη πεδιάδα χαμηλού υψομέτρου της Acidalia Planitia και τον συνορεύοντα νότιο γείτονα της, το Chryse Planitia. Αυτές οι πεδιάδες οροθετούνται από κρατηροειδή υψίπεδα, 3000μ πάνω από αυτές. Στα νοτιοανατολικά τους βρίσκεται το Arabia Terra και στα νοτιοδυτικά το Tempe Terra. Σε αυτό το τετράπλευρο τα κανάλια εκροής επικαλύπτονται από υλικά χαμηλών πεδιάδων που θεωρείται ότι είναι ιζήματα που αποτέθηκαν μέσα σε ένα Late Hesperian ωκεανό. Τα κανάλια εκροής αυτά είναι τα μεγαλύτερα ποτάμιου τύπου κανάλια στον Άρη, αναπαριστώντας την εμφανή ροή χιλιάδων κυβικών χιλιομέτρων ύδατος σε όλο τον πλανήτη. Τέτοιου είδους ποσότητες ύδατος στην Γη θα δημιουργούσαν κοιλάδες και δέλτα, ενώ στον Άρη λόγω των τοπογραφικών μορφών, όπως είναι οι κρατήρες πρόσκρουσης, που λειτουργούν σαν εμπόδια, εξαναγκάζουν το νερό να διαβρώσει τις δομές αυτές σε σταγονοειδείς μορφές. Οπότε όπως και το MC-11 το MC-4 είναι μια περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση από υδάτινα μέσα και πια χαρακτηρίζεται από τεράστιες ποσότητες διαβρωμένων υλικών.

Από τους 4 προαναφερθέντες χάρτες φάνηκε ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων βρίσκονται πάνω από τα γεωγραφικά τετράγωνα MC-8, MC-9 και MC-13

Το φθινόπωρο στον Άρη οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων βρίσκονται πάνω από το όρος Όλυμπος που εκτείνεται μεταξύ του MC-8 και MC-9 (MC=map chart). Το MC-8 “amazonis” περιλαμβάνει το βόρειο-κεντρικό κομμάτι του χάρτη του Άρη. Από το ανατολικό κομμάτι του MC-8 ξεκινάει η απότομη ανύψωση από την επίπεδη πεδιάδα με εκροές λάβας στην κορυφή του ηφαιστείου, Olympus Mons. Το όρος αυτό είναι το ψηλότερο γνωστό βουνό στο ηλιακό σύστημα με ύψος 26.000 m και διάμετρο 1914.77 km. Το MC-9 “Tharsis” αποτελείται κυρίως από υψηλά επίπεδα διακοπτόμενα από τεράστια από ασπιδοφόρα ηφαιστεια. Βορειοδυτικά των ηφαιστειών αυτών υπάρχουν αποθέσεις σχήματος “βεντάλιας” ασυνήθιστης μορφής και προέλευσης. Οι κατολισθήσεις, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η διάβρωση έχουν προταθεί ως διαδικασίες προέλευσης για τις αποθέσεις αυτές, όμως τα χαρακτηριστικά τους ταιριάζουν στο να δημιουργήθηκαν από παγετώδεις διαδικασίες. Ράχες παράλληλες στα περιθώρια των αποθέσεων είναι αρκετά χιλιόμετρα πλατιά και σχεδόν 100m ψηλά, θυμίζοντας “terminal deposits of cold base glaciers” στην Γη, όπου ο πάγος μετατρέπεται από στερεά σε αέρια μορφή και αφήνει θραύσματα πετρωμάτων. Έτσι, θα μπορούσε να εξηγηθεί το πομολώδες ανάγλυφο

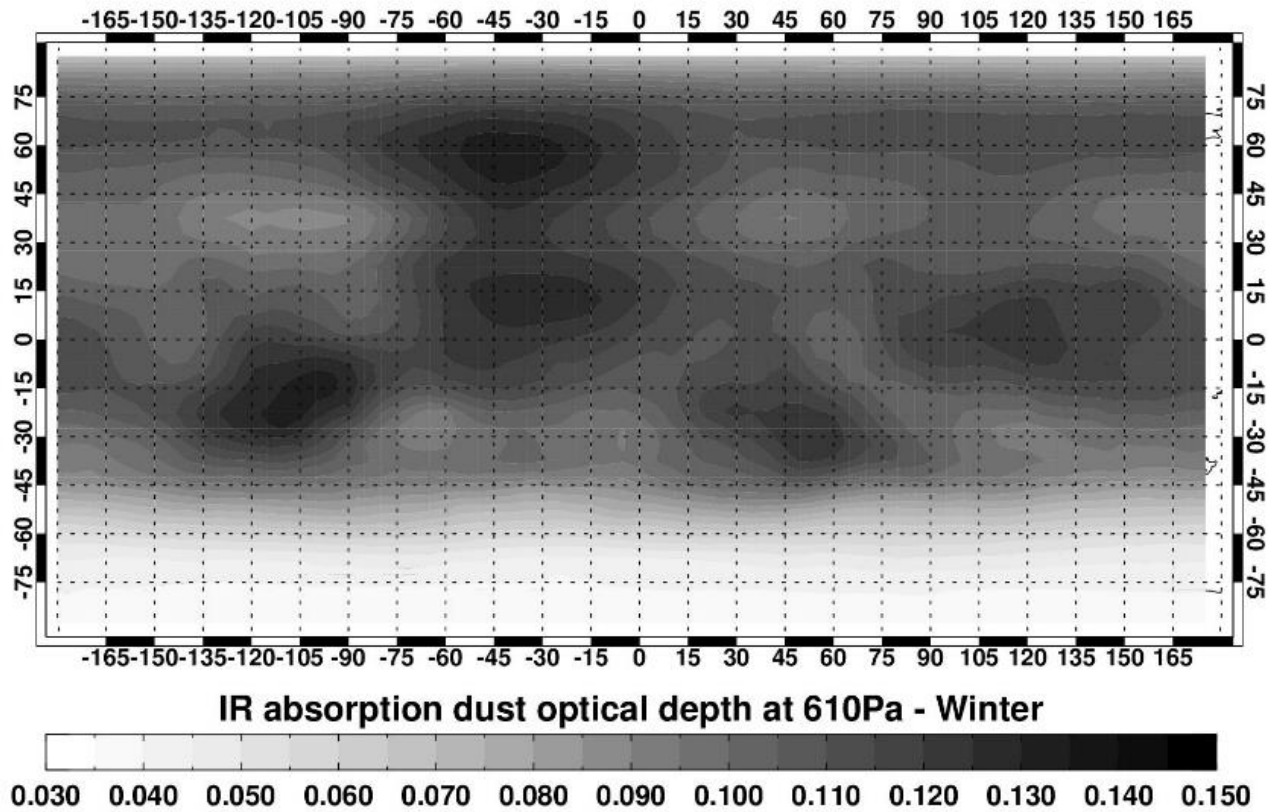
(knobby terrain) σαν τα υπολείμματα ενός εξαχνωμένου παγωκαλύματος. Μοντέλα του κλίματος του Άρη προτείνουν ότι η συγκέντρωση πάγου από ψύξη νερού μπορεί να προωθηθεί σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη κατά τις περιόδους μεγάλης κλίσης του άξονα τροχιάς του (Head et al., 2003; Fastook et al., 2008). Με βάση αυτή την υπόθεση τα επικρατούντα μοτίβα των ανέμων προκάλεσαν τη συγκέντρωση πάγου στα βορειοδυτικά των ηφαιστειών. Βάσει των αναφερόμενων διεργασιών που έλαβαν και λαμβάνουν μέρος στην περιοχή MC-9 “Tharsis” μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι μια περιοχή έντονα διαβρωμένη.



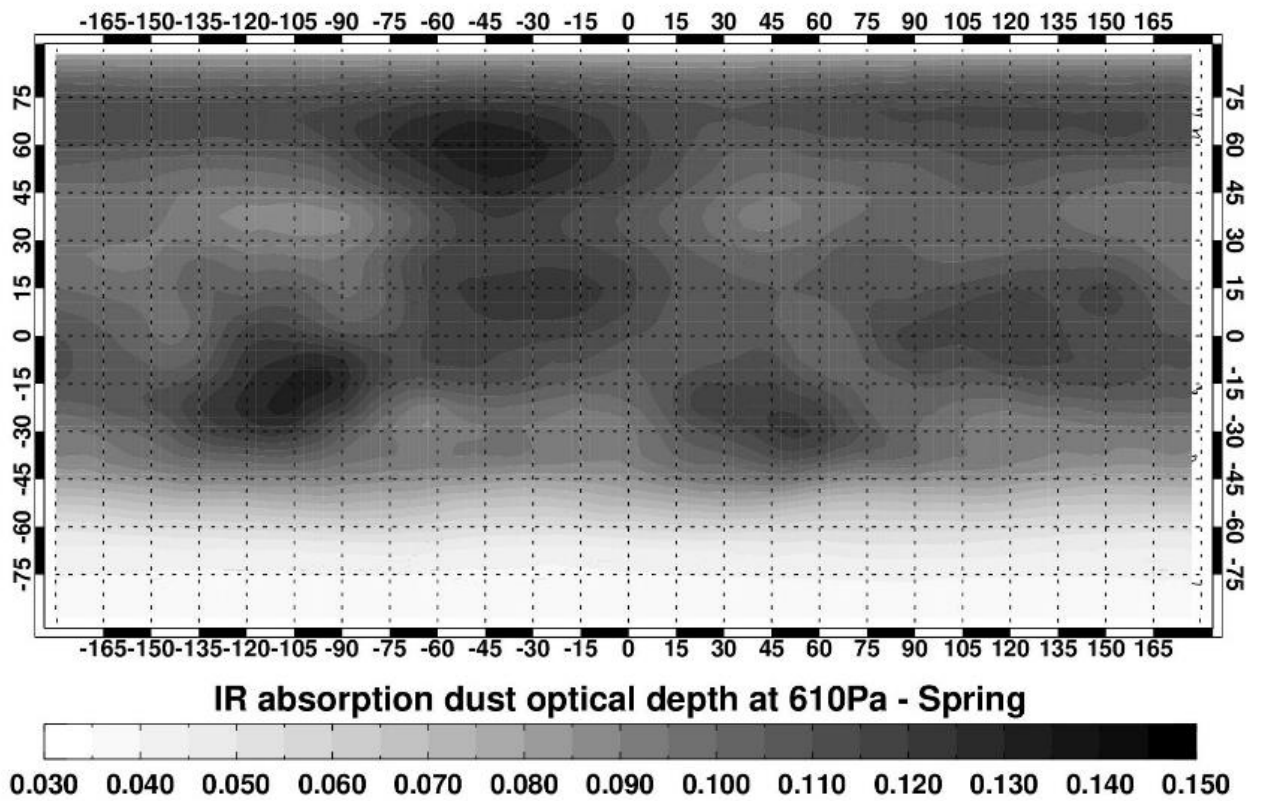
Χάρτης 5.1 Χωρική κατανομή της συγκέντρωσης των αερολυμάτων στον Άρη κατά το Φθινόπωρο για τα χρόνια MY24-MY32

Το MC-13 “Syrtris Major” τετράπλευρο χαρακτηρίζεται από ηφαιστειακές περιοχές (province), που ορίζονται από το Syrtis Major Planum, ένας μεγάλος αλλά με ήπια κλίση θόλος που βρίσκεται σε 2100μ υψόμετρο. Κεντρικά στο Syrtis Major Planum υπάρχουν 2 σύγκλινα, ονόματι Nili και Meore Paterae. Η τωρινή γεωμορφολογία του τετραπλεύρου αυτού οφείλεται σε μετεωρίτες που συγκρούστηκαν με τον Άρη, αποδείξεις αυτών των συγκρούσεων είναι οι τεράστιες λεκάνες σύγκρουσης που βλέπουμε σήμερα, τα ηφαίστεια που δημιουργήθηκαν από το μάγμα που απελευθερώθηκε και τα τεράστια συστήματα ρηγμάτων. Αυτή είναι οι εικόνα που μας δίνει το Syrtis Major τετράπλευρο.

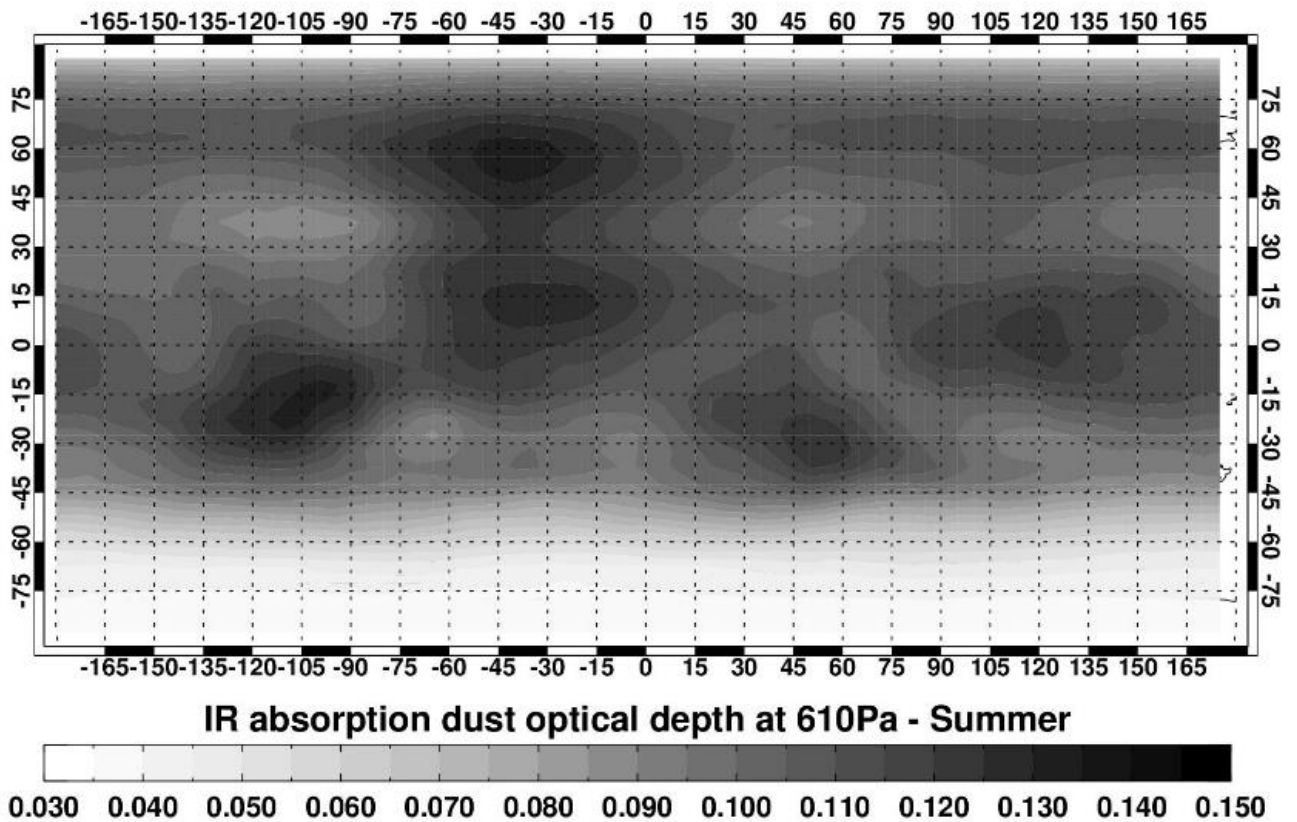
Κατανοώντας τη γεωλογία και τη γεωγραφία των περιοχών πάνω από τις οποίες βρίσκονται τα αερολύματα μπορούμε να κατανοήσουμε τα μοτίβα των ανέμων και τις τροχιές που ακολουθούν σε κάθε εποχή.



Χάρτης 5.2 Χάρτης του Άρη για την συγκέντρωση αερολυμάτων κατά τον χειμώνα για τα χρόνια ΜΥ24-ΜΥ32



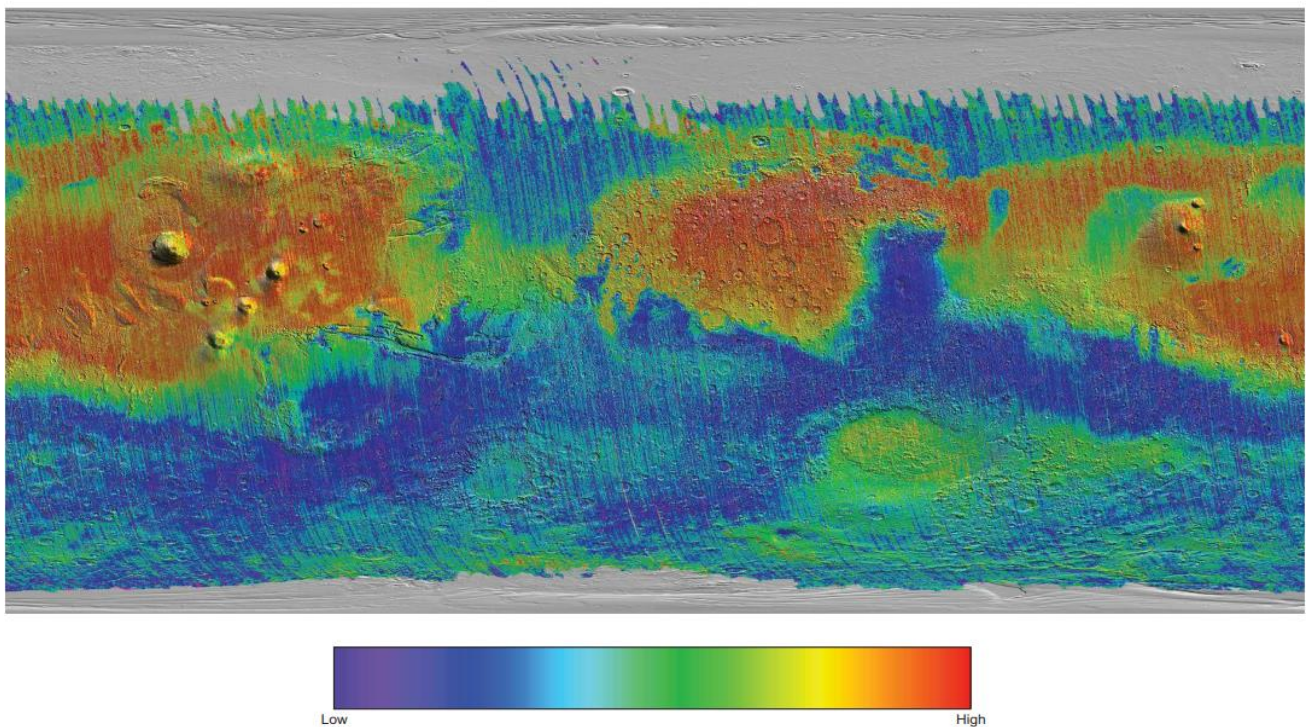
Χάρτης 5.3 Χάρτης του Άρη για την συγκέντρωση αερολυμάτων κατά την Άνοιξη για τα χρόνια ΜΥ24-ΜΥ32.



Χάρτης 5.4 Χάρτης του Άρη για την συγκέντρωση αερολυμάτων κατά το καλοκαίρι για τα χρόνια ΜΥ24-ΜΥ32

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να πάρουμε υπόψη μας είναι η κατανομή της σκόνης που βρίσκεται στο έδαφος του Άρη και πως αυτό επηρεάζει τα δεδομένα μας. Η κατανομή της σκόνης στον Άρη αναδεικνύεται από την εικόνα 5.6

Dust cover

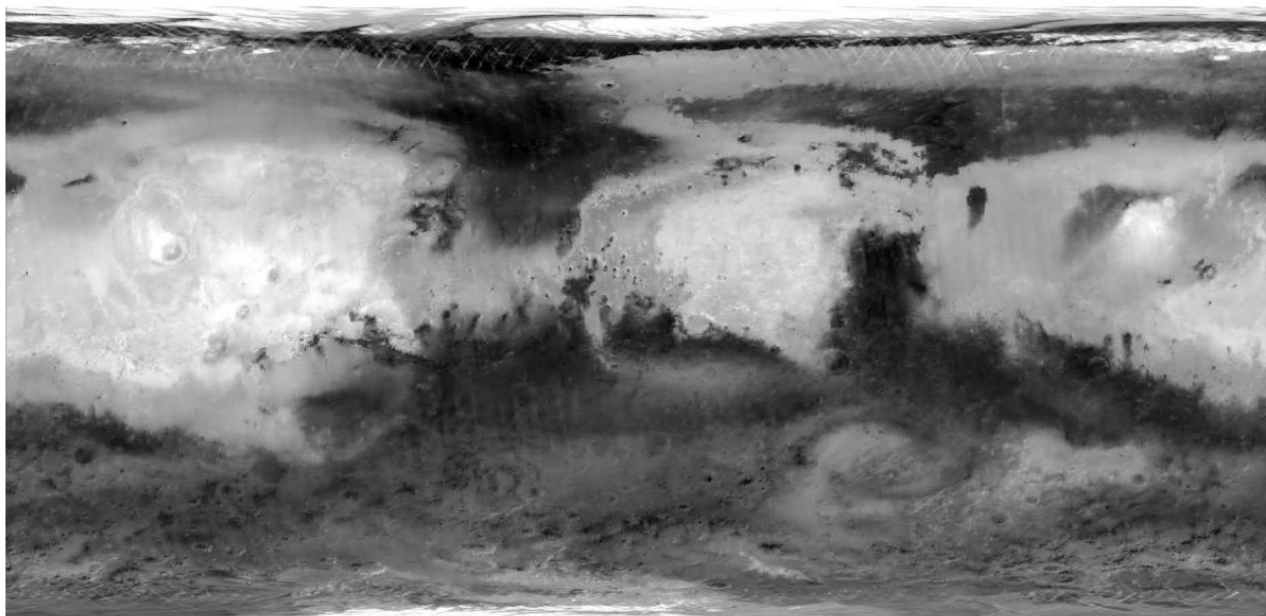


Εικόνα 5.5 Γεωγραφική κατανομή της σκόνης στον Άρη (όπου ερμηνεύεται σαν πυριτικά σωματίδια λεπτότερα από 100 μm) που αναπαρίσταται από θερμική υπέρυθη φασματική συμπεριφορά (Ruff and Christensen, 2002; Bandfield, 2002; Christensen et al., 2003).

Παρατηρούμε ότι συγκριτικά με τους χάρτες των συγκεντρώσεων των αερολυμάτων όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση σκόνης στο έδαφος του Άρη, η συγκέντρωση αερολυμάτων πάνω από αυτή την περιοχή είναι χαμηλή. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις σκόνης ισοδυναμούν με μεγαλύτερη λευκαύγεια της περιοχής (εικόνα 5.7), έτσι ανακλάται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα το έδαφος να μην θερμαίνεται όσο οι άλλες περιοχές και να μην δημιουργούνται άνεμοι που είναι απαραίτητοι για τη δημιουργία των αερολυμάτων. Όμως αυτή η θεώρηση δεν είναι

απόλυτη καθώς η λευκαύγεια στον Άρη χαρακτηρίζεται από εποχική μεταβλητότητα πιθανόν λόγω των τοπικών ανέμων που δρουν σε κάθε περιοχή.

Albedo



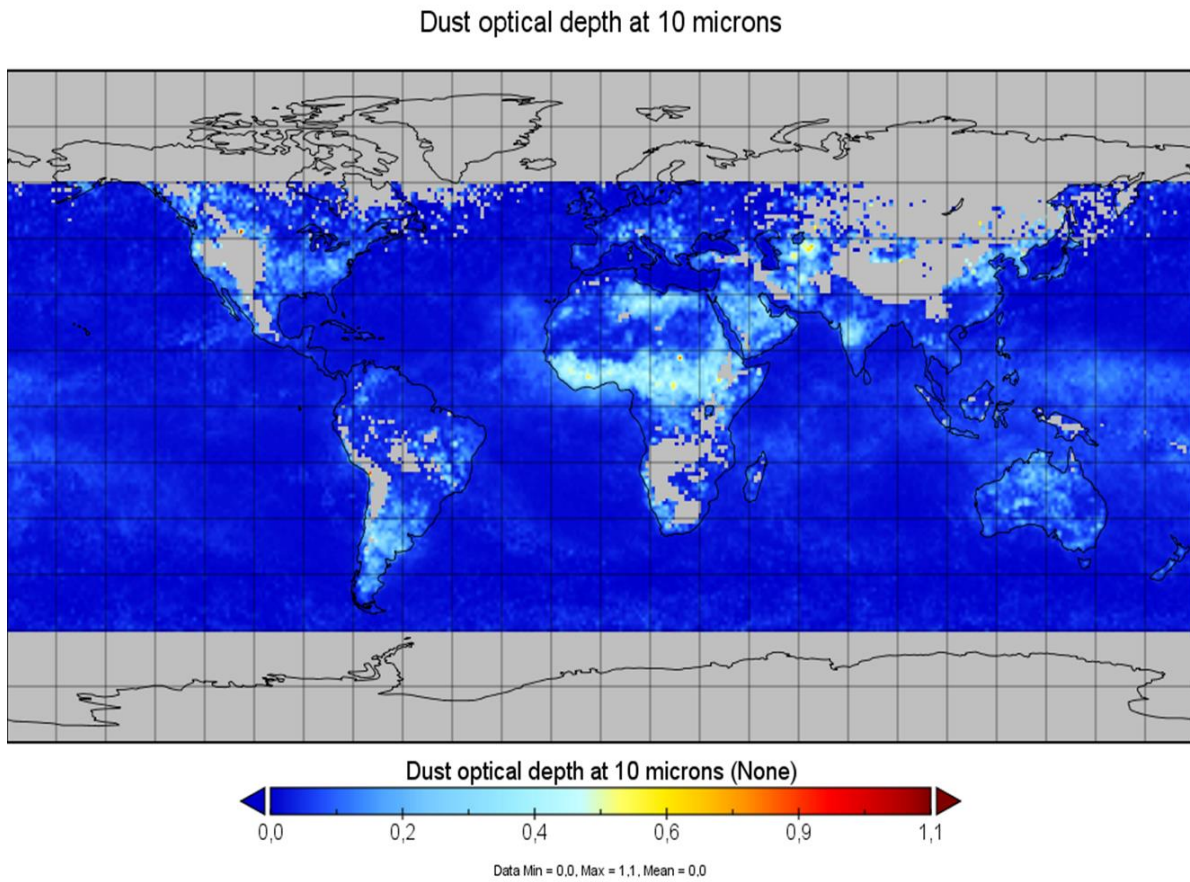
Εικόνα 5.6 Η λευκαύγεια στον Άρη

Η ταχύτητα του ανέμου που απαιτείται για να ανυψωθεί η σκόνη από το έδαφος στον Άρη είναι 20m/s, η μέση ταχύτητα των ανέμων επιφάνειας κυμαίνεται από 4.4-8.8m/s (16-32km/h) αλλά μπορεί να φτάσει μέχρι και 30m/s (100km/h). Στα χαμηλά υψόμετρα κυριαρχεί το κύτταρο Hadley, όπου ο θερμός αέρας ανέρχεται γύρω από τον ισημερινό, ένα κομμάτι αυτού κατευθύνεται βόρεια και ένα κομμάτι του νότια όπου σε 30° γεωγραφικού πλάτους ο αέρας ψύχεται βυθίζεται και ρέει πίσω προς τον ισημερινό. Όμως η ροή του αέρα που επιστρέφει πίσω στον ισημερινό στην επιφάνεια δεν ακολουθεί μια απλή βόρεια ή νότια πορεία λόγω της περιστροφής του πλανήτη. Ο αέρας που κατευθύνεται προς τον ισημερινό και στα δυο ημισφαίρια εκτρέπεται δυτικά. Καταλήγοντας στα όρη Olympus και Tharsis όπου την ημέρα ο αέρας πάνω από τα βουνά είναι θερμότερος από την επιφάνεια με αποτέλεσμα να θερμαίνεται και να ανυψώνεται στην τροπόσφαιρα του Άρη όπου εκεί μένουν και αιωρούνται τα αερολύματα. Έτσι εξηγούνται και οι υψηλές συγκεντρώσεις αερολυμάτων πάνω από το MC-17 τετράπλευρο.

5.2 Κλιματολογική ανάλυση της σκόνης στη Γη

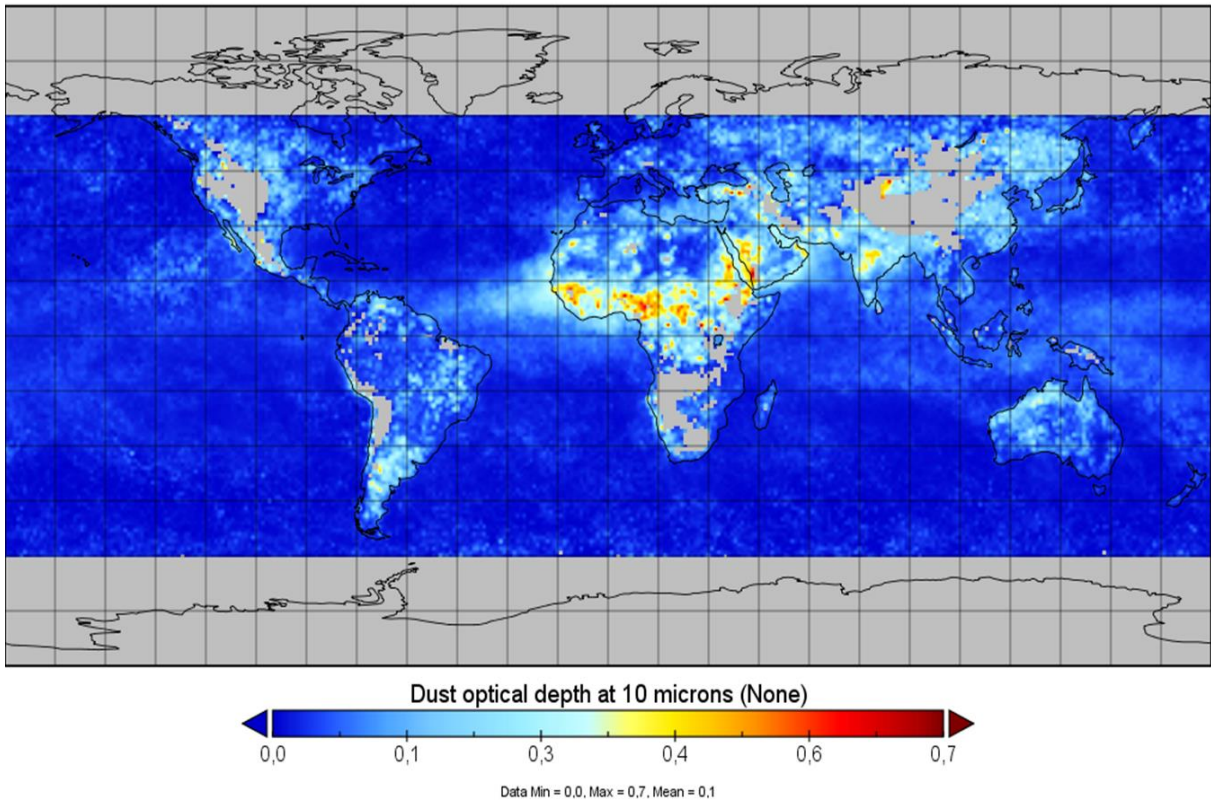
Μέσω του προγράμματος “Panoply” κατασκευάστηκαν χάρτες της Γης για κάθε μήνα από το 2008 μέχρι το 2013 της παγκόσμιας συγκέντρωσης αερολυμάτων και πάρθηκαν οι

χάρτες που περιέχουν 4 χαρακτηριστικούς μήνες από κάθε χρόνο για μια καλύτερη κατανόηση της συγκέντρωσης και μεταφοράς των αερολυμάτων σε παγκόσμια κλίμακα. Οι μήνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Ιανουάριος, Απρίλιος, Ιούλιος και Σεπτέμβριος.



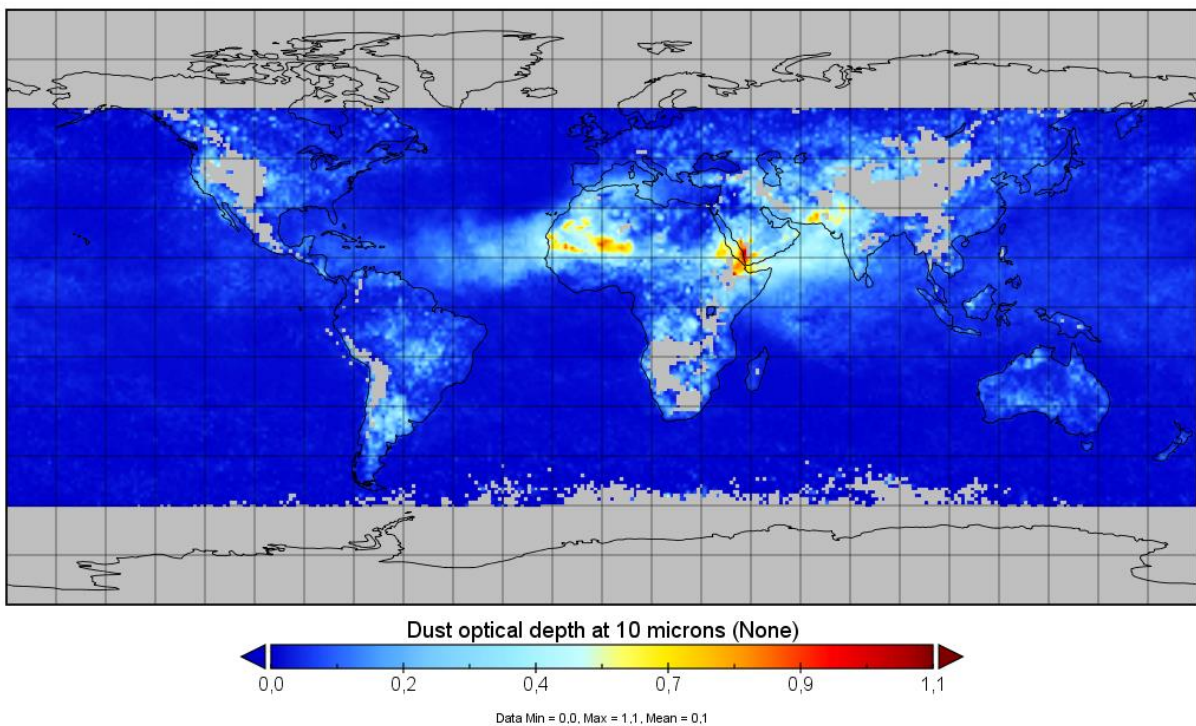
Χάρτης 5.7: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουαρίου 2008 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



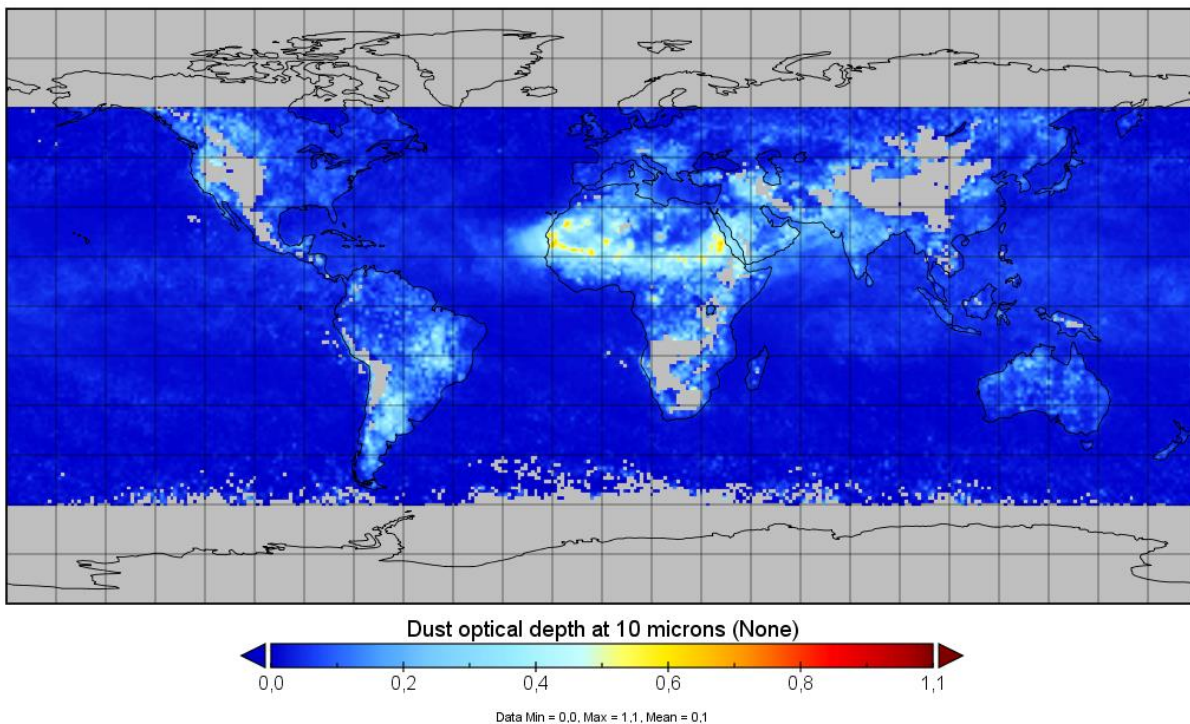
Χάρτης 5.8: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απριλίου 2008 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



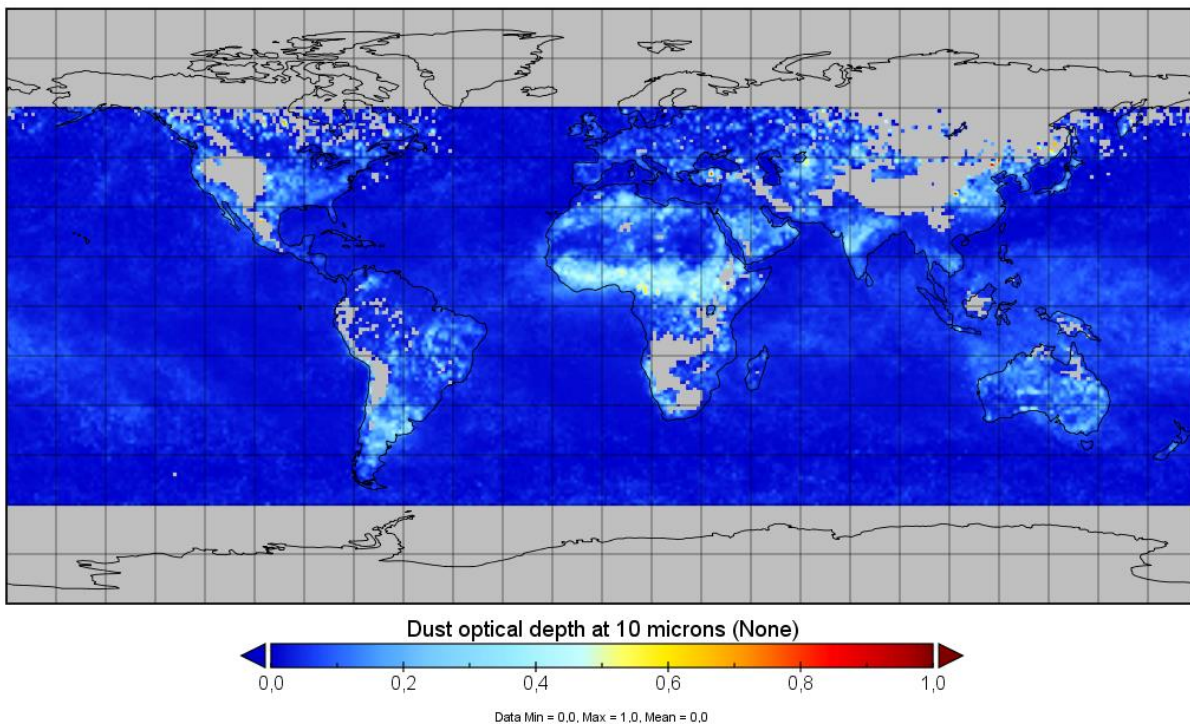
Χάρτης 5.9: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιουλίου 2008 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



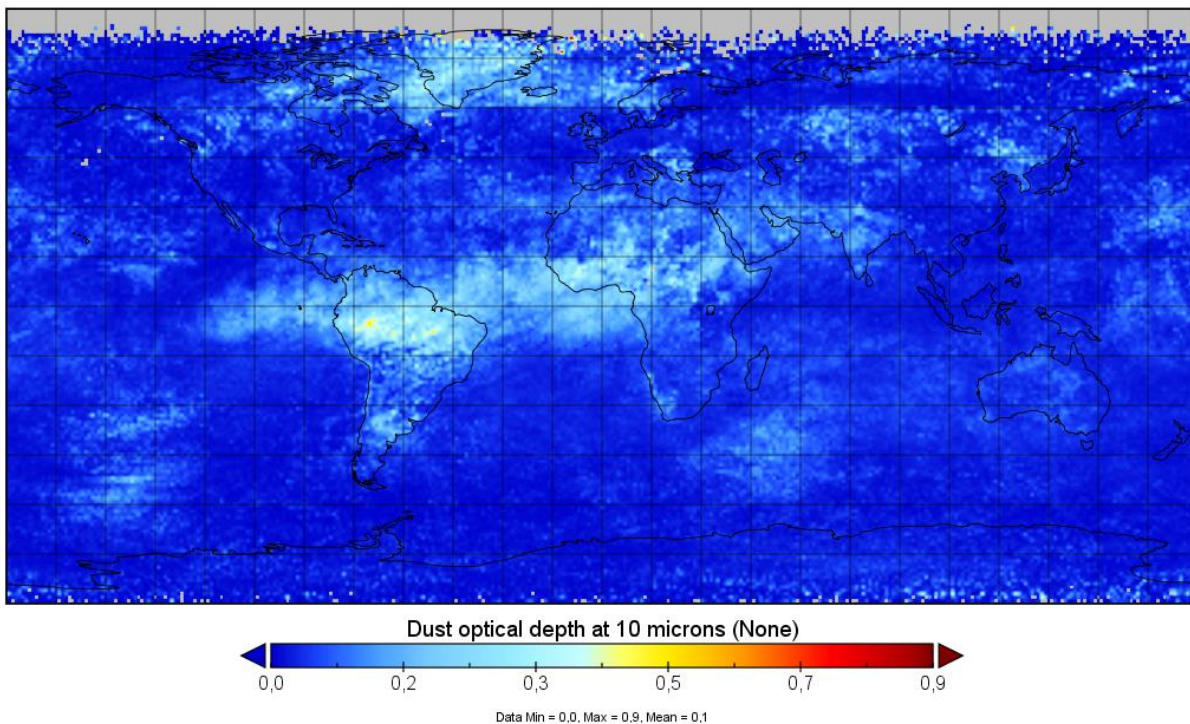
Χάρτης 5.10: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2008 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



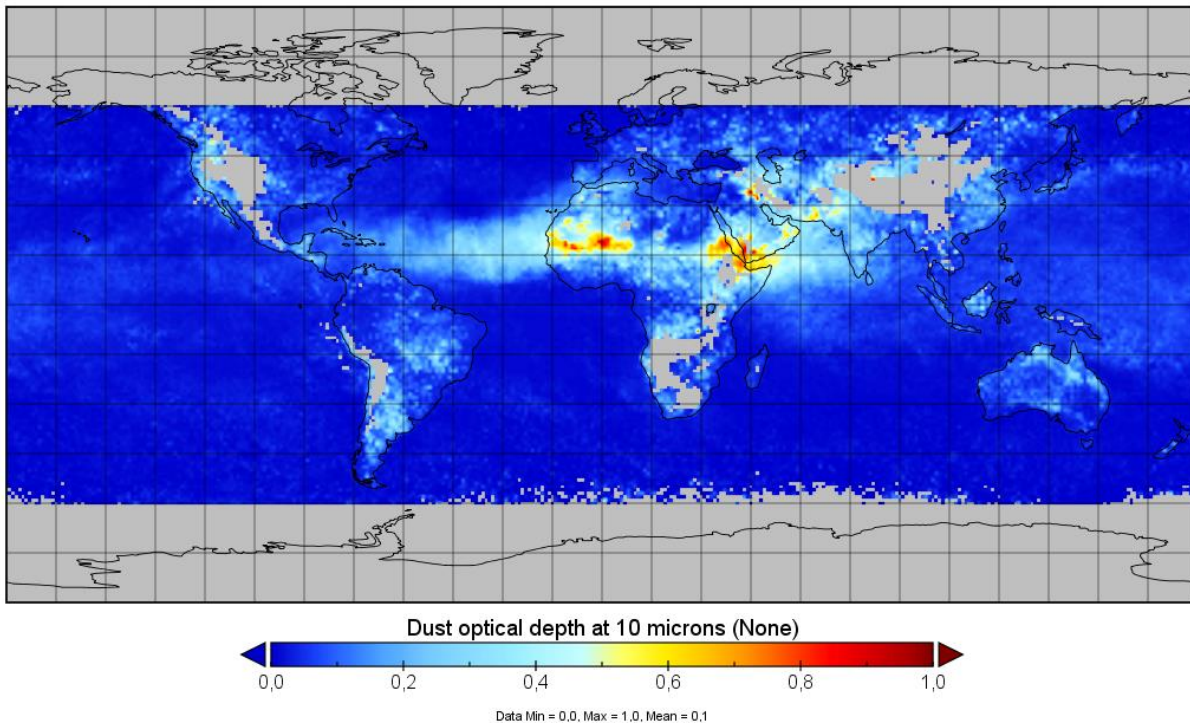
Χάρτης 5.11: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουαρίου 2009 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



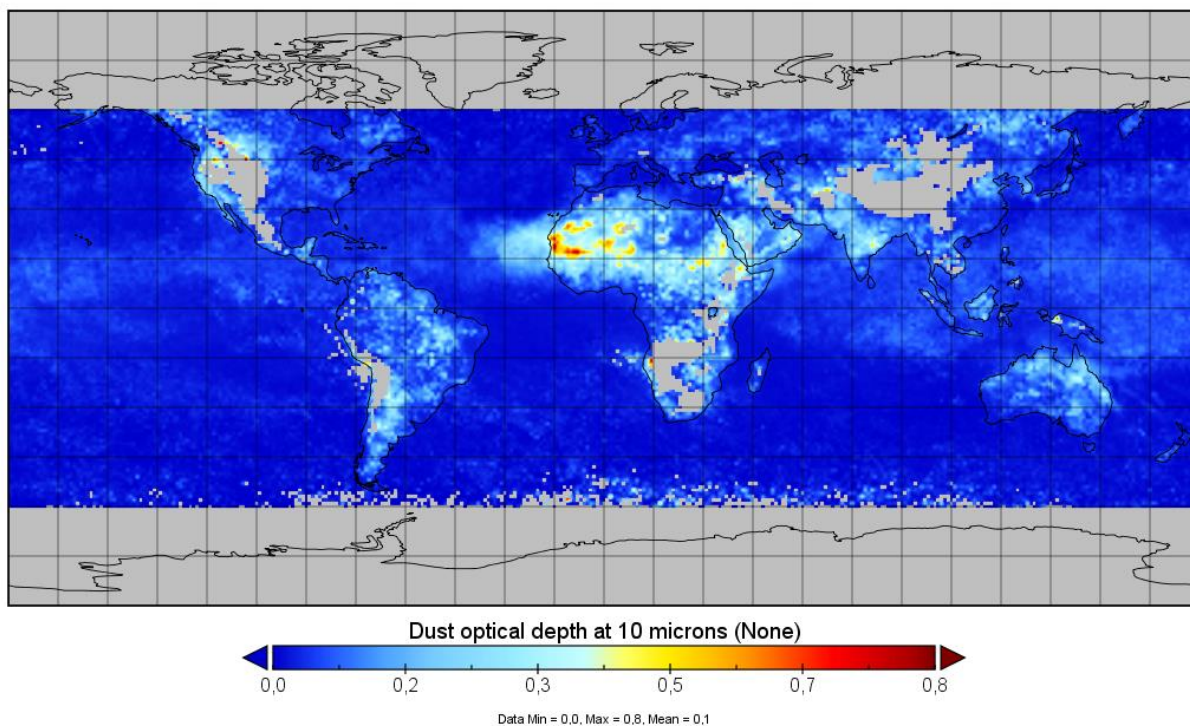
Χάρτης 5.12: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απριλίου 2009 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



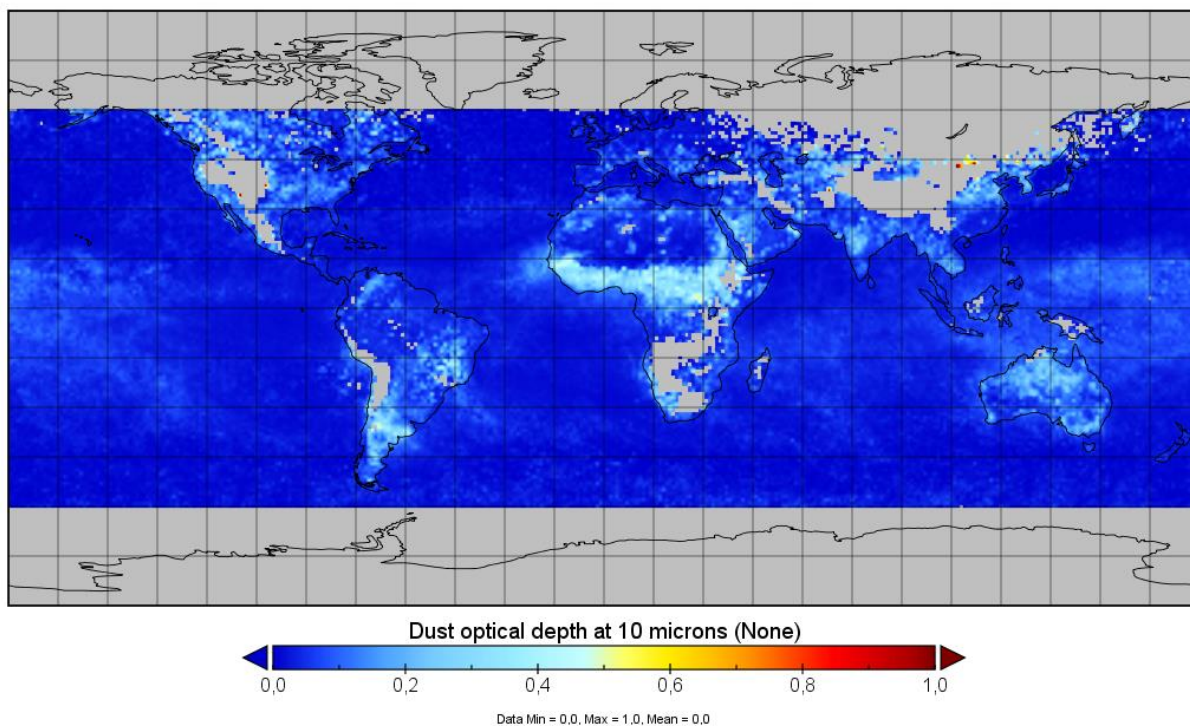
Χάρτης 5.13: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιουλίου 2009 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



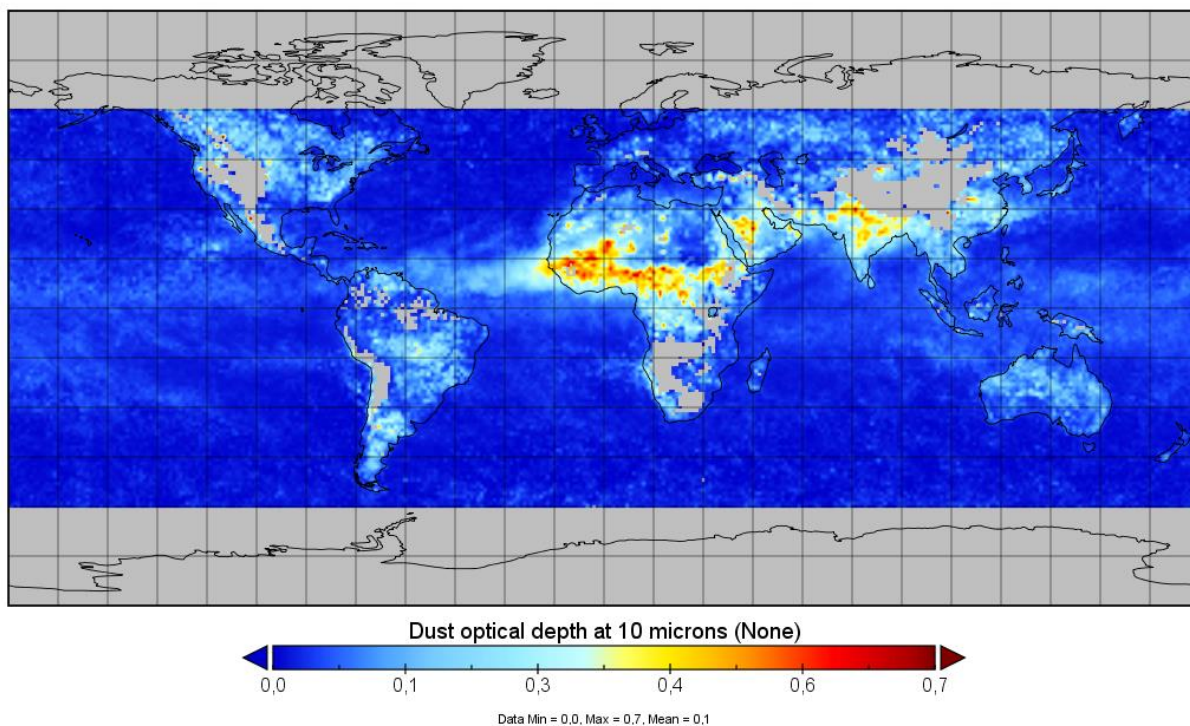
Χάρτης 5.14: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2009 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



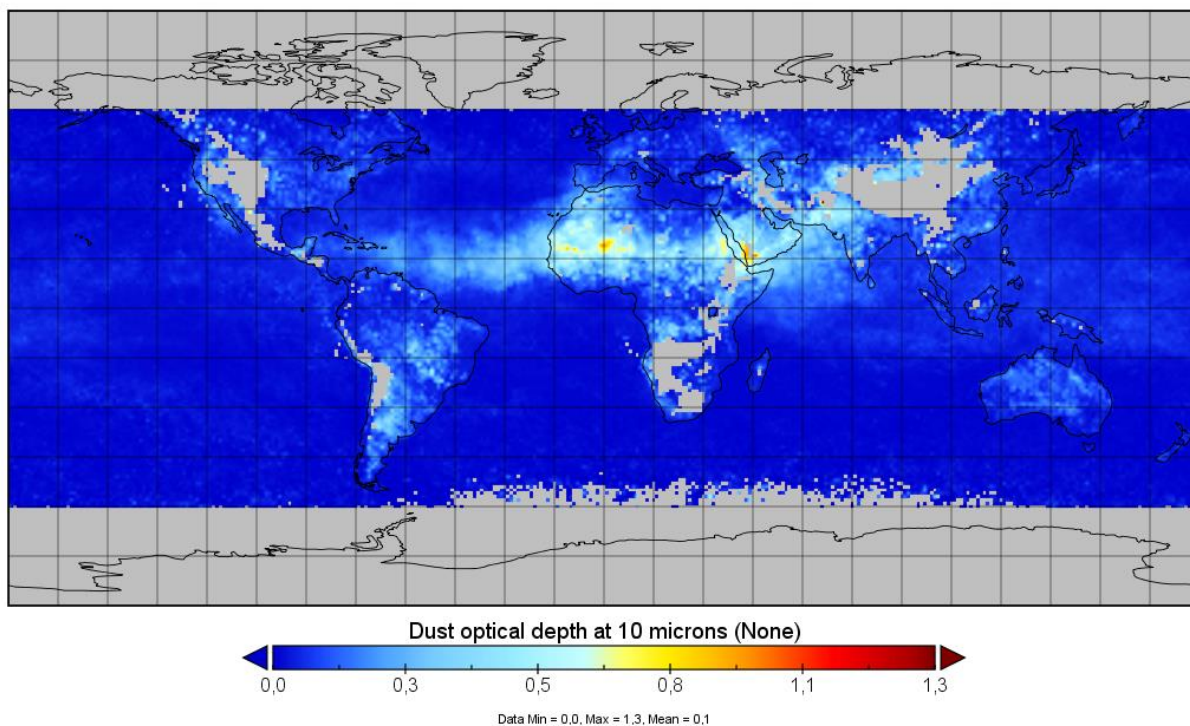
Χάρτης 5.15: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουαρίου 2010 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



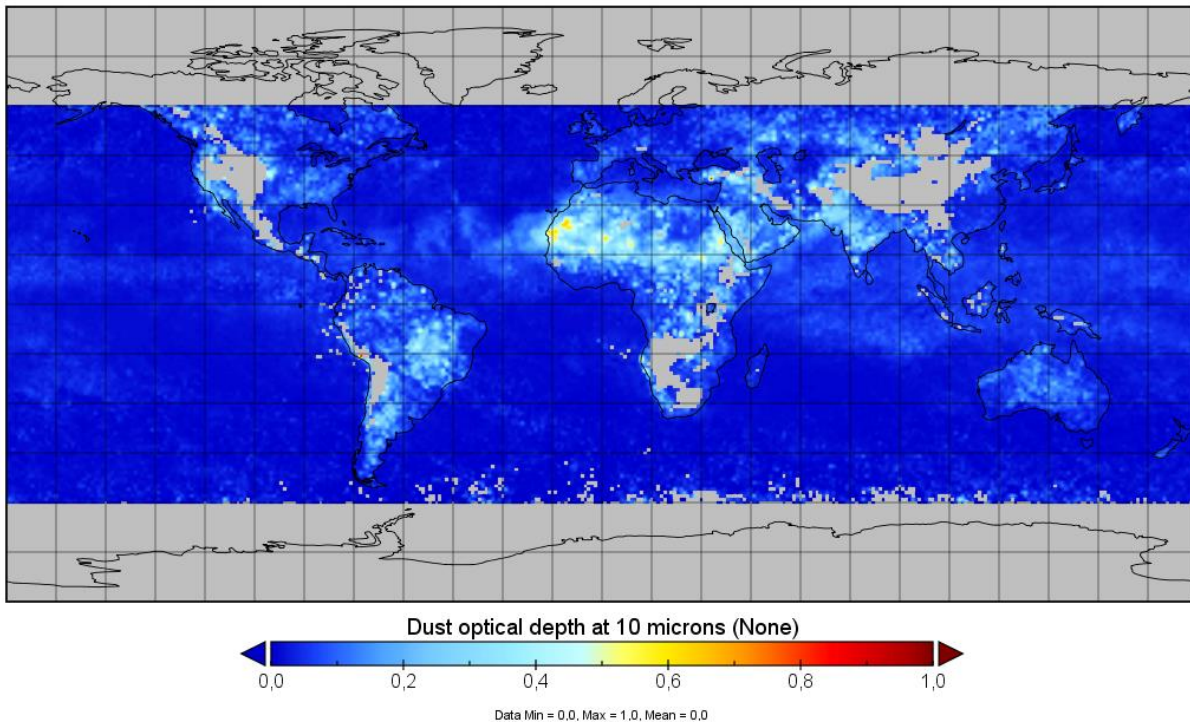
Χάρτης 5.16: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απριλίου 2010 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



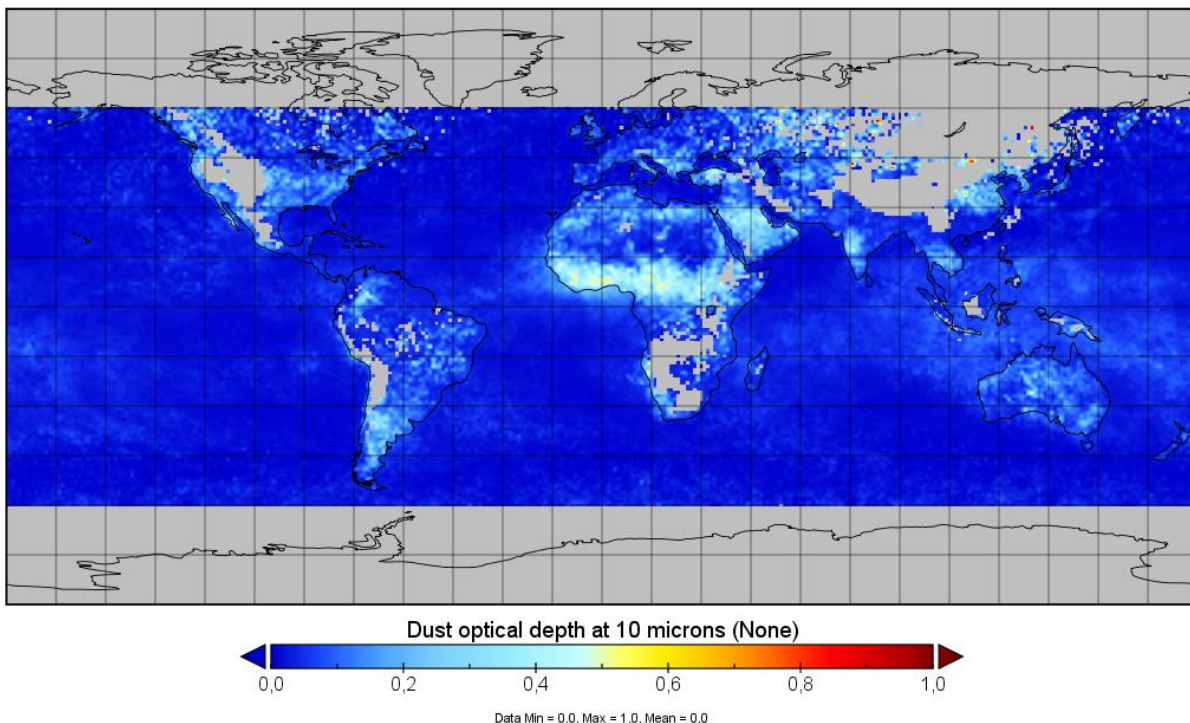
Χάρτης 5.17: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιουλίου 2010 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



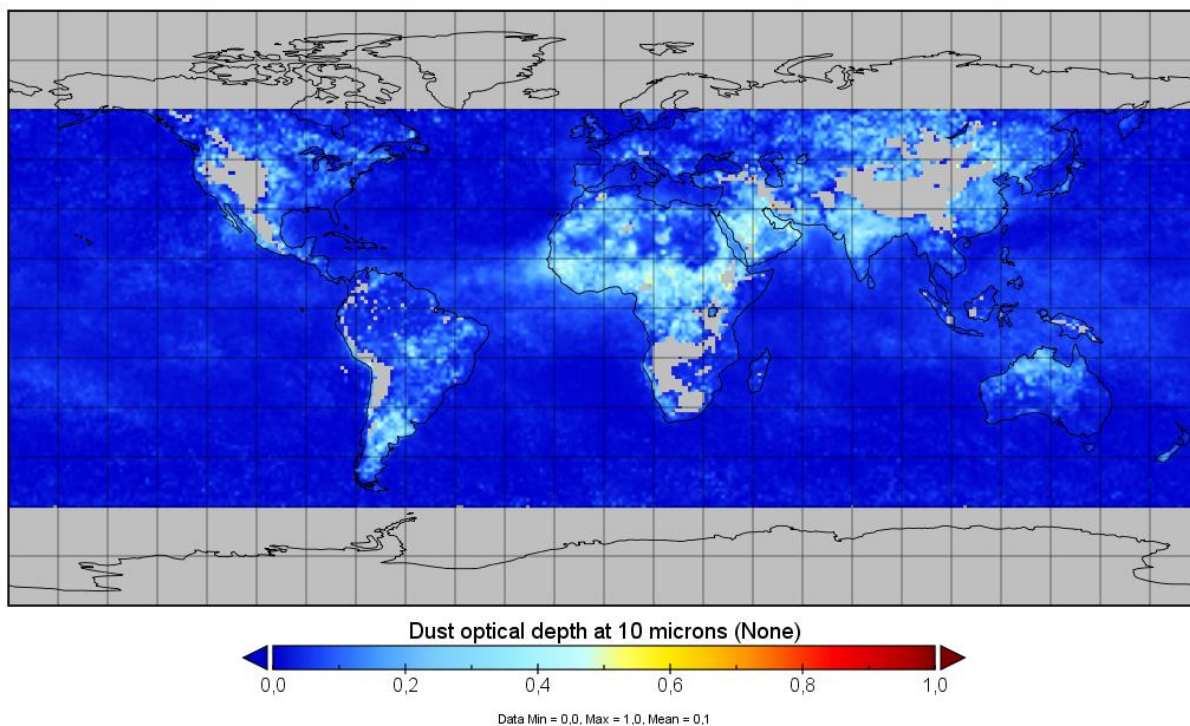
Χάρτης 5.18: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2010 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



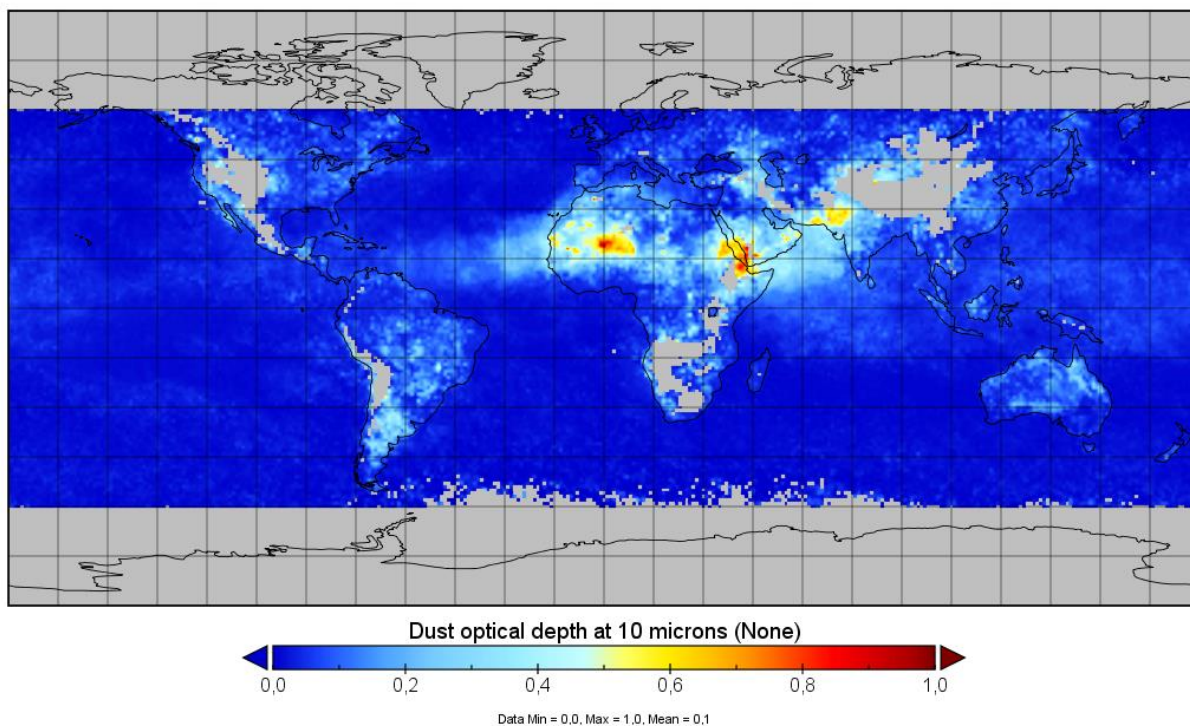
Χάρτης 5.19: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουάριου 2011 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



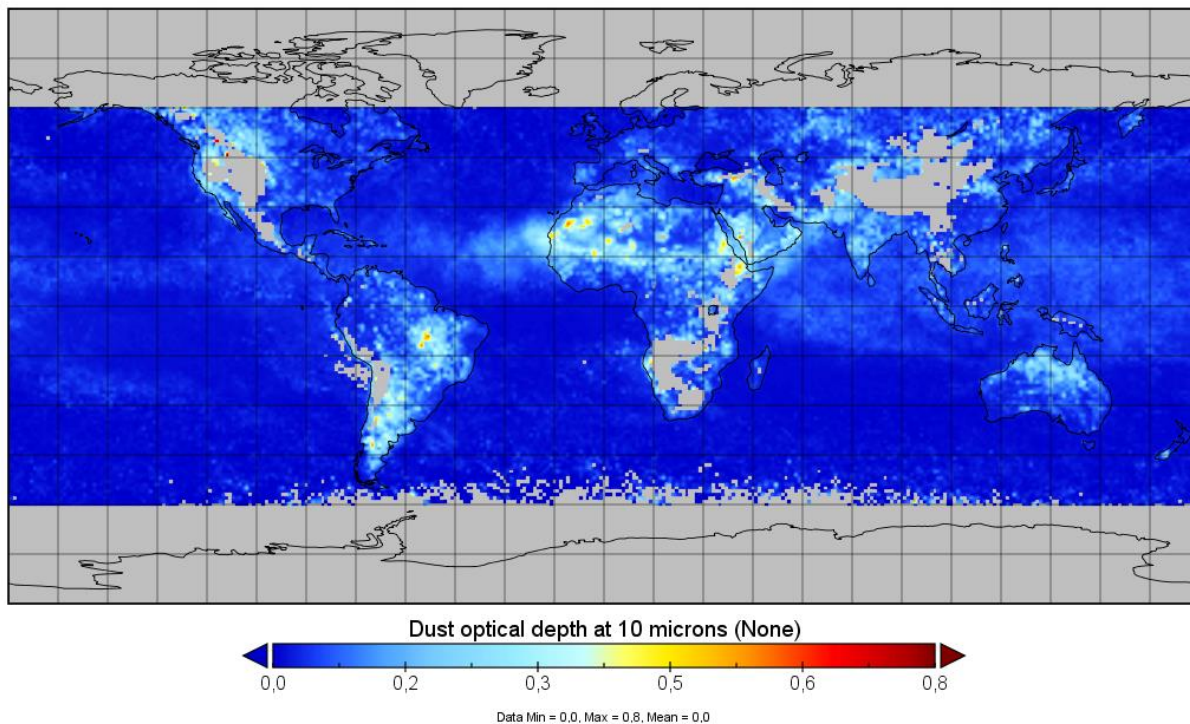
Χάρτης 5.20: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απρίλιου 2011 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



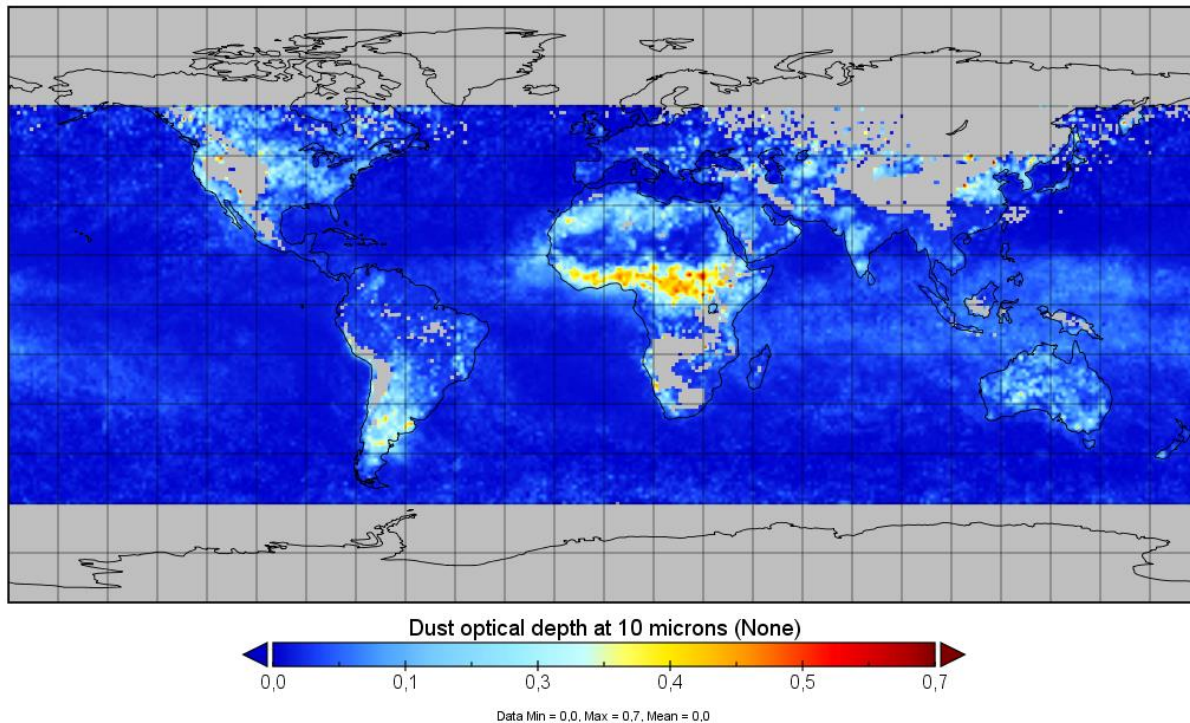
Χάρτης 5.21: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιούλιος 2011 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



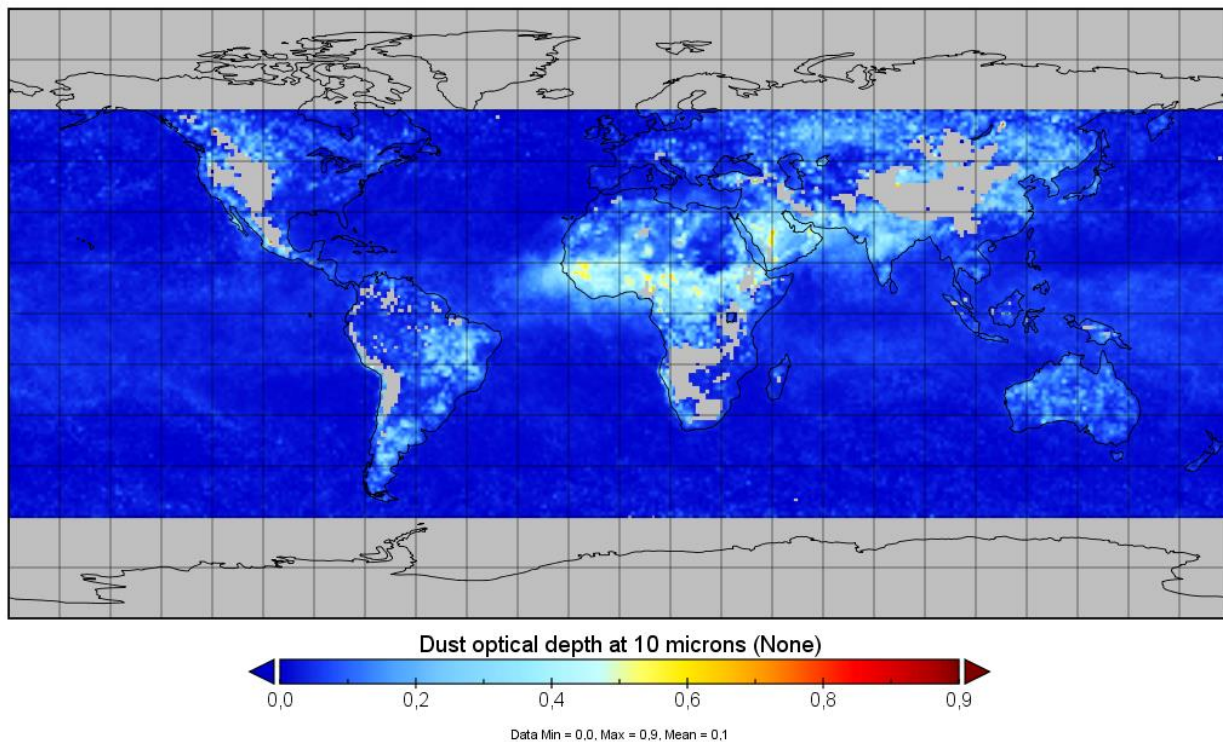
Χάρτης 5.22: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2011 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



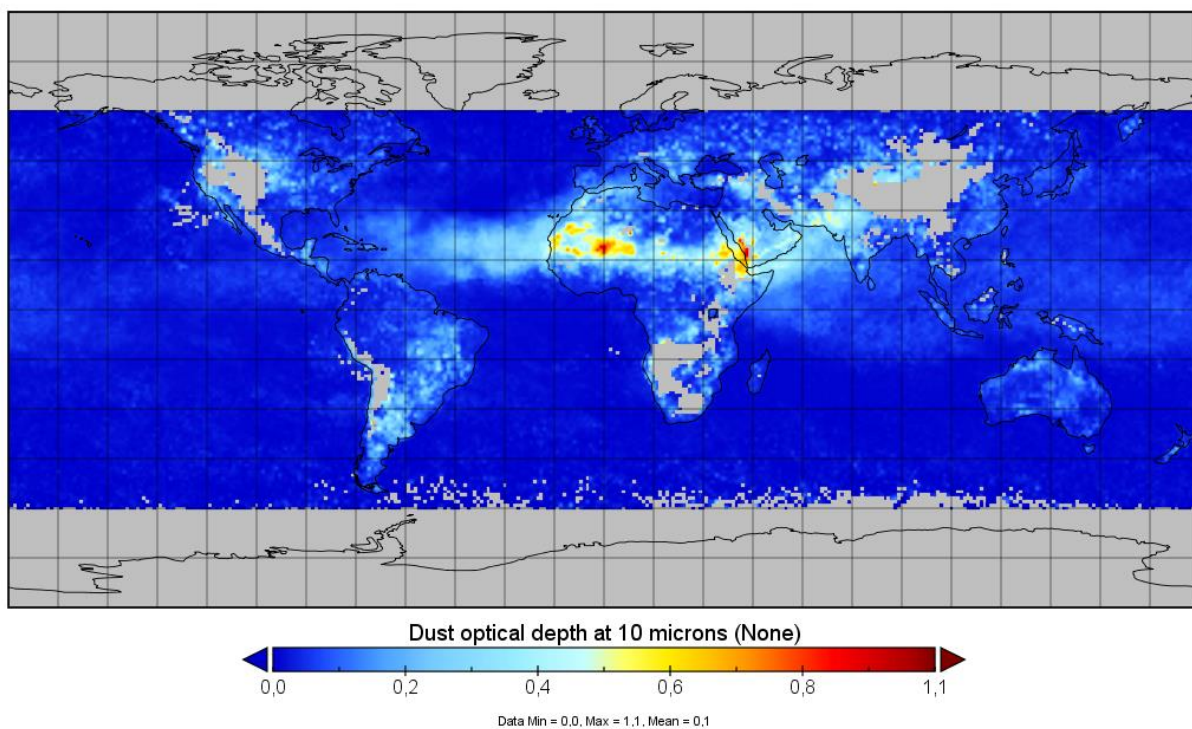
Χάρτης 5.23: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουάριου 2012 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



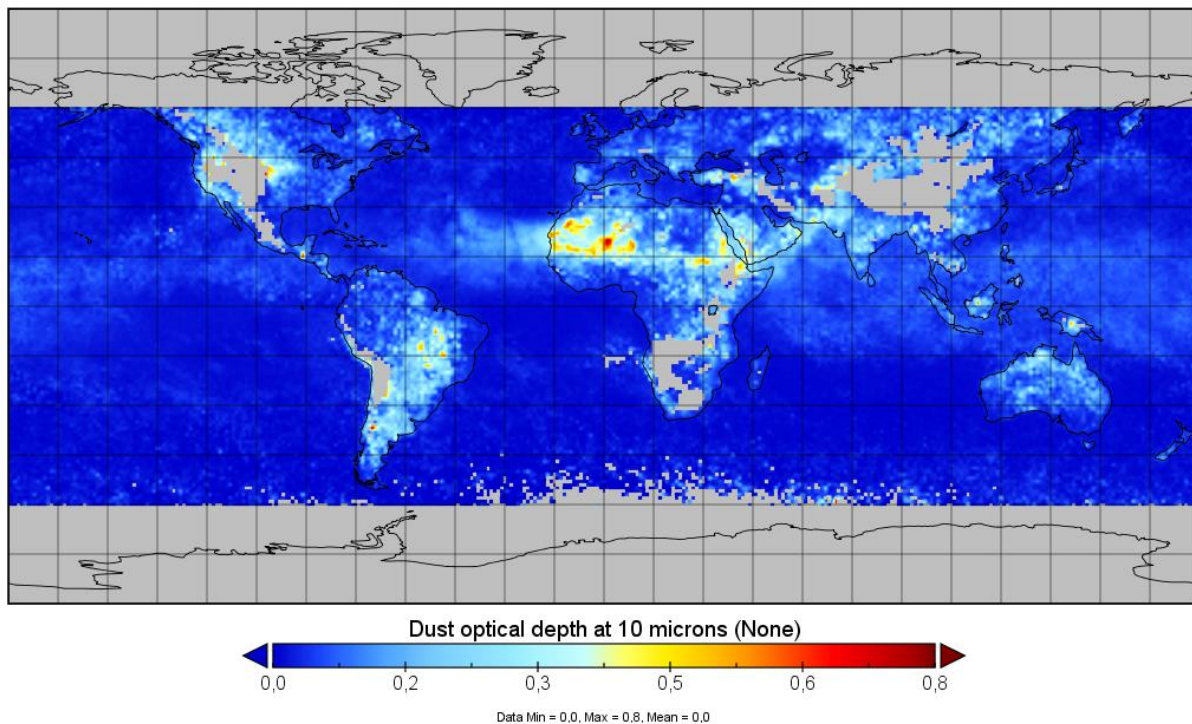
Χάρτης : 5.24 Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απριλίου 2012 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



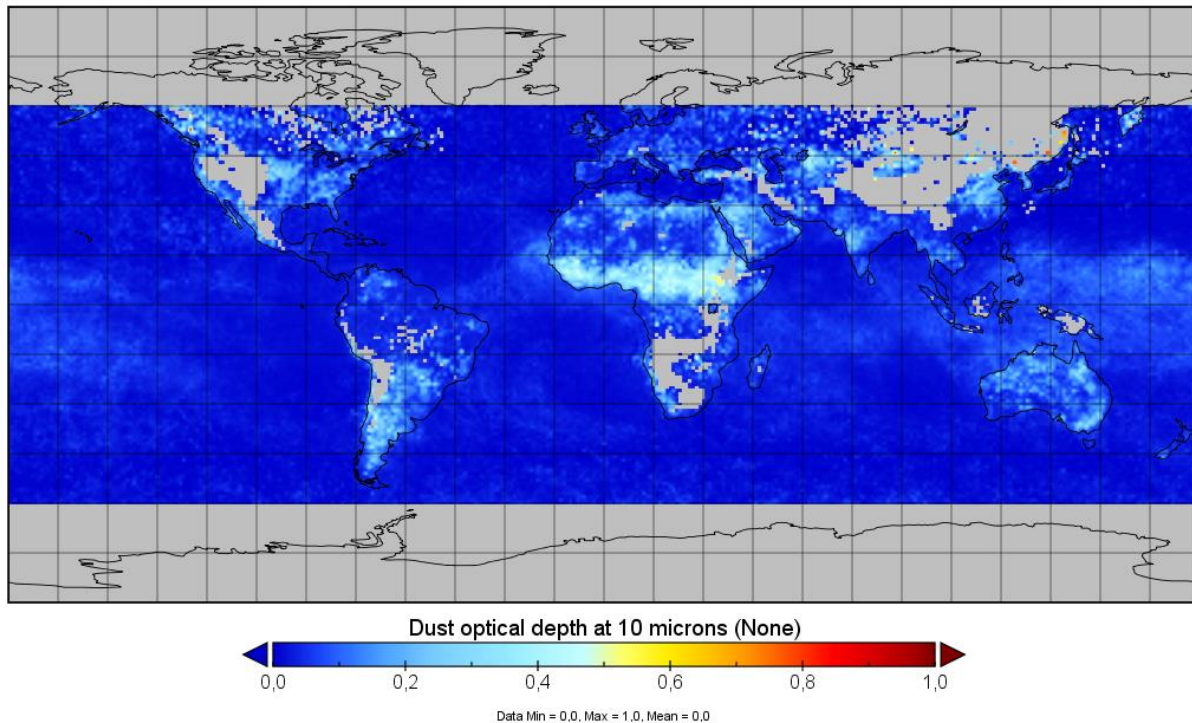
Χάρτης 5.25: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιουλίου 2012 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



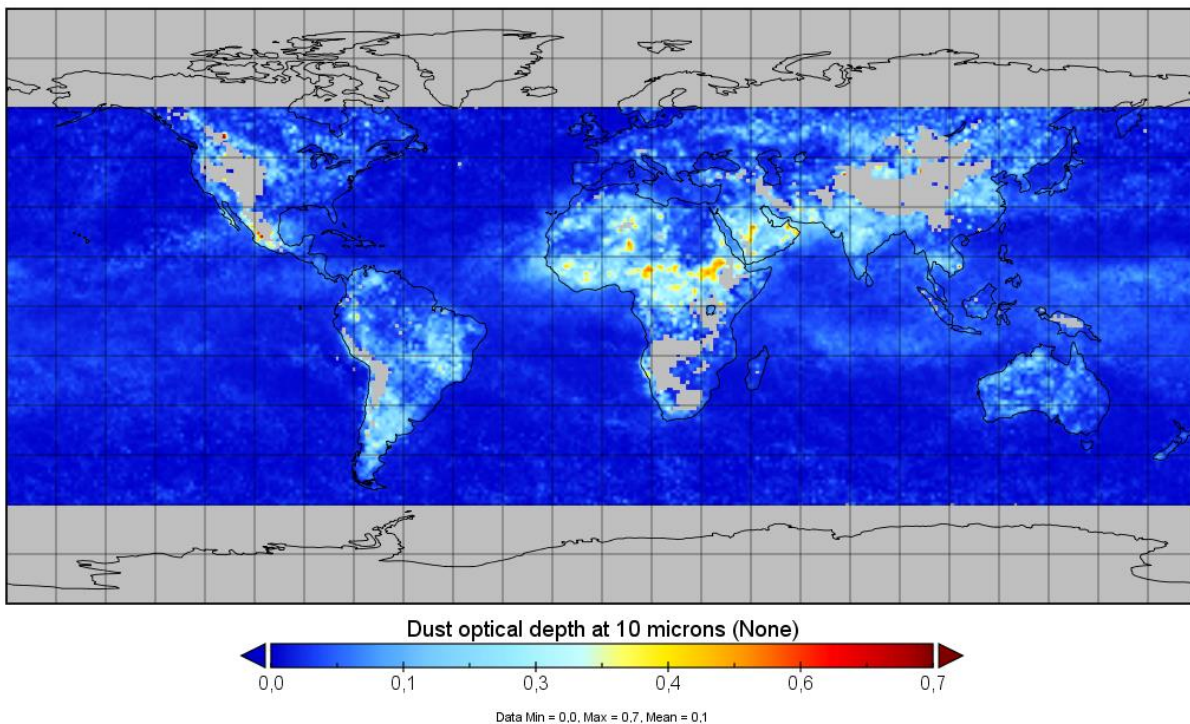
Χάρτης 5.26: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2012 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



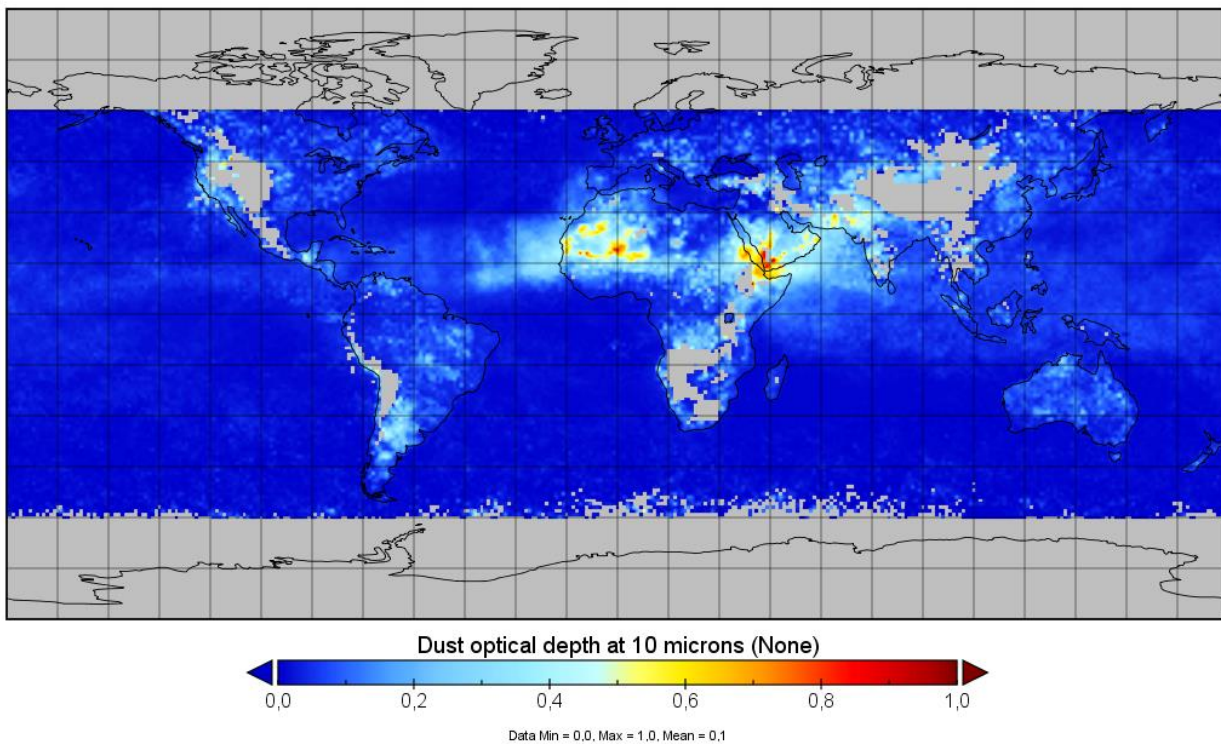
Χάρτης 5.27: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιανουαρίου 2013 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



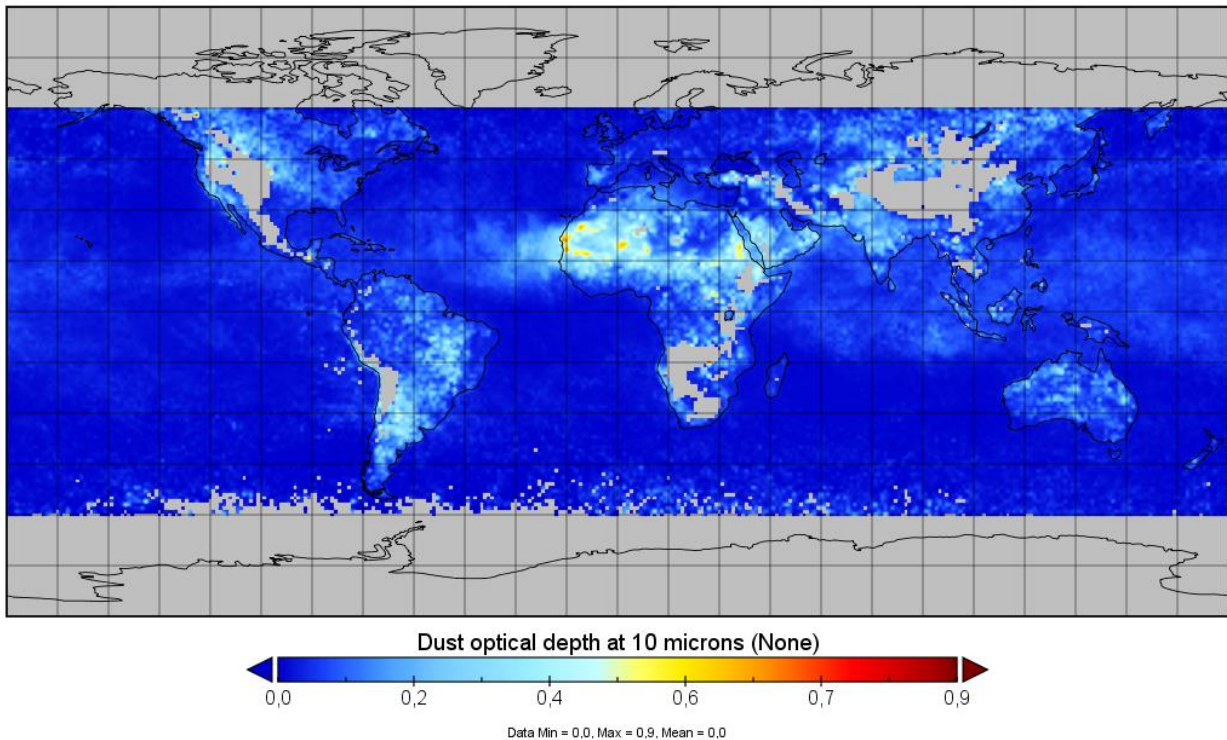
Χάρτης 5.28: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Απρίλιου 2013 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



Χάρτης 5.29: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Ιουλίου 2013 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Dust optical depth at 10 microns



Χάρτης 5.30: Παγκόσμιος χάρτης συγκέντρωσης αερολυμάτων, Σεπτέμβριου 2013 με οπτικό βάθος σκόνης στα 10 microns

Παρατηρούμε στους χάρτες ότι η κύρια πηγή αερολυμάτων, που ήδη γνωρίζαμε, είναι το bodele depression στο Chad το οποίο είναι ενεργό όλο το χρόνο και πάνω από αυτό βρίσκονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων. Με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται μεταξύ του Απριλίου-Ιουλίου. Τους υπόλοιπους μήνες έχει σταθερά υψηλότερες τιμές από άλλες περιοχές στην Γη. Από εκεί υπάρχουν δυο τροχιές που ακολουθούν τα αερολύματα, τις δυτικές που διασχίζουν τον Ατλαντικό και καταλήγουν στην Αμερική, τις νότιες τροχιές οι οποίες έχουν σημείο εκκίνησης βόρειο-δυτικά της Σαχάρας και μεταφέρουν την σκόνη πάνω από την μεσόγειο η οποία καταλήγει στην Ευρώπη. Τέλος, υπάρχει και ένδειξη ανατολικών τροχιών όπου έχει παρατηρηθεί η μεταφορά αερολυμάτων από την Αφρική ως την Ιαπωνία. Το οποίο φαίνεται και στους παραπάνω χάρτες, συγκεκριμένα στον Σεπτέμβριο του 2013 μπορούμε να δούμε την πορεία των αερολυμάτων, με σημείο εκκίνησης το bodele depression, να διασχίζουν τον Ινδικό ωκεανό να περνάνε πάνω από την Ιαπωνία, Αυστραλία και να καταλήγουν στον Νότιο Ειρηνικό ωκεανό και στην Οχοτσική Θάλασσα αντιστοίχως.

Στους χάρτες αυτούς βλέπουμε ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των αερολυμάτων βρίσκονται, πάνω από το Chad όπου βρίσκεται το bodele depression, πάνω από την έρημο

Gobi δηλαδή τις κύριες πηγές προέλευσης αερολυμάτων, αλλά και πάνω από περιοχές στις οποίες καταλήγουν τα αερολύματα, όπως η Λατινική Αμερική, η Ευρώπη, ο Ινδικός ωκεανός και άλλες. Οι υψηλές τιμές των συγκεντρώσεων των αερολυμάτων ανάλογα το μέρος και την εποχή διαφέρουν, παραδείγματος χάρη στην Νότια Αμερική η προέλευση των υψηλών τιμών αερολυμάτων προκύπτει κατά την διάρκεια εκχερσώσεων και την καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Αντιστοίχως τέτοιες τιμές και εργασίες παρατηρούνται και σε άλλα μέρη του κόσμου όπως στην Κεντρική Αμερική από το Μάρτιο έως τον Μάιο, στην Αφρική από Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο και στην Νοτιοανατολική Ασία από τον Ιανουάριο έως τον Απρίλιο.

Εκτός από τους ανθρωπογενείς παράγοντες για την προέλευση των υψηλών συγκεντρώσεων αερολυμάτων υπάρχουν και οι φυσικοί παράγοντες όπως οι αμμοθύελλες που εμφανίζονται, από τον Μάιο έως τον Αύγουστο, κάθε χρόνο κοντά στην Αραβική χερσόνησο.

6. Συμπεράσματα

Το ποσοστό στο οποίο έχει μελετηθεί και κατανοηθεί η ατμόσφαιρα του Άρη είναι ελάχιστο συγκριτικά με το ποσοστό μελέτης της ατμόσφαιρας της Γης. Όμως, με την βοήθεια μοντέλων προσομοίωσης όπως το GCM, την βοήθεια των οργάνων παρατήρησης των δορυφόρων και διαστημοπλοίων (Διαστημόπλοιο MAVEN, NGIMS αισθητήρας. Δορυφόρος METOP, IASI αισθητήρας) και αλγόριθμους επεξεργασίας δεδομένων(LMD), μπορούμε να δημιουργήσουμε προσεγγίσεις των in situ συνθηκών του κόκκινου πλανήτη. Αποτελέσματα των παραπάνω εργαλείων είναι οι χάρτες της εργασίας αυτής.

Από την σύγκριση αυτών των χαρτών της Γης και του Άρη, τα πιο εμφανή συμπεράσματα είναι: Η μεγαλύτερη ποσότητα των αερολυμάτων που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα του Άρη συγκριτικά με την ποσότητα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα της Γης. Ο μεγαλύτερος κύκλος ζωής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα του Άρη από ότι αυτός των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα της Γης. Και η παρουσία του φαινομένου των καταιγίδων σκόνης πιο έντονων, στον Άρη, αν και αραιότερων σε συχνότητα απ' ότι στη Γη.

Τα ευρήματα αυτά προκαλούν ερωτηματικά. Γιατί το ποσοστό των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα του Άρη είναι μεγαλύτερο από αυτό στη Γη, αφού για την ανύψωση και την αιώρηση των αερολυμάτων χρειάζονται υψηλότερες ταχύτητες ανέμων σε μία αραιότερη ατμόσφαιρα όπως αυτή του Άρη;

Η ταχύτητα των ανέμων για την ανύψωση των σωματιδίων από το έδαφος υπολογίζεται από τον τύπο $V \cdot t = A \sqrt{\frac{(p_p - p)gDp}{\rho}}$, όπου Vt = η απαραίτητη ταχύτητα των ανέμων για την ανύψωση σωματιδίων από το έδαφος, A = πειραματικός συντελεστής, ρ =πυκνότητα υγρού, Dp = μέση διάμετρος σωματιδίων, g =επιτάχυνση της βαρύτητας, P_p =πυκνότητα σωματιδίων. Οι παράμετροι του τύπου αυτού παίρνουν διαφορετικές τιμές στις συνθήκες του Άρη και διαφορετικές στις συνθήκες της Γης.

Λόγω της πιο λεπτής ατμόσφαιρας του Άρη η ατμοσφαιρική πίεση που υφίστανται τα σωματίδια είναι μικρότερη και η ταχύτητα τους μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να ανυψώνονται πιο εύκολα αλλά και το μήκος της τροχιάς της ανύψωσης τους είναι 50 φορές μεγαλύτερο από αυτό στην Γη (Greeley, 1977).

Επίσης, οι διαφορετικές συνθήκες της ατμόσφαιρας του Άρη, η έλλειψη ωκεανών και η ολική επικάλυψη του από σκόνη συντελούν στην μεγαλύτερη ποσότητα αερολυμάτων στην ατμόσφαιρά του.

Όσον αφορά πιο συγκεκριμένα στα αερολύματα του Άρη, η ολική επικάλυψη του Άρη από σκόνη κάνει δύσκολο να ξεχωρίσουμε τα σημεία εκκίνησης και τις κύριες πηγές των αερολυμάτων. Και οι γνώσεις που έχουμε για την ατμοσφαιρική κυκλοφορία στον Άρη είναι ελλιπής.

Όμως, από τους χάρτες που κατασκευάσαμε για τη Γη είναι εμφανές ποιες περιοχές έχουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση αερολυμάτων καθώς και τις τροχιές που ακολουθούν όπου και επιβεβαιώνονται από τις θεωρητικές γνώσεις που έχουμε για την ατμοσφαιρική κυκλοφορία της Γης.

Επίσης, γνωρίζουμε ότι σε χαμηλά υψόμετρα της τροπόσφαιρας του Άρη λειτουργεί το μοντέλο του Hadley cell όπως και στην Γη. Αν και στη θερμόσφαιρα του Άρη (87-135km) η ατμοσφαιρική κυκλοφορία λειτουργεί διαφορετικά από αυτήν της Γης. Στην πλευρά που βλέπει προς τον ήλιο, άνεμοι σχηματίζονται από την περιοχή του ισημερινού που βρίσκεται μετά τη μεσημβρία, που αντιστοιχεί στην θέση της αναμενόμενης περιοχής με υψηλή ατμοσφαιρική πυκνότητα και υψηλή θερμοκρασία. Αυτή η θερμοσφαιρική μάζα μεταφέρεται από την ημέρα στη νύχτα είτε μέσω των πόλων είτε ακολουθώντας ένα ισημερινό μονοπάτι προς τα δυτικά. Οι υψηλές αυτές ροές μέσω των πόλων στην σκοτεινή πλευρά του Άρη έχουν μέση ταχύτητα 211 m/s ενώ αυτές στην φωτεινή πλευρά είναι πιο αργές με μέση ταχύτητα 97 m/s.

Όσον αφορά τον λόγο που στην ατμόσφαιρα του Άρη τα αερολύματα έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από αυτά της Γης, προκύπτει από το ότι οι μηχανισμοί άμυνας κατά των αερολυμάτων είναι σχεδόν ανύπαρκτοι.

Τα αερολύματα απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα εν μέρει μέσω της επίδραση της βαρύτητας, αλλά οι κύριες ποσότητες απομακρύνονται μέσω των βροχοπτώσεων, ενώ και οι ωκεανοί παίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς κατά την διάρκεια της μεταφοράς τους τα αερολύματα αποτίθενται στους ωκεανούς που διασχίζουν, με αποτέλεσμα να προσφέρουν σίδηρο στο περιβάλλον και να ενισχύεται έτσι η παραγωγή της χλωροφύλλης (Mahowald et al., 2005).

Στον Άρη, απουσιάζει το φαινόμενο της βαρύτητας, με αποτέλεσμα τα αερολύματα να βρίσκονται αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι στην Γη. Απουσιάζουν οι βροχοπτώσεις και δεν υπάρχουν οι ωκεανοί για να γίνει η ανωτέρω διαδικασία, με αποτέλεσμα να “ξεφεύγουν” ελάχιστες ποσότητες αερολυμάτων από τον κύκλο αυτό. Έτσι, στην περίπτωση του Άρη η σκόνη εναποτίθεται στην επιφάνεια

του πλανήτη, αυξάνεται η λευκαύγεια των περιοχών, μειώνεται η θέρμανση του εδάφους και η δημιουργία ανέμων γίνεται πιο δύσκολη.

Η απουσία όμως του ωκεανού και η εναπόθεση της σκόνης πίσω στην επιφάνεια του Άρη δημιουργούν τις ιδανικές συνθήκες για την δημιουργία ενός καταστροφικού φαινομένου που συναντάμε και στην Γη, τα dust storms. Παρόλο που η ατμόσφαιρα του Άρη είναι αραιότερη και χρειάζεται ισχυρότερους ανέμους για την ανύψωση σωματιδίων, τα dust storms είναι πιο καταστροφικά καθώς κατακλείουν ολόκληρες ηπείρους ακόμα και όλο τον πλανήτη.

Ο ακριβής μηχανισμός δημιουργίας των dust storms στον Άρη δεν είναι απολύτως κατανοητός. Η κύρια υπόθεση όμως είναι ότι, όπως και στην Γη το έδαφος θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, κατ' επέκταση θερμαίνεται ο αέρας κοντά στο έδαφος, ανυψώνεται και ο αέρας στα υψηλότερα υψόμετρα ψύχεται. Όπως και στις καταιγίδες στην Γη, η ανύψωση του θερμού αέρα σχηματίζει, από μικρούς ανεμοστρόβιλους μέχρι καταιγίδες που καλύπτουν ολόκληρες ηπείρους, ενώ όταν καταιγίδες αυτού του μεγέθους συναντηθούν και ενωθούν σχηματίζουν καταιγίδες που καλύπτουν όλο τον πλανήτη με σκόνη.

Οι διαφορές των καταιγίδων σκόνης στον Άρη και στη Γη είναι ότι αυτές στον Άρη εμφανίζονται κυρίως στο νότιο ημισφαίριο, το καλοκαίρι που η θερμοκρασία τότε είναι υψηλότερη, ενώ στη Γη δημιουργούνται κατά κόρον την άνοιξη κυρίως από ερήμους στην Μέση Ανατολή και την Βόρεια Αφρική όπου είναι και μορφολογικά όμοιες με αυτές που υπάρχουν στον Άρη. Επίσης, ότι στη Γη έχουν μικρότερη διάρκεια και ένταση από αυτές στον Άρη. Και ότι στη Γη εμφανίζονται πιο συχνά από ότι στον Άρη, που εμφανίζονται ανά 5 χρόνια. Η πιο πρόσφατη εμφάνιση παγκόσμιας καταιγίδας σκόνης στον Άρη έγινε το 2018 ή MY34 όμως το εύρος των δεδομένων μας είναι από το MY24 μέχρι το MY32.

7. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Banks, J. R. (2010). *The emission and transport of Saharan Dust*. Oxford University.
- Balme, M. R. (2011). *Martian geomorphology*. Geological Society.
- Coles, K. S., Tanaka, K. L., Christensen, P. R., & Dohm, J. M. (2019). *The atlas of mars: Mapping its geography and geology*. Cambridge University Press.
- NASA. (2014, June 3). *NASA Mars Exploration*. NASA. Retrieved March 9, 2022, from <https://mars.nasa.gov/>
- Voiland, A. (2010, November 2). *Aerosols: Tiny particles, big impact*. NASA. Retrieved March 10, 2022, from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>
- Huggett, R. J. (2017). *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge.
- Saito, R. (2007). *Influence of the surface on the atmospheric circulation of Mars: Study with a general circulation model*. Copernicus.
- Greeley, R. (1977). *Dust storms on Mars: Considerations and simulations*. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office.
- Summerfield, M. A. (2014). *Global geomorphology*. Routledge.
- Greeley, R. (2013). *Introduction to planetary geomorphology*. Cambridge University Press.
- Kokk, J.F. (2010) Difference in the wind speeds required for initiation versus continuation of sand transport on Mars: Implications for dunes and dust storms. *Physical Review Letters*, 104, 074502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.074502 ·
- Ishizuka Masahide, Mikami Masao, Yutaka Yamada, Zeng FanJiang, (2009) Threshold Friction Velocities of Saltation Sand Particles for Different Soil Moisture Conditions in the Taklimakan Desert, SOLA, 2009, Volume5, Pages184187, <https://doi.org/10.2151/sola.2009-047>