



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

**ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ
ΕΝΕΡΓΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΠΛΑΝΗΤΗ ΑΡΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ/ΠΛΑΝΗΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΟΥ ΧΡΥΣΑ

A.E.M. : 5062

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΥΛΙΔΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2018



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	σελ. 4
Abstract.....	σελ. 5
Πρόλογος.....	σελ. 6
Εισαγωγή.....	σελ. 7-8
Ιστορία εξερεύνησης.....	σελ. 9-12
Πλανητική Γεωλογία.....	σελ. 13-16
Έργο του Eugene Shoemaker.....	σελ. 15-16
Μέθοδοι γεωλογικής μελέτης.....	σελ. 17-19
Αστρονομικά στοιχεία Άρη.....	σελ. 20-23
Δορυφόροι πλανήτη.....	σελ. 22-23
Γεωλογία του Άρη.....	σελ. 24-30
Μαγνητικό πεδίο.....	σελ. 24
Νερό πλανήτη.....	σελ. 25
Διαφοροποίηση επιφάνειας.....	σελ. 26-27
Ηφαιστειότητα.....	σελ. 28-30
Δομή.....	σελ. 31-32
Ατμόσφαιρα.....	σελ. 33-37
Κλίμα.....	σελ. 36-37
Ορυκτολογία-Πετρολογία του Άρη.....	σελ. 38-41
Τεκτονική.....	σελ. 42-43
Σεισμικότητα.....	σελ. 42-43
Ενεργά ρήγματα.....	σελ. 44-68
Διδασκαλία της γεωλογίας του Άρη.....	σελ. 69-71
Επίλογος.....	σελ. 72



Παράρτημα.....	σελ. 73-76
Ορισμοί.....	σελ. 73
Σχήματα-πίνακες.....	σελ. 74-76
Βιβλιογραφία.....	σελ. 77-79



Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση της γεωλογικής δομής και της τεκτονικής δραστηριότητας του πλανήτη Άρη.

Στην πορεία αυτής της εργασίας έγινε λεπτομερής παρουσίαση της πλανητικής γεωλογίας σαν επιστήμη και μία σύντομη αναφορά στο έργο του Eugene Shoemaker . Στη συνέχεια δίνονται οι τρόποι γεωλογικής μελέτης κυρίως μέσω της φασματομετρίας. Έπειτα αναλύθηκαν η γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες του πλανήτη Άρη καθώς και διάφορα γεωλογικά στοιχεία ξεκινώντας γενικά από τα αστρονομικά στοιχεία του Άρη και συνεχίζοντας με τη γεωλογία, τεκτονική και σεισμικότητα. Στην συνέχεια με γνώμονα 3 εργασίες έγινε λεπτομερής παρουσίαση των στοιχείων, μεθόδων και αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την ενεργό τεκτονική του και την δημιουργία παλαιοσεισμών και σεισμών σήμερα.

Η εργασία κλείνει με την πρόταση μου για τον τρόπο διδασκαλίας των γεωλογικών χαρακτηριστικών του Άρη.

Τέλος παρατίθεται ο επίλογος, με τον οποίο συμπεραίνεται πως ο καταλληλότερος πλανήτης για την διαβίωση του ανθρώπου είναι ο πλανήτης Γη.

Λέξεις κλειδιά : πλανητική γεωλογία, χάρτης, Άρης, επιφάνεια, διαστημοσυσκευή, τεκτονική, ρήγμα



The purpose of this work is to analyze the geological structure and tectonic activity of the planet Mars.

In the course of this work, a detailed presentation of planetary geology as a science and a brief reference to Eugene Shoemaker's work was made. The methods of geological study are then given mainly through the spectrometry. Then we analyzed the geomorphological features of the planet Mars as well as various geological data starting from the astronomical elements of Mars and continuing with geology, tectonics and seismicity. Then, based on 3 papers, a detailed presentation of the data, methods and results related to its active tectonics and the creation of old earthquakes and earthquakes was presented..

The work ends with my suggestion on how to teach Mars' geological features.

Finally, there is an epilogue, which concludes that planet Earth is the most suitable planet for the living of man.

Keywords: planetary geology, map, Mars, surface, spacecraft, tectonic, fault



Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού

Προγράμματος Σπουδών του τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η Διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή Παυλίδη Σπυρίδωνα.

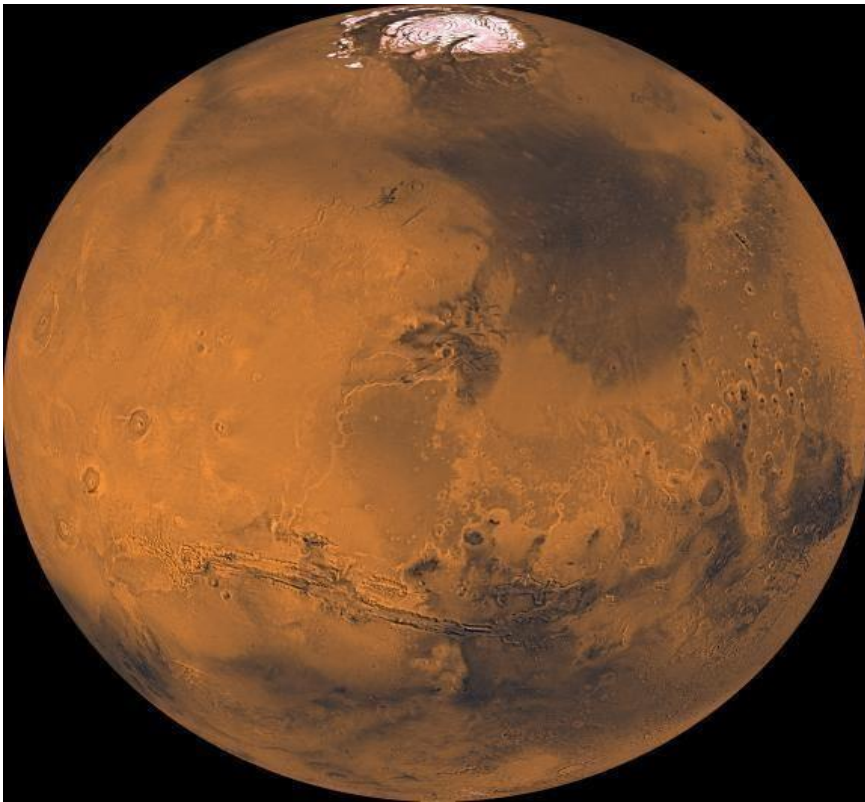
Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την ενεργό τεκτονική και γεωλογική δομή του πλανήτη Άρη και συγκεκριμένα την ενεργότητα των ρηγμάτων του. Σκοπός της είναι η γνωριμία με την πλανητική γεωλογία, αντικείμενο με το οποίο δεν είμαστε εξοικειωμένοι στη χώρα μας ακόμη, όπως επίσης και η ανάλυση της γεωλογίας και συγκεκριμένα της ενεργού τεκτονικής του πλανήτη Άρη, τον πιο πολυσυζητημένο πλανήτη του ηλιακού συστήματος.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της εργασίας Κύριο Παυλίδη Σπυρίδωνα, για την υποστήριξη και καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια συγγραφής,όσο και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Επίσης τους πολύ καλούς μου φίλους και συμφοιτητές Σοφία Καλφάκη, Σπυριδούλα Σοπιάδου, Ηλιάνα Σαρκατζίδου, Νικολέτα Τζιμαγιώργη, Νάσια Κανλή, Μαρία Κυριακοπούλου, Κυριάκος Κουτσέλης, Χριστίνα Χασάπη, Λυδία Οικονομούδη, Ελένη Δρακοπούλου, Μαριαλένα Ταξοπούλου, Δημητρίου Δημήτριος, Κωνσταντίνος Σιουτόπουλος, Στυλιανός Καραστέργιος για την συνολική του βοήθεια και υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και εκπόνησης της εργασίας.

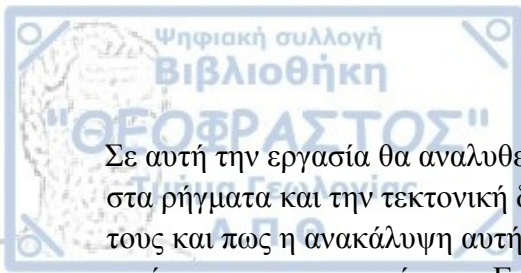
Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τις απεριόριστες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την στήριξη και ενθάρρυνση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου,καθώς και για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ο πλανήτης έχει πάρει το όνομά του από το ελληνικό μυθικό θεό του πολέμου Άρη. Οι αρχαίοι Έλληνες τον συσχέτισαν με την ακολασία και τις αναταραχές λόγω του κόκκινου χρώματος που θύμιζε αίμα και τις διακριτικής κίνησής του στον ουρανό. Είναι γνωστός από την προϊστορική ακόμη εποχή καθώς και ο πρώτος πλανήτης που παρατηρήθηκε από τηλεσκόπιο. Αναφέρεται συχνά με το όνομα κόκκινος ή ερυθρός πλανήτης λόγω του κόκκινου χρώματος του από το τριοξείδιο του σιδήρου στην επιφάνειά του. Ο πλανήτης Άρης αποτελεί έναν από τους πιο καλά μελετημένους από τον άνθρωπο πλανήτες. Ο Άρης είναι ο πιο πολυσυζητημένος πλανήτης για τις πιθανότητες ύπαρξης ζωής, που δεν έχουν αποσαφηνιστεί μέχρι σήμερα.



Εικόνα 1. Ολοκληρωμένη απεικόνιση του Άρη η οποία δημιουργήθηκε από συναρμολόγηση 1000 φωτογραφιών από το Viking Orbiters. Αυτή η εικόνα περιλαμβάνει το βόρειο πόλο (επάνω), τη κοιλάδα Valles Marineris (λίγο πιο κάτω από το κέντρο) και το υψίπεδο Tharsis (αριστερά).Εμφανίζεται σαφώς η γεωμορφολογική ποικιλομορφία. (πηγή NASA/JPL και U.S. Geological Survey.)

Οι ανακαλύψεις για τον κόκκινο πλανήτη ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια αυξάνονται συνεχώς δίνοντας νέα στοιχεία για τις ιδιαιτερότητες του πλανήτη αλλά και τις μεγάλες ομοιότητες που παρουσιάζει με τη Γη. Η ύπαρξη νερού ίσως και "τρεχούμενου", οι αιολικοί σχηματισμοί, τα ηφαίστεια, εποχές, ρήγματα-τεκτονισμός είναι μερικές μόνο από τις ανακαλύψεις των επιστημόνων κατά τις τελευταίες δεκαετίες.

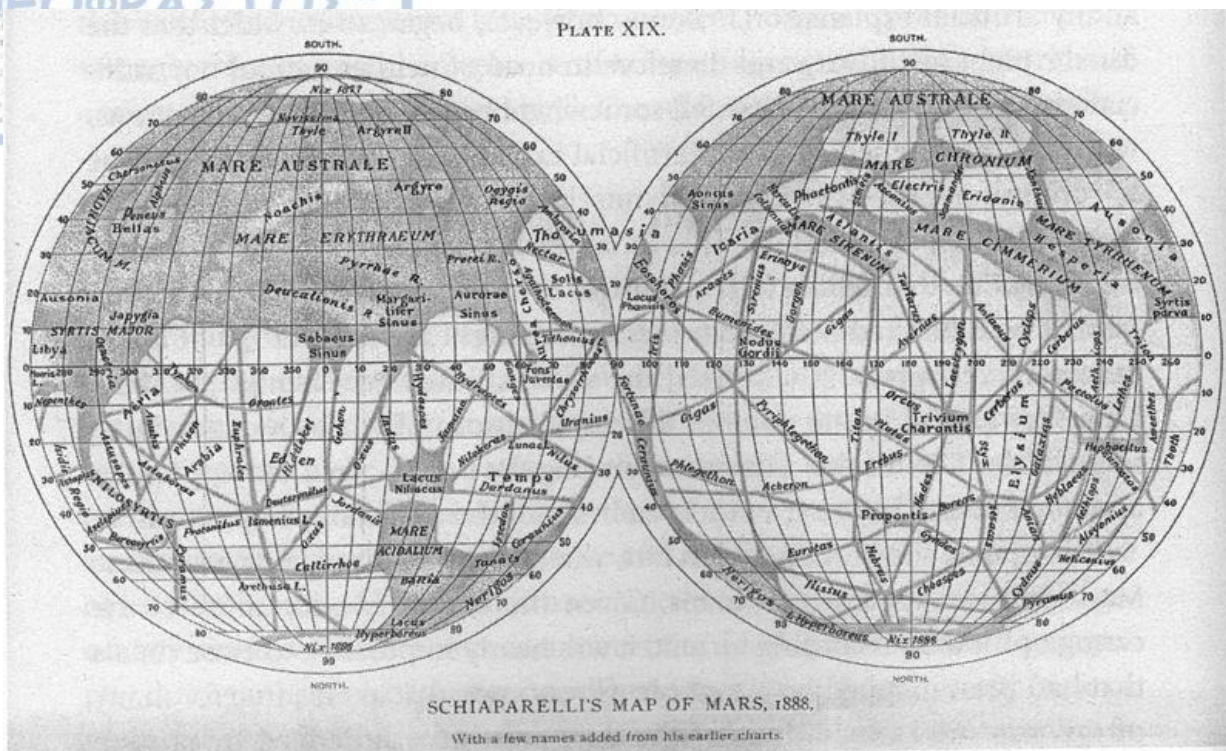


Σε αυτή την εργασία θα αναλυθεί η γεωλογία του πλανήτη, ενώ θα γίνει ιδιαίτερη ανάλυση στα ρήγματα και την τεκτονική δράση, την ενεργότητα τους σήμερα, τη θεωρία σχηματισμού τους και πως η ανακάλυψη αυτή βοηθάει τους επιστήμονες για την καλύτερη κατανόηση των αντίστοιχων μηχανισμών στη Γη.

Η έρευνα που στοχεύει στην κατανόηση της σύστασης του εδάφους, υπεδάφους και ατμόσφαιράς ενός πλανήτη ονομάζεται πλανητική γεωλογία. Αυτός ο κλάδος της γεωλογίας αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο κλάδο. Οι κύριοι μέθοδοι εφαρμογής γίνονται από τηλεσκοπία, απευθείας φωτογραφίες από διαστημοσυσκευές, από μετεωρίτες και από λήψη δειγμάτων.

Η εμφάνιση του πλανήτη στον γήινο ουρανό διαφέρει σε σχέση με τα άλλα αστέρια. Η φαινομενική τροχιά του περιστασιακά διαγράφει αντίστροφα κίνηση στον γήινο ουρανό. Αυτή η συμπεριφορά δημιουργούσε σύγχυση ανά τους επιστήμονες για αρκετούς αιώνες. Αλλά το 1514, λεπτομερείς μελέτη της κίνησης αυτής, οδήγησε τον πολωνό αστρονόμο Νικόλαο Κοπέρνικο σε μία επαναστατική ανακάλυψη για το ηλιακό μας σύστημα. Για ένα μεγάλο μέρος της ανθρώπινης ιστορίας θεωρούταν ότι η Γη αποτελούσε το κέντρο του σύμπαντος. Ωστόσο ο Κοπέρνικος θεωρεί ότι η Γη μάλλον δεν αποτελεί το κέντρο του σύμπαντος, με την εξήγηση ότι όλοι οι πλανήτες και αστέρες περιστρέφονται γύρω από τον Ήλιο και γι' αυτό παρατηρούμε αυτή την ιδιαίτερη κίνηση του Άρη, καθώς η Γη τον περνά στην τροχιά ο Άρης εμφανίζεται στον ουρανό σα να πηγαίνει αρχικά προς μία πορεία και μετά να γυρνάει προς τα πίσω.

Οι αστρονόμοι γύρισαν πρώτη φορά τηλεσκόπιο προς τον Άρη το 1610, καθώς η τεχνολογία των τηλεσκοπίων γενικά βελτιωνόταν. Το 1877 τα τηλεσκόπια μπορούσαν να μεγεθύνουν την εικόνα του πλανήτη ώστε να διακρίνεται στο μέγεθος μίας δεκάρας. Μέγεθος αρκετά μεγάλο για εκείνη την εποχή ώστε ο διευθυντής του παρατηρητηρίου του Μιλάνο, Giovanni Schiaparelli να προσπαθήσει να σκιαγραφήσει την επιφάνεια του πλανήτη και να ονομάσει γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της. Μελετώντας την επιφάνεια του παρατηρεί σταυρωτές γραμμές, οι οποίες δεν ήταν αντιπροσωπευτικές της επιφάνειας αλλά οι καλύτερες δυνατές εκείνης της εποχής. Ο Giovanni Schiaparelli ονόμασε αυτές τις γραμμές κανάλια και λόγω της μεγάλης ευθύτητας που παρουσίαζαν θεωρήθηκε ότι αποτελούσαν "δρόμους" ευφυών όντων. Αργότερα το 1894 ένας εύπορος άντρας από τη Βοστώνη, ο Percival Lowell συν επαρμένος από την ιδέα αυτή χρηματοδότησε τη δημιουργία ενός μεγάλου τηλεσκοπίου στην πλαγιά του Flagstaff στην Αριζόνα. Παρατηρώντας επί δεκαετίες τον κόκκινο πλανήτη εδραίωσε την άποψη σύμφωνα με τις γνώσεις και τα μέσα που διέθετε ότι υπήρχε προηγμένος πολιτισμός στον Άρη



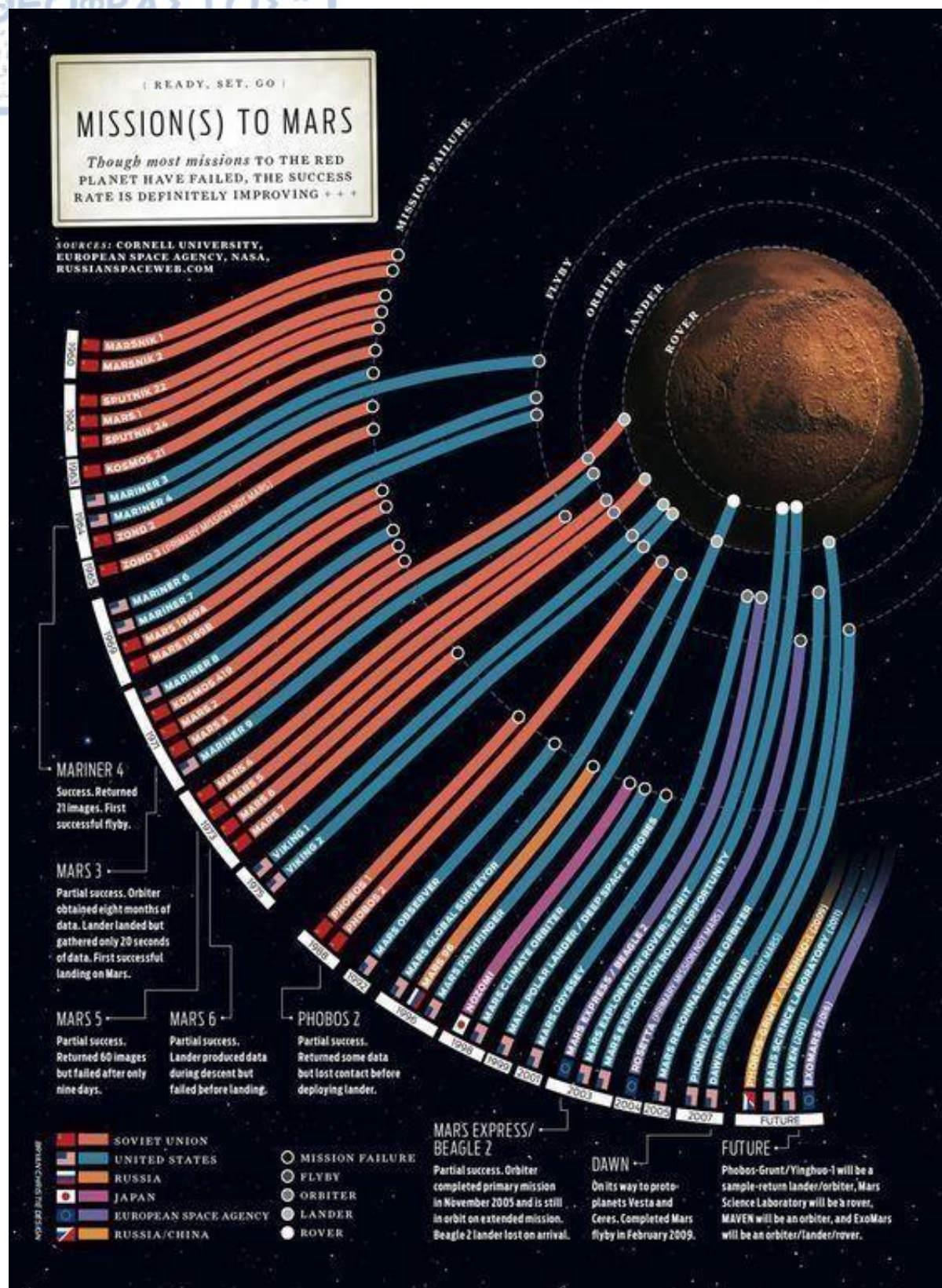
Εικόνα 2. Αυτός ο χάρτης βασίστηκε στις παρατηρήσεις του ιταλού αστρονόμου Giovanni Schiaparelli στα τέλη του 19ου αιώνα. Έκανε τις περισσότερες ανακαλύψεις του σε δύο παρατηρητήρια, ενώ θεώρησε ότι υπήρχαν και κανάλια στην επιφάνεια του πλανήτη, ανακάλυψη που αποδείχθηκε αργότερα λανθασμένη.
(commons.wikimedia.org/wiki/File:Schiaparelli_Mars_Map.jpeg)

Σε αυτό το πλαίσιο τις αποκρίές του 1938, ένας νεαρός ηθοποιός ο Orson Wells μεταδίδει σε ραδιοφωνική εκπομπή ένα απόσπασμα από τη νουβέλα του HG Wells "Ο πόλεμος των κόσμων" όπου Αρειανοί σκορπίζουν τον όλεθρο σε μία επικείμενη επίθεσή τους στη Γη. Χιλιάδες πολίτες πίστεψαν ότι η εισβολή ήταν αληθινή. Το γεγονός αυτό προκάλεσε την αφορμή για χρηματοδότηση με σκοπό τη λεπτομερή εξέταση του πλανήτη για παρουσία ζωής και πολιτισμού. Η πρώτη προσπάθεια έγινε το 1960 από σοβιετικούς επιστήμονες με το πρόγραμμα Μαρσινγκ χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Το 1964 η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος NASA (National Aeronautics and Space Administration) επιχείρησε τη πρώτη εξερεύνηση του κόκκινου πλανήτη με το διαστημόπλοιο Mariner 4. Η εικόνες που έστειλε το διαστημόπλοιο απογοήτευσαν τους επιστήμονες καθώς απεικονιζόταν ένας νεκρός ξηρός έρημος πλανήτη με κρατήρες που θύμιζαν έντονα την εικόνα της Σελήνης. Ακολούθησε το πρόγραμμα Mars από τη Σοβιετική ένωση που αποτέλεσαν τα πρώτα σκάφη που προσεδαφίστηκαν στον πλανήτη και λειτούργησαν στην πορεία. Αργότερα το 1971 η NASA έστειλε ένα άλλο διαστημικό σκάφος το Mariner 9 με σκοπό την πλήρη χαρτογράφηση της επιφάνειας του πλανήτη. Σε αυτή την αποστολή ανακαλύπτεται το υψίπεδο Tharsis όπου βρίσκεται το ψηλότερο γνωστό όρος του ηλιακού συστήματος Olympus καθώς και τη μεγαλύτερη γνωστή κοιλάδα Marineris.

Έπειτα το 1976 το διαστημόπλοιο Viking εκτοξεύεται με σκοπό να προσγειωθεί στην επιφάνεια του Άρη, στέλνει τις πρώτες φωτογραφίες από την επιφάνεια, δίνει τη δυνατότητα για μελέτη του κλίματος και μελέτη του εδάφους για βιολογικές ενδείξεις, δίχως αποτέλεσμα. Έτσι οι μελέτες για τον κόκκινο πλανήτη διακόπτονται για αρκετά χρόνια.

Ωστόσο το 1984 ένας νεαρός επιστήμονας σε μία αποστολή στην Ανταρκτική εντόπισε έναν μετεωρίτη με ένα ασυνήθιστο πράσινης απόχρωσης χρώμα, ο οποίος εσφαλμένα θεωρήθηκε κομμάτι αστεροειδή. Στην συνέχεια στις αρχές του 1990 ένας αναλυτής που ασχολούταν με μετεωρίτες, μελέτησε τον δείγμα ALH84001 κάτω από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, διαπιστώνοντας ότι ο μετεωρίτης αποτελούσε κομμάτι του Άρη. Περισσότεροι επιστήμονες άρχισαν να ασχολούνται με το συγκεκριμένο μετεωρίτη, στη μελέτη τους ανακάλυψαν ότι εμπεριείχε σφαιρίδια άνθρακα, τα οποία αποτελούν, τουλάχιστον στη Γη, δομικό στοιχείο ζωής. Περαιτέρω μελέτη αυτών των σφαιριδίων έδωσε εικόνες που έμοιαζαν να απεικονίζουν οργανικά στοιχεία. Το 1996 η NASA ανακοίνωσε την υπόθεση για ύπαρξη πρώιμης ζωής στον Άρη. Αν και οι εν συνεχεία μελέτες έδωσαν αμφίρροπα αποτελέσματα, η υπόθεση αυτή έδωσε την αφορμή στη NASA για νέες αποστολές. Το 2003 η NASA εκτοξεύει δύο διαστημόπλοια στην επιφάνεια του κόκκινου πλανήτη, τα οποία ήταν τα ROVERS Spirit και Opportunity ρομποτικά συστήματα που θα κινούνταν και θα μελετούσαν την επιφάνεια του πλανήτη, αποτελούν δηλαδή ρομπότ-γεωλόγους. Τα Rovers ανακαλύπτουν την παρουσία νερού στον πλανήτη κατά το παρελθόν και συνεχίζουν την εξερεύνηση τους μέχρι και σήμερα. Την ίδια περίοδο η ESA (European Space Agency) στέλνει το Mars Express όπου διαπιστώνεται η ύπαρξη πάγου νερού στο υπέδαφος και Mars Observer με την ισχυρότερη κάμερα που έχει σταλεί σε άλλο πλανήτη. Το 2007 έχουμε την εξερευνητική αποστολή της διαστημικής συσκευής Phoenix στον βόρειο πόλο του πλανήτη. Το 2011 η NASA σε συνεργασία με την Ρωσία και την Κίνα εκτοξεύει το Phobos-Grunt χωρίς επιτυχία. Αργότερα το 2012 με το Mars Science Laboratory γνωστό ως Curiosity από τη NASA προσεδαφίστηκε στον Άρη με επιτυχία. Το 2015 η ίδια υπηρεσία έδωσε ανακοινωθέν ότι έχει ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη "τρεχούμενου" νερού στον πλανήτη. Τέλος η NASA σχεδιάζει μία επανδρωμένη αποστολή στον Άρη, όμως τουλάχιστον μετά το 2025.

Όλες αυτές οι αποστολές και η ερευνητική διαδικασία αποτελούν κομμάτι ενός νέου σχετικά κλάδου που ονομάζεται πλανητική γεωλογία και αποτελεί συνδυασμό πολλών επιστημών με επίκεντρο τη Γεωλογία.



Εικόνα 3. Η ιστορία των αποστολών στον Άρη με τις αποτυχημένες και επιτυχημένες αποστολές καθώς και οι χώρες που τις πραγματοποίησαν. (<http://www.bryanchristiedesign.com/infographics>)

Η πλανητική Γεωλογία είναι η μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών των πλανητικών σωμάτων στα ηλιακά συστήματα. Συγκεκριμένα μελετά επιφανειακές και εσωτερικές διεργασίες σε στερεά αντικείμενα στα ηλιακά συστήματα: πλανήτες, δορυφόροι, αστεροειδείς, κομήτες και δακτύλιοι. Από τη φύση της η πλανητική Γεωλογία είναι διεπιστημονικό θέμα καθώς συνδέεται άμεσα και με άλλες επιστήμες. Ο πλανητικός γεωλόγος θα πρέπει να έχει καλό υπόβαθρο όχι μόνο στη Γεωλογία αλλά επίσης ανάλογα με την ειδική εφαρμογή σε ποικίλες επιστήμες όπως Βιολογία, Αστρονομία, Χημεία, Τηλεπισκόπηση κ.α. Επιπλέον είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους πλανητικούς γεωλόγους να είναι καταρτισμένοι στον προγραμματισμό υπολογιστών και την επεξεργασία εικόνας/φωτογραφίας προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από το περιορισμένο πολλές φορές σύνολο πληροφοριών.



Εικόνα 4. Ο αστροναύτης Harrison Schmitt στέκεται δίπλα στον ογκόλιθο κατά τη διάρκεια του τρίτου EVA (Extravehicular activity), δηλαδή περίπατος έξω από το διαστημικό σκάφος για ερευνητικούς σκοπούς η επισκευή-συντήρηση σκάφους που πραγματοποιήθηκε στην επιφάνεια της Σελήνης (moonwalk) ενώ συνήθως πραγματοποιείται στο διεθνές διαστημικό σταθμό. <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History>

Η πλανητική γεωλογία συμμετέχει σε ένα σημαντικό βαθμό στις διαστημικές εξερευνήσεις και ανακαλύψεις.

Πολλές φορές οι ερευνητές θα πρέπει να έρθουν αντιμέτωποι με εντελώς νέα εδάφη ή γεωλογικές δομές που δεν υπάρχουν αντίστοιχες στη Γη. Παραδείγματα υπάρχουν άφθονα στο ηλιακό μας σύστημα όπως η ηφαιστειότητα που συνοδεύεται από λάβα θείου και πάγου (ηφαίστεια που εκχύνουν πάγο στον Τιτάνα), ακραίες κλιματικές συμπεριφορές (γιγάντια αιώνια καταιγίδα στον Δία). Σε αυτές τις περιπτώσεις ο πλανητικός γεωλόγος θα πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμόσει αποτελεσματικά τους φυσικούς νόμους σε νέες ασυνήθιστες συνθήκες και καταστάσεις.

Αυτή η μελέτη εξυπηρετεί αρχικά, την απόκτηση πληροφοριών για την αύξηση του συνόλου της γνώσης. Επίσης βοηθά στη γνώση της ιστορίας των ηλιακών συστημάτων (πως δημιουργήθηκαν και πως εξελίχθηκαν με τη πάροδο του χρόνου). Η σημαντικότερη όμως συμβολή της πλανητικής Γεωλογίας στην επιστήμη είναι η κατανόηση της Γεωλογίας της Γης. Με την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών άλλων πλανητικών σωμάτων, όπως τα ηφαίστεια που βρέθηκαν στον Άρη, την Αφροδίτη και τους δορυφόρους του Δία ή την ατμόσφαιρα του Τιτάνα, οι γεωλόγοι είναι σε θέση να κατανοήσουν και να εξηγήσουν καλύτερα της ίδιες "συμπεριφορές" στη Γη.

Η πλανητική γεωλογία βασίζεται κυρίως στις τεχνικές πλανητικής τηλεπισκόπησης. Επιλέγονται συγκεκριμένες περιοχές μήκους κύματος για πλανητικές εφαρμογές. Ανάλογα με το αντικείμενο που παρατηρείται ή το σκοπό της μελέτης, πραγματοποιείται η επιλογή της περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι κατάλληλη. Για παράδειγμα, η ορυκτολογική σύσταση μπορεί να διερευνηθεί χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία από την ορατή έως την υπέρυθη, επειδή πολλά ορυκτά εμφανίζουν διαγνωστικά χαρακτηριστικά απορρόφησης και εκπομπής σε αυτά τα μήκη κύματος. Γεωμορφολογικές πληροφορίες μπορούν να προκύψουν από μία ευρεία ζώνη. Με την ορατή ζώνη παρατηρούμε πλανήτες με λεπτές έως μη υπάρχουσες ατμόσφαιρες. Ενώ για τους πλανήτες με ατμόσφαιρα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το πάχος της ατμόσφαιρας ως συνάρτηση του μήκους κύματος. σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ για την Αφροδίτη, οι γεωμορφολογικές μελέτες γίνονται με μικροκυμματική (ραντάρ) απεικόνιση.

Έργο του Eugene Shoemaker

Αξίζει σε αυτό το σημείο να γίνει αναφορά στον Eugene Shoemaker ο οποίος θεωρείτο ο πατέρας της πλανητικής Γεωλογίας. Ο Eugene Shoemaker γεννήθηκε στις 28 Απριλίου 1928 και πέθανε 18 Ιουλίου 1997.



Εικόνα 5. Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ο επιστήμονας Eugene Shoemaker (<https://astrogeology.usgs.gov>)

Αναφορικά έχει δηλώσει ότι θεωρεί τον εαυτό του ιστορικό επιστήμονα του οποίου η αποστολή του στη ζωή είναι να συνδέσει τα γεωλογικά με τα πλανητικά γεγονότα. Ο Eugene Shoemaker με μοναδικό τρόπο κατάφερε να δημιουργήσει τη πλανητική επιστήμη ως ξεχωριστή επιστήμη από την αστρονομία. Εφάρμοσε βασικές γεωλογικές αρχές στη χαρτογράφηση πλανητών, με αποτέλεσμα να έχει κάνει σημαντικές ανακαλύψεις σχετικά με τους πλανήτες και τους αστεροειδείς του Ηλιακού μας συστήματος για περισσότερες από τρεις δεκαετίες. Είχε βραβευτεί με το Εθνικό μετάλλιο επιστημών το 1992, όπου αποτέλεσε την υψηλότερη επιστημονική τιμή που δόθηκε από Πρόεδρο των Ηνωμένων Πολιτειών, Τζορτζ Μπους. Ο Δρ Gene Shoemaker πέθανε την Παρασκευή 18 Ιουλίου 1997 στην Alice Springs, της Αυστραλίας σε τροχαίο ατύχημα καθώς ταξίδευε με τη σύζυγό του για να κάνει γεωλογική μελέτη σε κρατήρες.

Ο Eugene Shoemaker ζούσε για πολλά χρόνια στο Flagstaff της Αριζόνα, όπου το 1961 ίδρυσε το τμήμα Αστροφυσιολογίας στο USGS (Geological Survey των Η.Π.Α) και το Field Centre στο Flagstaff το 1963. Αποσύρθηκε από το USGS το 1993 όπου είχε κρατήσει ομότιμη θέση. Το έργο βασίστηκε κυρίως στη δυναμική κομητών, αστεροειδών και τη πλανητική επιστήμη του Δία. Είχε αφιερώσει πολλά χρόνια στη εξερεύνηση αρχαίων περιοχών της Γης για την καταγραφή πτώσης μετεωριτών και κομητών, με αποτέλεσμα την ανακάλυψη πολλών νέων κρατήρων.

Ο Eugene Shoemaker δεν είχε ολοκληρώσει την τριτοβάθμια εκπαίδευση. Ωστόσο το πανεπιστήμιο Princeton τον οδήγησε στην εξερεύνηση πλανητών. Ξεκίνησε τη μελέτη για καταθέσεις ουρανίου στο Κολοράντο και τη Γιούτα ,αυτές οι μελέτες έδωσαν στοιχεία που συνδυάζονταν με δομές πρόσκρουσης στο Κολοράντο (κρατήρας Meteor).Έπειτα η ερευνά του συγκεντρώθηκε στους πυρήνες πρόσκρουσης μετεωριτών , στην μελέτη της Γης κυρίως στην Αυστραλία όσο και στους πλανήτες με τηλεανίχνευση και χαρτογράφηση.

Ήταν οραματιστής ,πίστευε ότι η Γεωλογία σαν επιστήμη θα επεκταθεί και στο διάστημα .Στην πρώιμη καριέρα ονειρευόταν ότι θα ήταν ο πρώτος γεωλόγος που θα χαρτογραφούσε τη Σελήνη. Κατά τη δεκαετία του 1960 ηγούταν σε ομάδες που μελετούσαν τη δομή και την ιστορία της Σελήνης και ανέπτυξαν μεθόδους γεωλογικής πλανητικής χαρτογράφησης από εικόνες τηλεσκοπίου της Σελήνης. Ένα πρόβλημα υγείας τον απέτρεψε να είναι ο πρώτος γεωλόγος αστροναύτης, αλλά βοήθησε προσωπικά να εκπαιδευτούν οι Αστροναύτες της αποστολής Apollo και κάθισε δίπλα στον Walter Cronkite στις νυχτερινές ειδήσεις δίνοντας γεωλογικά σχόλια κατά τη διάρκεια των περιπάτων στη Σελήνη.Ασχολήθηκε με τα προγράμματα Lunar Ranger και Surveyor, συνέχισε με τα επανδρωμένα προγράμματα Apollo και ολοκλήρωσε τις μελέτες του για το φεγγάρι το 1994 με νέα στοιχεία για τη Σελήνη από το Project Clementine, στο οποίο ήταν επικεφαλής της επιστημονικής ομάδας.

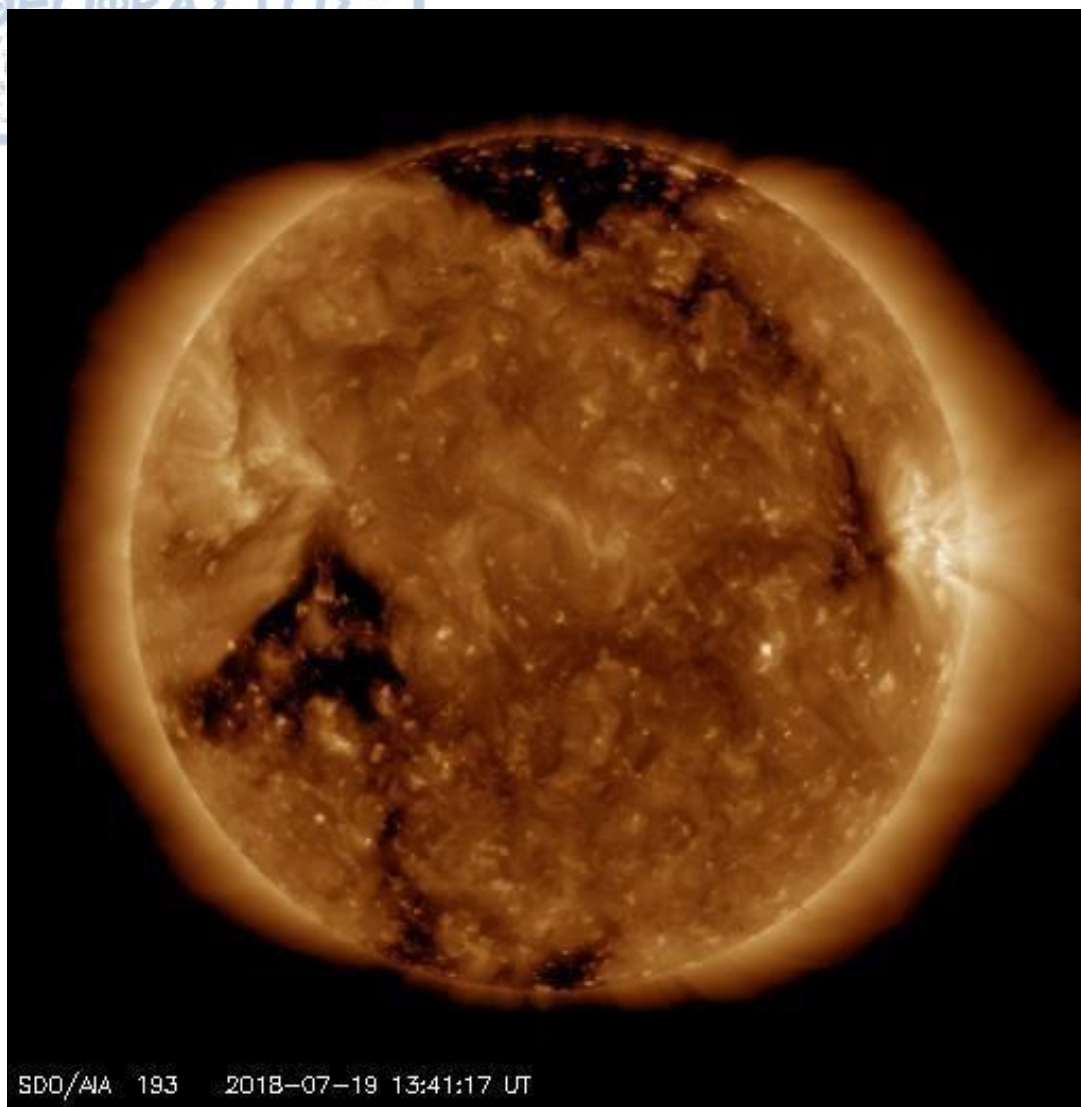
Ήταν παραλήπτης πολυάριθμων επιστημονικών βραβείων κυρίως σχετικών με τη Γεωλογία και την Αστρονομία.Ο Eugene Shoemaker έκανε σπουδαία αστρογεωλογική έρευνα για την USGS,ήταν διδάκτορας στο Ινστιτούτο τεχνολογίας (Caltech) και πρόεδρος στο τμήμα Γεωλογίας και πλανητικών επιστημών του Caltech.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα δεδομένα της πλανητικής Γεωλογίας αποκτώνται με πολλές και διαφορετικές τεχνικές. Αρχικά εκτελείται ο φυσικός προσδιορισμός δηλαδή υπολογίζεται η μάζα, ο όγκος, το σχήμα, πυκνότητα και συγκεκριμένων μορφολογικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων του ηλιακού μας συστήματος, πλέον και πέρα από αυτό. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται από θερμικά συστήματα ή ραντάρ, που δίνουν εικόνες από διαφορετικές γωνίες προβολής και φωτισμού. Επίσης από μετρήσεις ραντάρ ή λέιζερ καθορίζεται η τοπογραφία των πλανητικών επιφανειών. Τέλος με την αλλαγή τις συχνότητας του μήκους κύματος που παρατηρείται λόγω του φαινομένου Doppler^[1] από το διαστημικό σκάφος εν κινήση σε σχέση με το διαστημικό αντικείμενο. Μέσω αυτής της μεθόδου υπολογίζεται η μάζα και η πυκνότητα των πλανητών.

Έπειτα εκτελείται λεπτομερείς μορφολογική μελέτη των πλανητικών επιφανειών, η οποία μας δίνει ουσιαστικές γνώσεις για τους κύριους μηχανισμούς τροποποίησης της επιφάνειας επί του παρόντος ενεργές ή κάποια στιγμή στο παρελθόν. Το κύριο μέσο που χρησιμοποιείται για την απόκτηση αυτών των στοιχείων είναι οι φωτογραφίες υπερύψηλης ανάλυσης, ενδεχομένως συνοδευόμενη από στερεοσκοπική εικόνα. Για τις περισσότερες πλανητικές επιφάνειες χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη τεχνική, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. Αφροδίτη) χρησιμοποιούνται τεχνικές ραντάρ. Η κατανόηση των γεωλογικών διεργασιών που έχουν ενεργήσει ή ενεργούν σε μία πλανητική επιφάνεια χρησιμοποιείται με σκοπό τον προσδιορισμό των διάφορων γεωλογικών μονάδων. Οι γεωλογικές ιστορίες των πλανητικών επιφανειών απεικονίζονται συχνά σε γεωλογικούς χάρτες, που δημιουργούνται σε διάφορες κλίμακες ανάλογα με τις διαθέσιμες πληροφορίες.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η χρονολόγηση αυτών των επιφανειών. Οι ηλικίες προσδιορίζονται από τηλεσκοπικές εικόνες ή υπέρυθρων φωτογραφιών και με στρωματογραφίες σχέσεις μεταξύ διάφορων γεωλογικών μονάδων. Με τις παραπάνω μεθόδους προσδιορίζεται η απόλυτη ηλικία των πλανητικών επιφανειών. Με τη σύγκριση της πυκνότητας των σεληνιακών κρατήρων (όπου γνωρίζουμε την απόλυτη ηλικία από σεληνιακά δείγματα) σε σχέση με τους κρατήρες άλλων σωμάτων του ηλιακού συστήματος, επιτυγχάνεται η απόλυτη χρονολόγηση των πλανητικών επιφανειών και η σχετική διαφορά ηλικίας. Οι τεχνικές χρονολόγησης με την τηλεπισκόπηση βασίζονται στην απεικόνιση πλανητικών επιφανειών σε πολύ υψηλή ανάλυση, ώστε να είναι δυνατή η επαρκών στατιστικών στοιχείων για τους κρατήρες σε διάφορα μεγέθη. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η απόλυτη χρονολόγηση των επιφανειών μέσω των κρατήρων της Σελήνης είναι κάπως αυθαίρετη διότι δεν είναι απολύτως γνωστά στους επιστήμονες τα επακριβή στοιχεία για τους κρατήρες άλλων σωμάτων πέρα από τη Σελήνη.



Εικόνα 9. Η συγκεκριμένη φωτογραφία τραβήχτηκε από το Solar Terrestrial and Relations Observatory, τα οποία μελετούν τα φαινόμενα και τη επιφάνεια του Ήλιου. (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets>)

Στη πορεία προσδιορίζεται η ορυκτολογική και πετρολογική σύσταση των επιφανειακών πετρωμάτων. Ο προσδιορισμός της σύνθεσης μίας πλανητικής επιφάνειας δίνει στοιχεία για την προέλευση και την γεωλογική και γεωχημική της εξέλιξη. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν εξ αποστάσεως με πολλούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της φασματοσκοπικής ανάλυσης του ηλιακού φωτός που ανακλάται από την επιφάνεια σε μήκη κύματος ορατά και κοντά στα IR (περιοχή υπέρυθρου). Ακόμη μέσω της θερμικής εκπομπής που προέρχεται από την επιφάνεια των υπέρυθρων ή ακτινών X υψηλής ενέργειας και των ακτινών γ από την επιφάνεια και το υπέδαφος.



Εικόνα 10.Επειδή οι ακτίνες X απορροφούνται από την ατμόσφαιρα της Γης τα τηλεσκόπια που ανιχνεύουν ακτίνες X τοποθετούνται πιο πάνω από την προστατευτική ατμόσφαιρα του πλανήτη μας. Το supernova Cassiopeia A απεικονίστηκε από τρία μεγάλα παρατηρητήρια της NASA. Τα δεδομένα των υπέρυθρων ακτινών από το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer είναι χρωματισμένα με κόκκινο, τα οπτικά δεδομένα από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble είναι κίτρινα και τα δεδομένα ακτίνων X από το παρατηρητήριο ακτίνων X Chandra είναι πράσινα και μπλε. Τα δεδομένα των ακτίνων X δείχνουν θερμά αέρια σε περίπου 10 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου που δημιουργήθηκαν όταν το εκτοξευόμενο υλικό από το supernova έσπασε σε αέριο και σκόνη σε ταχύτητες περίπου δέκα εκατομμυρίων μιλίων ανά ώρα. Συγκρίνοντας τις εικόνες υπέρυθρων ακτίνων και ακτίνων X, οι αστρονόμοι μαθαίνουν περισσότερα για το πώς μπορούν να συνυπάρξουν σχετικά κρύα σωματίδια σκόνης μέσα στο υπερ-καυτό αέριο που παράγει ακτίνες X. (Credit: X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL-Caltech/Steward/O.Krause et al.)

Τέλος θα γίνει αναφορά στον προσδιορισμό των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, θερμοκρασίας, κυκλοφορίας και ατμοσφαιρικής σύνθεσης προσφέρει σημαντικά στοιχεία στην αξιολόγηση και στη περαιτέρω γνώση των πλανητικών σωμάτων. Παραδείγματα αποτελούν η ερμηνεία των θινών του Άρη χρησιμοποιώντας πληροφορίες σχετικά με τους πνέοντες ανέμους καθώς και η γνώση των ορυκτολογικών δεδομένων της επιφάνειας της Αφροδίτης από την παρουσία χημικά αντιδραστικών ενώσεων (πχ H_2SO_4) στην ατμόσφαιρα. Οι τεχνικές συλλογής αυτών των δεδομένων περιλαμβάνουν φωτογραφίες υπερύψηλης ανάλυσης και άμεση ανίχνευση και δειγματοληψία.

ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΗ

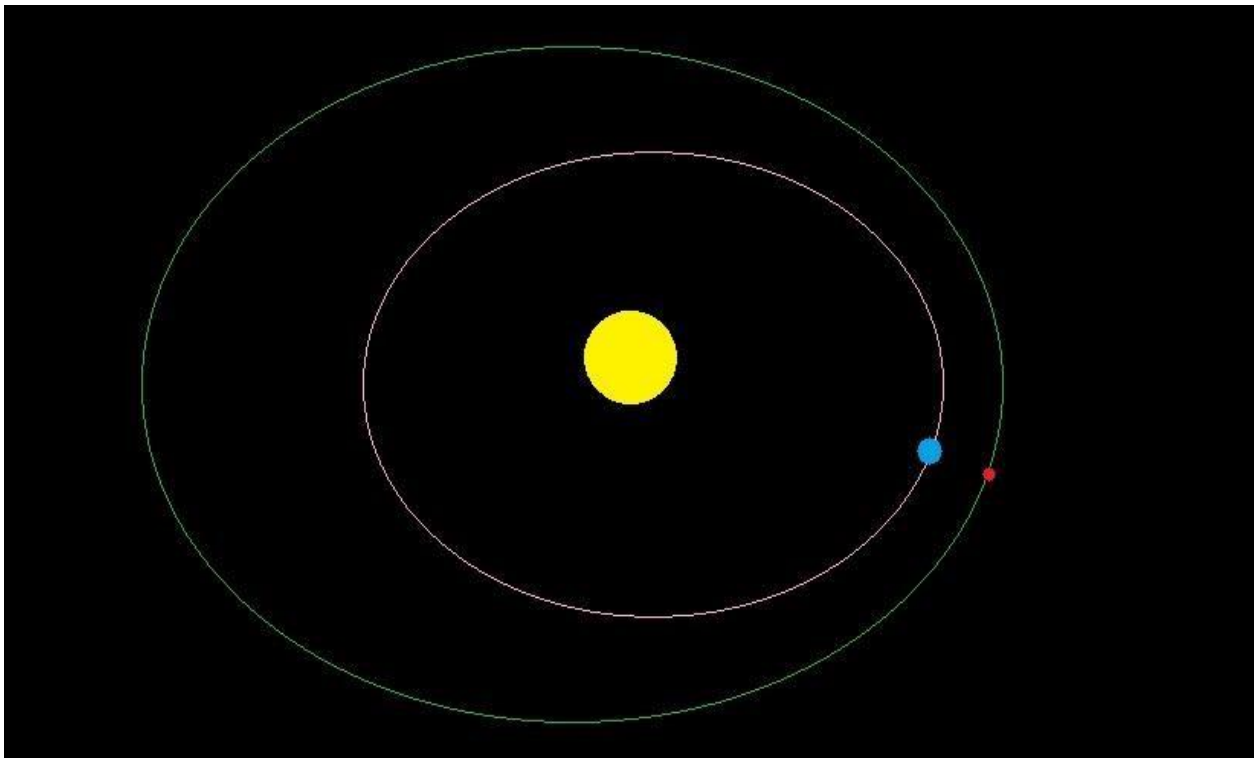
Ο Άρης είναι ο τέταρτος πλησιέστερος πλανήτης στον Ήλιο με μέση απόσταση 142,000,000 μίλια = 229,000,000 χλμ. = 1,52 AU_[2] .Πιο συγκεκριμένα :

Αφήλιο	249.209.300 χλμ. (1,665861 AU)
Περιήλιο	206.669.000 χλμ. (1,381497 AU)

Απέχει από την Γη κατά μέσο όρο 139,000,000 μίλια= 225,000,000 χλμ. = 1,50 AU , δηλαδή είναι ο αμέσως πλησιέστερος πλανήτης στη Γη μετά την Αφροδίτη.

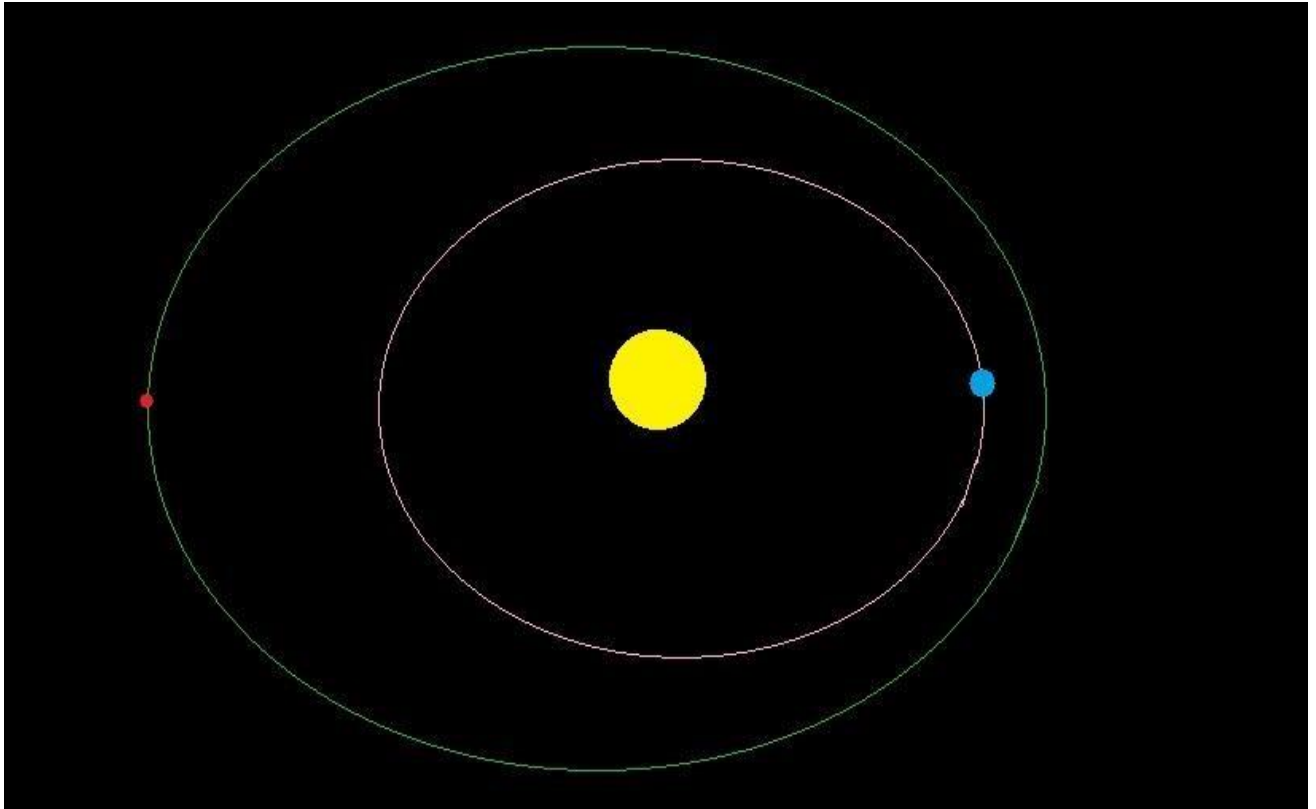
Στην πραγματικότητα η απόσταση του Άρη από την Γη δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνεται και μειώνεται ανάλογα με την θέση τους σε σχέση με τον Ήλιο. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά των δύο πλανητών και στη διαφορά των περιόδων περιφοράς όπου στη Γη είναι 365,256363004 ημέρες (1,000017421έτη) ενώ στον Άρη αντίστοιχα 686,971 ημέρες (1,8808 έτη).

Έτσι η πραγματική απόσταση των δύο πλανητών έχει ένα μέγιστο και ελάχιστο . Ελάχιστο έχουμε όταν και οι δύο πλανήτες βρίσκονται στην ίδια πλευρά του Ήλιου (Γη - αφήλιο και Άρης- Περιήλιο) και το σύστημα Άρης-Γη-Ήλιος είναι σχεδόν ευθύγραμμο . Τότε η απόστασή τους εκτιμάται περίπου 54,600,000 χλμ.



Εικόνα 11.Εικονική αναπαράσταση ελάχιστης απόστασης Άρη-Γη. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η Γη βρίσκεται στο αφήλιο και ο Άρης στο περιήλιο ενώ οι τροχιές του Άρη , της Γης και του Ήλιου είναι σχεδόν ευθύγραμμες, τότε έχουμε την ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους δύο πλανήτες. Το παραπάνω σχήμα αποτελεί μία θεωρητική αναπαράσταση και δεν αντιπροσωπεύει πραγματικά δεδομένα.

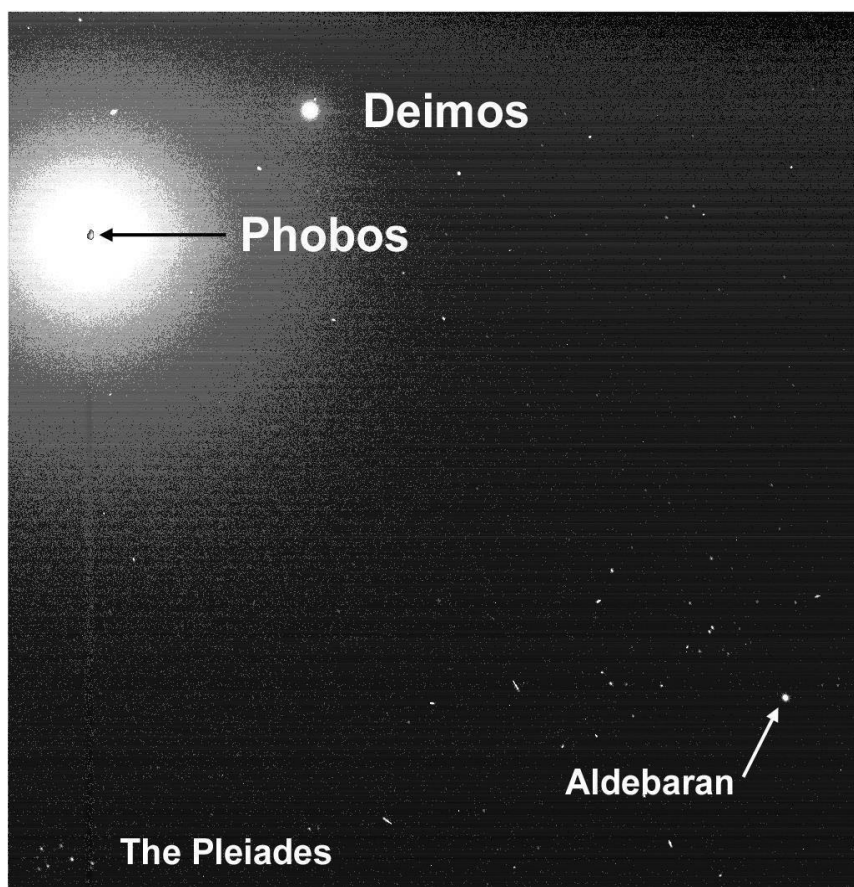
Μέγιστο έχουμε όταν οι δύο πλανήτες βρίσκονται αντίθετα μεταξύ τους σε σχέση με τον Ήλιο και το σύστημα Άρης-Ήλιος-Γη είναι σχεδόν ευθύγραμμο. Τότε η απόστασή τους εκτιμάται περίπου 400.000.000 χλμ.



Εικόνα 12. Εικονική αναπαράσταση μέγιστης απόστασης Γης-Άρη. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι όταν οι δύο πλανήτες βρίσκονται σε αντίθετες θέσεις σε σχέση με τον Ήλιο και οι τροχιές της Γης, του Άρη και του Ήλιου είναι σχεδόν ευθύγραμμες, τότε Γη και Άρης έχουν την μέγιστη απόσταση μεταξύ τους. Το παραπάνω σχήμα αποτελεί μία θεωρητική αναπαράσταση και δεν αντιπροσωπεύει πραγματικά δεδομένα.

Δορυφόροι πλανήτη

Γύρω από τον πλανήτη περιφέρονται οι δύο δορυφόροι του ο Φόβος και ο Δείμος, οι οποίοι πιθανόν να είναι αστεροειδής που εγκλωβίστηκαν σε τροχιά γύρω από τον Άρη λόγω της βαρυτικής του έλξης ή προέρχονται από μια βίαιη έκρηξη όπως και στην περίπτωση της Σελήνης ή κατά τη δημιουργία του πλανήτη από τα συντρίμια που απέμειναν. Ο μικρότερος Δείμος περιφέρεται γύρω από τον πλανήτη σε απόσταση 23.460 χλμ. και ολοκληρώνει μια πλήρη περιφορά γύρω από τον Άρη κάθε 1,2 ημέρες. Ο μεγαλύτερος Φόβος βρίσκεται πολύ πιο κοντά στον μητρικό πλανήτη σε απόσταση 9,337 χλμ. και ολοκληρώνει μία πλήρη περιφορά γύρω από τον Άρη κάθε 7 ώρες και 39 λεπτά. Η απόσταση Φόβου - Άρη είναι η μικρότερη απόσταση που έχει καταγραφεί ανάμεσα σε δορυφόρο και μητρικό πλανήτη στο ηλιακό μας σύστημα.



Εικόνα 13. Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ο Φόβος παρα πολύ κοντά στον Άρη και ο Δειμός πιο μακριά. Κάτω δεξιά διακρίνεται ο αστέρας α (Aldebarian) του αστερισμού του Ταύρου και κάτω αριστερά το γαξιακό σμήνος των Πλειάδων που ανήκει και αυτό στον αστερισμό του Ταύρου. (<https://mars.nasa.gov/all-about-mars>)

Ο κόκκινος πλανήτης καταλαμβάνει όγκο $1,6318 \cdot 10^{11}$ χλμ., η μάζα του υπολογίζεται $6,4185 \cdot 10^{23}$ χλγρ. και η μέση πυκνότητα $3,9335 \pm 0,0004$ γρμ./εκ. Η περιφέρεια στον ισημερινό του Άρη έχει υπολογιστεί 21.340 χλμ. και η επιφάνειά του έχει εμβαδόν 144.798.500 χλμ.²

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ο πλανήτης Άρης συγκαταλέγεται στους ναυτιλιακούς πλανήτες. Στην αστρονομική ναυτιλία χρησιμοποιείται όταν εντοπίζεται στον νυχτερινό έναστρο ουρανό για τη λύση προβλημάτων γεωγραφικού στίγματος.



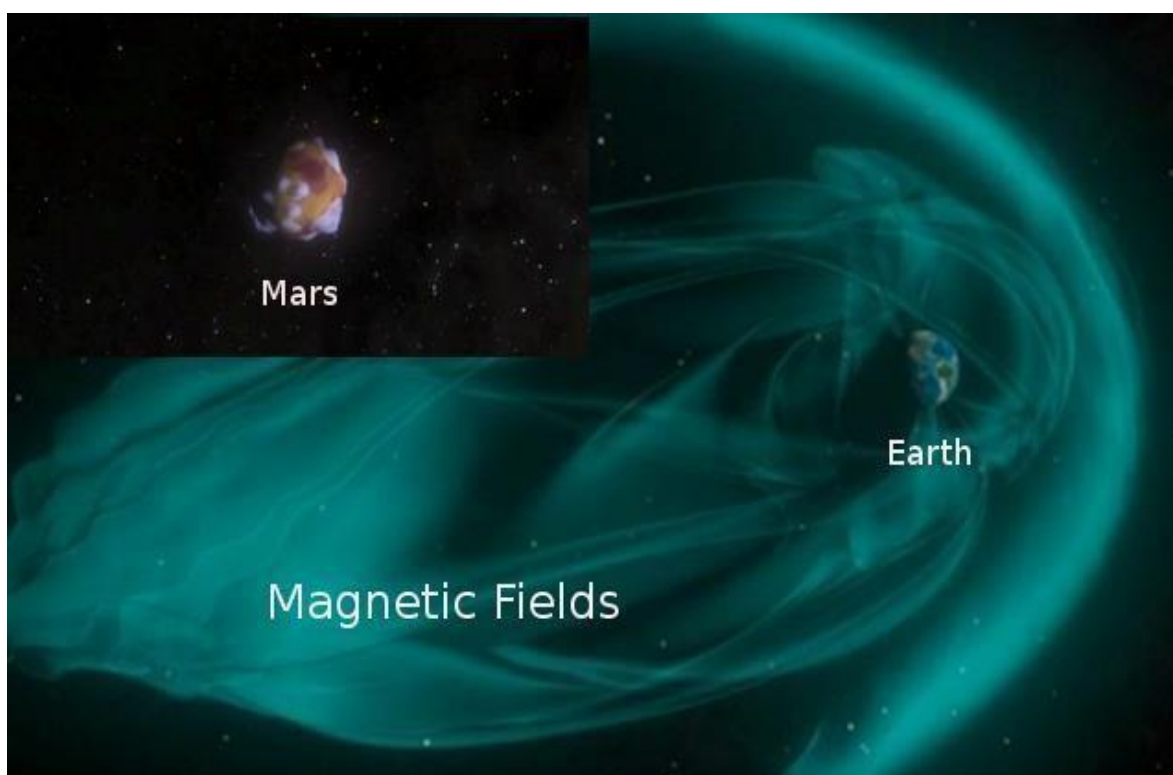
Εικόνα 14. Στη συγκεκριμένη εικόνα ο Άρης φαίνεται πολύ μεγαλύτερος από ότι συνήθως. Αυτό δεν συμβαίνει λόγω επεξεργασίας. Το Μάιο του 2016 ο κόκκινος πλανήτης έφτασε στην ελάχιστη απόσταση από τον πλανήτη Γη γι αυτό το λόγο εμφανίζεται τόσο μεγάλος. Η Επόμενη προσέγγιση του Άρη στη Γη συνέβη τέλη Ιουλίου 2018. Η μικρότερη απόσταση θα συμβεί μετά από 60.000 χρόνια. (<https://mars.nasa.gov/allaboutmars>)

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΑΡΗ

Η ιστορία του ξεκινάει από τη γέννηση του ηλιακού μας συστήματος. Πριν από περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια το ηλιακό μας σύστημα δημιουργήθηκε από ένα supernova. Η αστρική έκρηξη εξέπεμψε περιστρεφόμενη μάζα από μοριακά σωματίδια και αέρια. Το νεφέλωμα αυτό άρχισε να κρυνώνει, να συμπυκνώνεται και να διαχωρίζεται σε δακτυλίους από σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια ξεκίνησαν να συσσωρεύονται ή να συγκεντρώνονται για να δημιουργήσουν τους πλανήτες. Αυτή η διαδικασία δημιούργησε θερμότητα, με αποτέλεσμα τα βαρύτερα σωματίδια να βυθιστούν στα βαθύτερα αυτής της συσσωρευμένης μάζας.

Μαγνητικό πεδίο

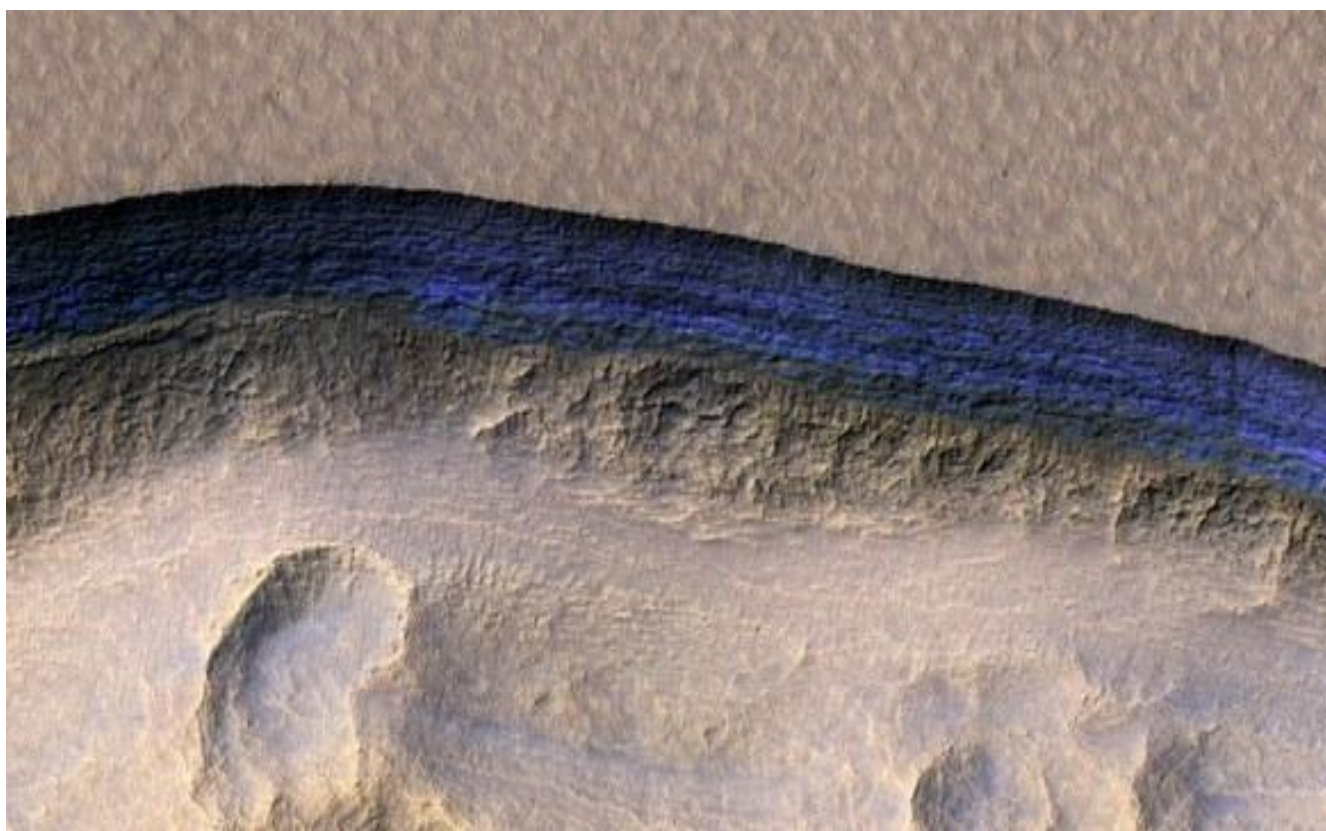
Έτσι στον Άρη τελικά δημιουργείται ένας λιωμένος πυρήνας σιδήρου. Αυτός ο αναταραγμένος λιωμένος πυρήνας δημιουργεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο περιβάλλει τον πλανήτη και λειτουργεί ως προστατευτική ασπίδα από τις επιβλαβείς ακτινοβολίες του Ήλιου. Αλλά τελικά ο Άρης έχασε το μαγνητικό του πεδίο και το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιράς του. Από τη στιγμή που η διαδικασία σχηματισμού ολοκληρώθηκε ο πλανήτης άρχισε να κρυνώνει. Ο πυρήνας σιδήρου, ο οποίος είναι παραπλήσιος της Γης, δεν ήταν σε θέση πια να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο και ο ηλιακός άνεμος άρχισε να χτυπάει την επιφάνεια του Άρη.



Εικόνα 15. Η παραπάνω φωτογραφία δείχνει το μαγνητικό πεδίο της Γης και το μαγνητικό πεδίο του Άρη το οποίο έχει εξασθενήσει. Ο πυρήνας του Άρη δεν είναι σε θέση πια να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο. (<http://www.knowledgeorb.com>)

Νερό του πλανήτη

Η απώλεια ατμόσφαιρας έχει ως αποτέλεσμα να χαθεί η πίεση και η θερμότητα στην επιφάνεια. Δεδομένου ότι το νερό χρειάζεται θερμότητα και πίεση για να παραμείνει σε υγρή μορφή, δεν είναι πλέον σταθερό στην επιφάνεια του Άρη. Ωστόσο στοιχεία έχουν δείξει ότι κάτω από τα πολικά καλύματα του Άρη (τα οποία αποτελούνται από ξηρό πάγο) όπως και υπόγεια στην επιφανείά του υπάρχουν μεγάλα αποθέματα παγωμένου νερού. Οι τηλεσκοπικές παρατηρήσεις των πόλων όπου δίνουν μετρήσεις για τη σύνθεση του εδάφους, έχουν ανιχνεύσει υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου (το μόριο του νερού αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου). Έτσι η πιθανότητα να υπάρχει νερό κάτω από τους πόλους του πλανήτη είναι πολύ μεγάλες. Τέλος αναφέρεται ότι υπάρχουν εικασίες χωρίς βέβαια τεκμηριωμένα στοιχεία, ότι στο παρελθόν στην επιφάνεια του Άρη υπήρχαν ωκεανοί.

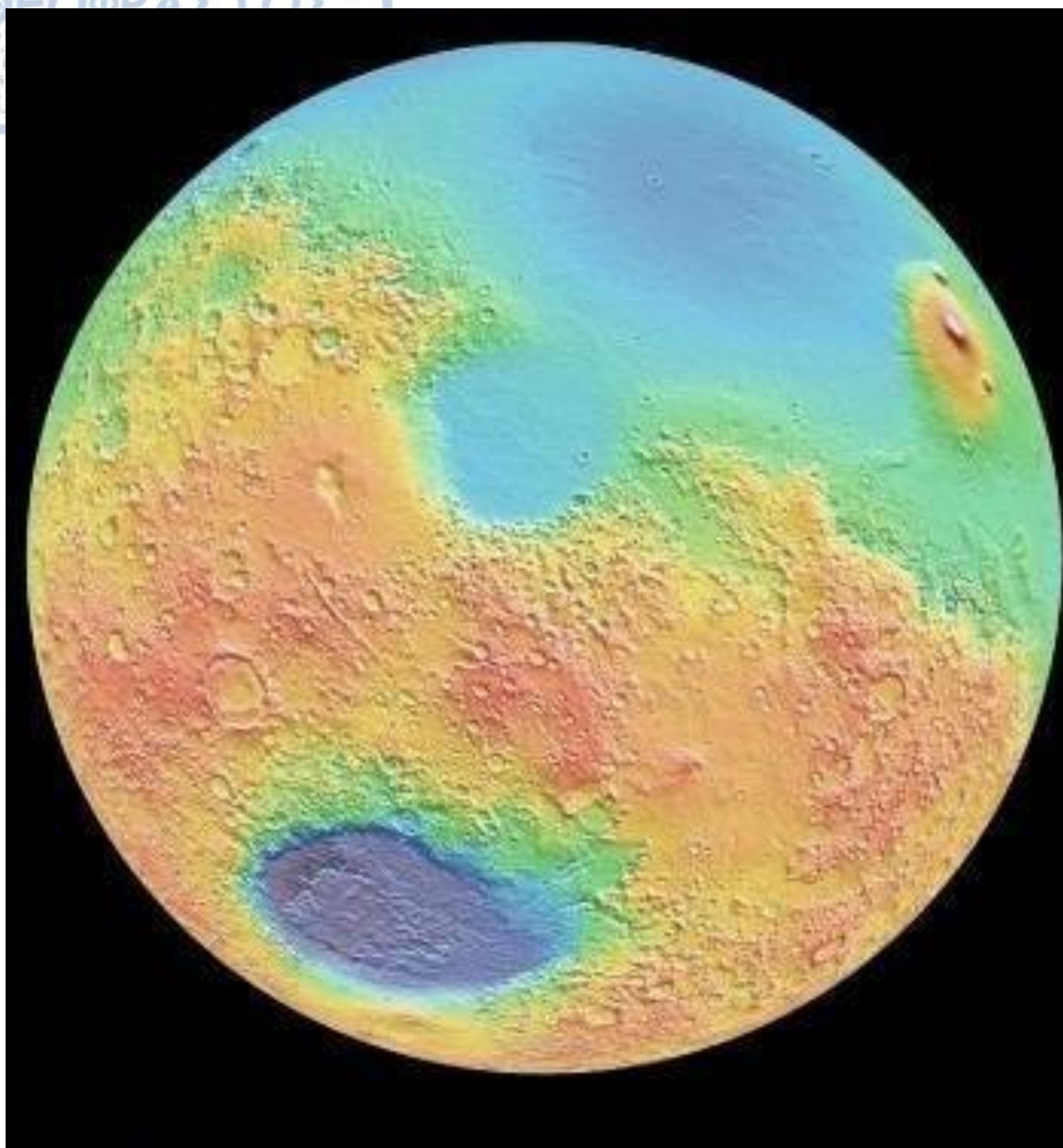


Εικόνα 16. Η παραπάνω εικόνα είναι επεξεργασμένη και έχει τραβηχτεί από το HIRISE της NASA. Στη παραπάνω εικόνα δείχνει ένα μέρος της επιφάνειας του Άρη όπου η διάβρωση έχει αποκαλύψει απότομες διατομές υπόγειου νερού. (NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA/USGS)

Διαφοροποίηση επιφάνειας

Το νότιο και το βόρειο ημισφαίριο του Άρη είναι εντυπωσιακά διαφορετικά μεταξύ τους στη φυσιογραφία και την τοπογραφία. Αυτή η διαφοροποίηση αποτελεί βασικό γεωλογικό χαρακτηριστικό του πλανήτη. Περίπου το 1/3 της επιφάνειας του πλανήτη κυρίως το βόρειο τμήμα του βρίσκεται 3-6 χιλιόμετρα ταπεινωμένο σε ύψος σε σχέση με το νότιο (περίπου τα υπόλοιπα 2/3 της επιφάνειας). Πρόκειται για διαφορά ύψους που παρατηρείται ανάμεσα σε ηπείρους και θαλάσσιες λεκάνες στη Γη. Η διαφοροποίηση αυτή εκφράζεται και με τη διαφορά ανάμεσα στα δύο ημισφαίρια στην συχνότητα-πυκνότητα των κρατήρων από προσκρούσης. Το νότιο ημισφαίριο είναι αρχαίο και έχει στην επιφάνειά του πολλούς κρατήρες πρόσκρουσης. Χαρακτηρίζεται από τραχιές επιφάνειες που χρονολογούνται από την περίοδο όπου η επιφάνεια του πλανήτη βομβαρδιζόταν από μετεωρίτες. Αντίθετα το βόρειο ημισφαίριο η επιφάνεια είναι ομαλή και επίπεδη και έχει μόνο λίγους μεγάλους κρατήρες. Χαρακτηριστικά στην επιφάνεια δείχνουν ότι οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι στο νότιο ημισφαίριο συνδέονται με αναδόμηση της επιφάνειας του βόρειου ημισφαιρίου. Τέλος παρατηρείται διαφορά στο πάχος του φλοιού ανάμεσα στα δύο ημισφαίρια. Τα δεδομένα τοπογραφικών και γεωφυσικών μελετών δείχνουν ότι το πάχος του φλοιού στις νότιες περιοχές έχει μέγιστο πάχος 58 χιλιόμετρα. Αντίθετα στο βόρειο ημισφαίριο το πάχος του φλοιού φτάνει τα 32 χιλιόμετρα. Η θέση του ορίου ανάμεσα στα δύο ημισφαίρια ποικίλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και εξαρτάται από το ποια από τα τρία χαρακτηριστικά εξετάζεται.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η χρονολόγηση αυτών των επιφανειών. Οι ηλικίες προσδιορίζονται από τηλεσκοπικές εικόνες ή υπέρυθρων φωτογραφιών και με στρωματογραφίες σχέσεις μεταξύ διάφορων γεωλογικών μονάδων. Με τις παραπάνω μεθόδους προσδιορίζεται η απόλυτη ηλικία των πλανητικών επιφανειών. Με τη σύγκριση της πυκνότητας των σεληνιακών κρατήρων (όπου γνωρίζουμε την απόλυτη ηλικία από σεληνιακά δείγματα) σε σχέση με τους κρατήρες άλλων σωμάτων του ηλιακού συστήματος, επιτυγχάνεται η απόλυτη χρονολόγηση των πλανητικών επιφανειών και η σχετική διαφορά ηλικίας. Οι τεχνικές χρονολόγησης με την τηλεπισκόπηση βασίζονται στην απεικόνιση πλανητικών επιφανειών σε πολύ υψηλή ανάλυση, ώστε να είναι δυνατή η επαρκών στατιστικών στοιχείων για τους κρατήρες σε διάφορα μεγέθη. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η απόλυτη χρονολόγηση των επιφανειών μέσω των κρατήρων της Σελήνης είναι κάπως αυθαίρετη διότι δεν είναι απολύτως γνωστά στους επιστήμονες τα επακριβή στοιχεία για τους κρατήρες άλλων σωμάτων πέρα από τη Σελήνη.



Εικόνα 17. Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε τη διαφοροποίηση των δύο ημισφαιρίων. Το βόρειο ημισφαίριο είναι το χαμηλό (γαλάζιο) και ομαλό, ενώ το νότιο είναι υψηλό (κόκκινο) και πιο ορεινό. (www.nasa.gov)

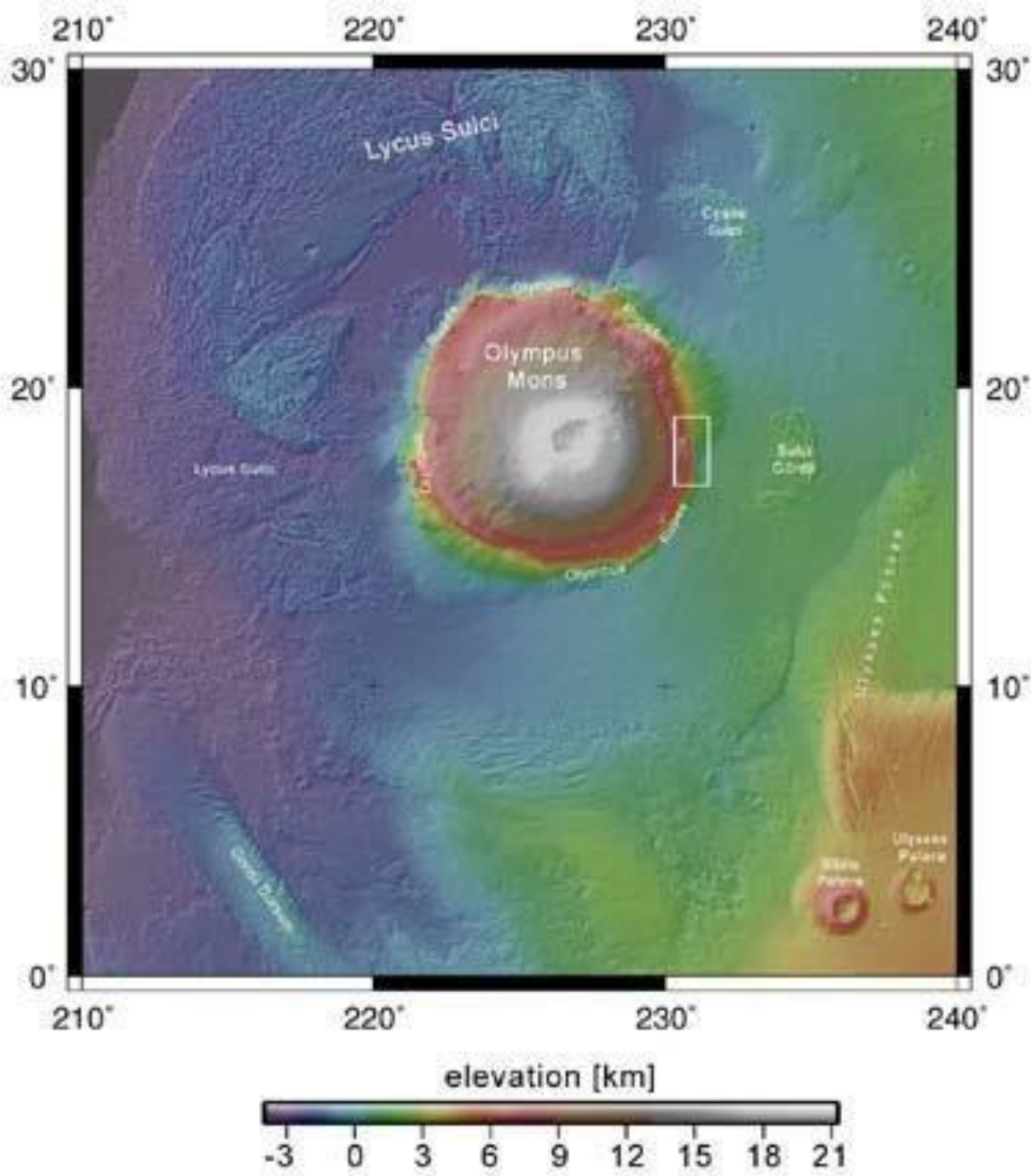
Ηφαιστειότητα

Οι ηφαιστειακές δομές καλύπτουν μεγάλη έκταση του πλανήτη. Τα πιο εμφανή ηφαίστεια του πλανήτη βρίσκονται στα πεδία Thrasis και Elysium. Οι γεωλόγοι πιστεύουν ότι ένας από τους λόγους που τα ηφαίστεια είναι τόσο μεγάλα σε σχέση με την Γη είναι επειδή ο Άρης έχει λιγότερες τεκτονικές πλάκες σε σχέση με τη Γη. Η λάβα από ένα μαγματικό θάλαμο μπορούσε να συσσωρευτεί σε μία θέση για πολλά εκατομμύρια χρόνια.

Οι επιστήμονες δεν έχουν καταγράψει ποτέ ηφαιστειακή έκρηξη στον πλανήτη και γενικά οι μελέτες δεν έχουν δώσει δεδομένα για ενεργό ηφαιστειότητα. Τον Οκτώμβριο του 2012 το Curiosity πραγματοποίησε την πρώτη ανάλυση περίθλασης ακτίνων Χ στην επιφάνεια του πλανήτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ύπαρξη διάφορων ορυκτών, συμπεριλαμβανομένων των αδρανών πυροξένων και ολιβίνη. Προτάθηκε ότι η δομή του εδάφους είναι παρόμοια με παλιά βασαλτικά εδάφη παρόμοια της Χαβάης. Τον Ιούλιο του 2015, το Curiosity προσδιόρισε τον τριδύμητη (μέλος της ομάδας του Χαλαζία) σε ένα δείγμα πετρώματος από τον κρατήρα Gale, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το ηφαιστειακό πυρίτιο διαδραμάτισε πολύ σημαντικό ρόλο στη ηφαιστειακή ιστορία του πλανήτη.

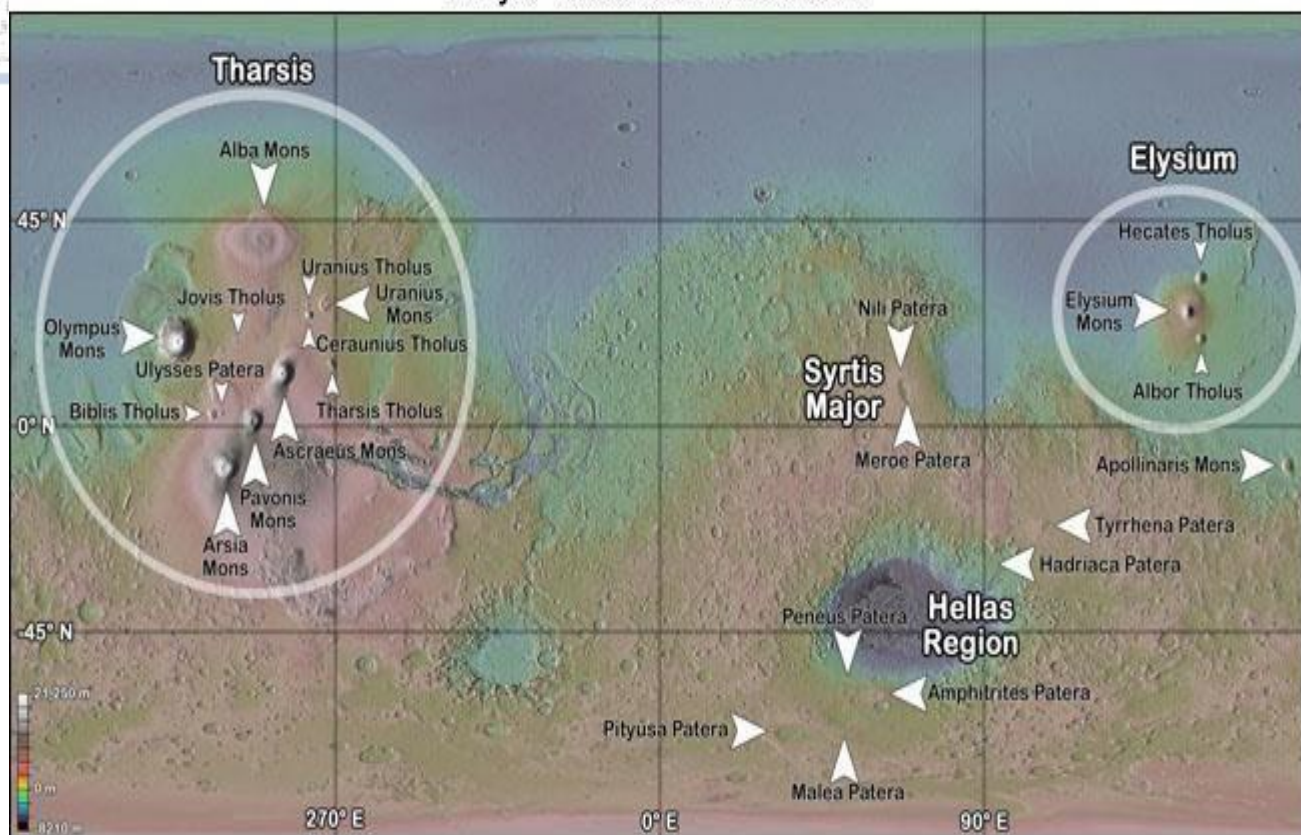
Στα όρια αυτής της διαφοροποίησης του πλανήτη στα δύο στην περιοχή του δυτικού ημισφαιρίου, αποτελούν μία τεράστια ηφαιστειακή τεκτονική επαρχία γνωστή ως Thrasis. Αυτή η τεράστια ανυψωμένη δομή έχει διάμετρο χιλιάδων χιλιομέτρων και καλύπτει έως το 25% της επιφάνειας του πλανήτη. Με μέση τιμή 7-10 χιλιόμετρα πάνω από "το αρειανό επίπεδο της θάλασσας" το πεδίο Thrasis περιέχει τις υψομετρικά υψηλότερες περιοχές του πλανήτη και τα μεγαλύτερα γνωστά ηφαίστεια στο ηλιακό μας σύστημα. Τα τρία τεράστια ηφαίστεια Ascraeus , Pavonis και Arsia διατάσσονται ευθύγραμμα ΒΑ-ΝΔ. Το ηφαίστειο Alba καταλαμβάνει το βόρειο τμήμα της περιοχής. Το τεράστιο ασπιδόμορφο ηφαίστειο Olympus (25.000m. περίπου) βρίσκεται στο δυτικό άκρο της επαρχίας.

Ένα μικρότερο ηφαιστειακό κέντρο βρίσκεται αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα δυτικά της περιοχής Thrasis, το Elysium. Η ηφαιστειακή επαρχία Elysium αποτελείται από τρία κύρια ηφαίστεια το Elysium, το Hecates και το Albor. Η ομάδα των ηφαιστίων του πεδίου Thrasis είναι κάπως διαφορετική από αυτή του Elysium καθώς η δράση του πρώτου περιελάμβανε τόσο λάβες όσο και πυροκλαστικό υλικό.



Εικόνα 18.Ο τοπογραφικός χάρτης δείχνει τη γενική κατάσταση του ηφαιστείου Olympus mons. Το ηφάιστειο Olympus mons αποτελεί το μεγαλύτερο γνωστό ηφαίστειο στο ηλιακό μας σύστημα(25.000m. περίπου).(Πηγή; ESA / DLR / FU Berlin (G. Neukum). <http://www.dlr.de/mars-express>)

Major Volcanoes on Mars



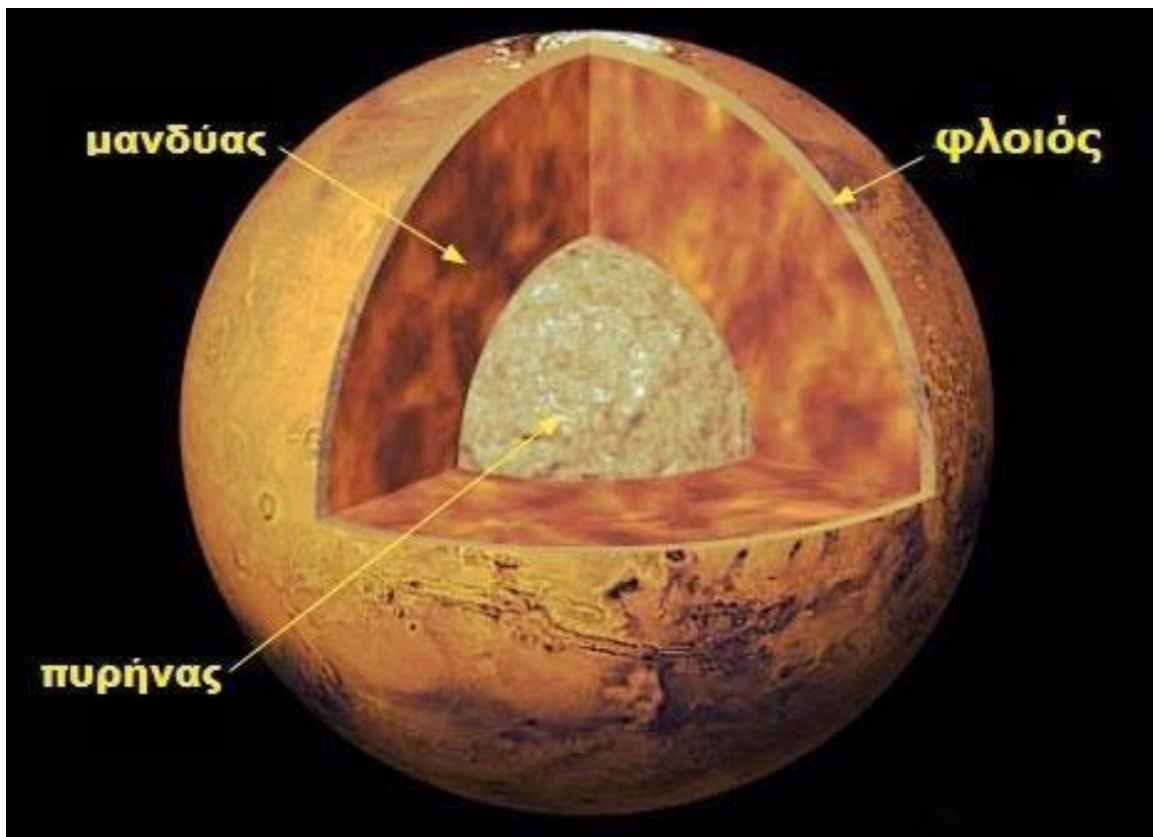
(From Robbins et al., 2011, *Icarus*, v. 211, p. 1179-1203.)

Εικόνα 19. Αυτή η εικόνα δείχνει 24 ηφαίστεια στην περιοχή του Άρη. Χωρίζονται στις περιοχές Tharsis και Elysium κυρίως (λευκοί κύκλοι). Δύο ακόμα ηφαίστεια σχηματίζουν το συγκρότημα Syrtis Major, έξι είναι κοντά στη λεκάνη της Ελλάδας και ένα, Apollinaris Mons, βρίσκεται νοτιοανατολικά του Elysium. Τα λευκά βέλη δείχνουν τα εν λόγω ηφαίστεια (Από Robbins et.al 2011 *Icarus* ; v.211 , p.1779-1203

<http://www.psrcd.hawaii.edu>)

ΔΟΜΗ

Το εσωτερικό του Άρη μπορεί να συναχθεί από τα ανώτερα προς τα κατώτερα, σε ένα χαμηλής πυκνότητας φλοιό με ακτίνα 25-70 χλμ. Κάτω από το φλοιό, υπάρχει πυριτικός μανδύας με ακτίνα μεταξύ 1300-1800 χλμ. Στο κέντρο είναι πιθανόν να υπάρχει ένας πλούσιος σε σίδηρο μεταλλικός πυρήνας, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από 1500-2000 χλμ. ακτίνα. Οι επιστήμονες δεν έχουν αποφανθεί ακόμη εάν ο πυρήνας είναι στερεός ή υγρός ή χωρίζεται σε δύο υποστρώματα όπως στη Γη.



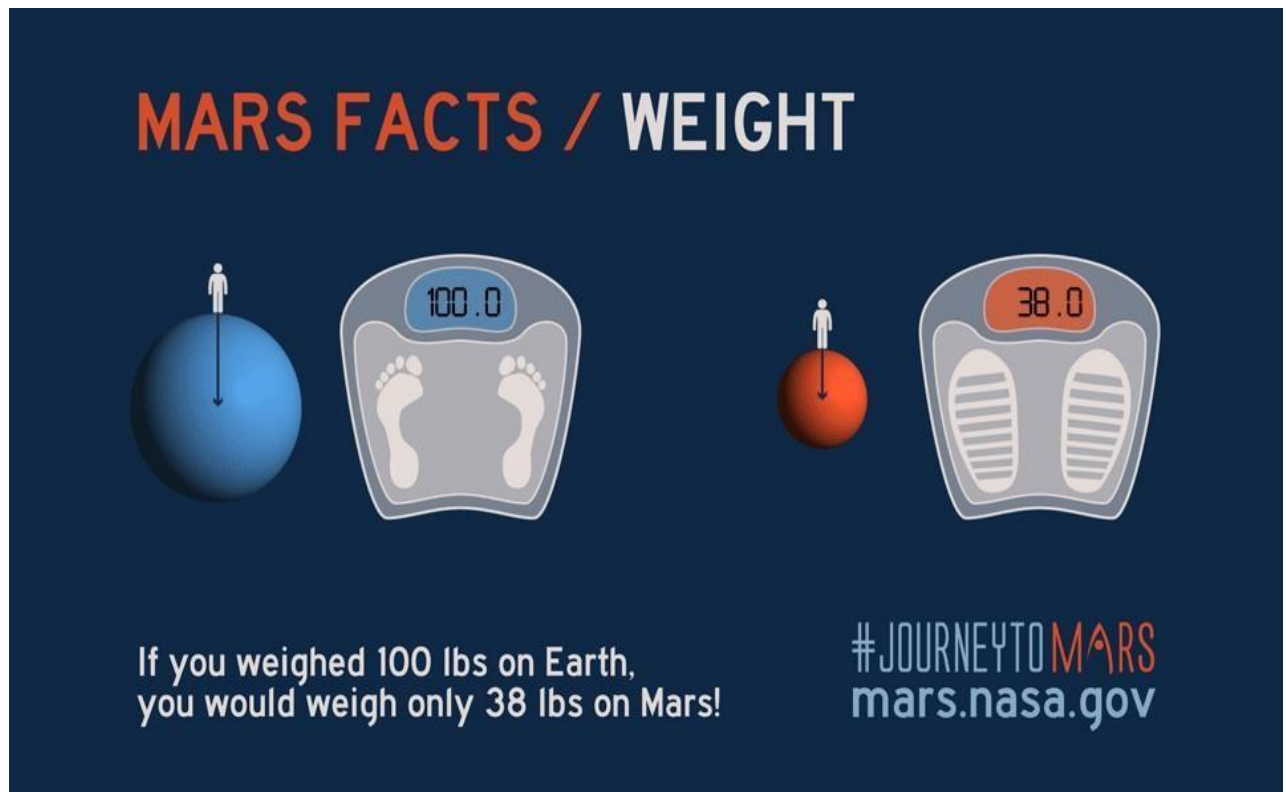
Εικόνα 20 . Στην παραπάνω εικόνα διακρίνεται η εσωτερική δομή του Άρη. Συγκεκριμένα ο πυρήνας, ο μανδύας και ο φλοιός του. Η παραπάνω εικόνα έχει υποστεί επεξεργασία. (www.lukew.com/marsgeo/introduction7)

Η βαρύτητα επιφάνειας στον Άρη έχει υπολογιστεί 3,711 μ./δευτ² ή 0,376 g. Ο πλανήτης περιστρέφεται με μία ταχύτητα της τάξης των 868,22 χλμ./ώρα, (241,17 μ./δευτ.) και ταχύτητα διαφυγής 5,027 χλμ./δευτ.

Στη Γη η βαρύτητα επιφάνειας είναι 9,780327 μ./δευτ² ή 0,99732 g. Ο πλανήτης μας περιστρέφεται με ταχύτητα 1.674,4 χλμ./ώρα (465,1 μ./δευτ.) και ταχύτητα διαφυγής 11,186 χλμ./δευτ.

Συγκρίνοντας τα στοιχεία και από τους δύο πλανήτες συμπεραίνεται ότι ο Άρης έχει μικρότερη ταχύτητα διαφυγής από τη Γη και μικρότερη βαρύτητα (τα συγκεκριμένα στοιχεία που αναφέρονται εξαρτώνται από το μικρότερο μέγεθος του Άρη σε σχέση με τη Γη).

Η ατμοσφαιρική πίεση είναι κατά μέσο όρο 600 pascal (6,0 mbar), δηλαδή το 0,6 της Γης στη στάθμη της θάλασσας. Κυμαίνεται από ένα χαμηλό των 30 pascal στην κορυφή του Olympus και πάνω από 1115 pascal στα βάθη της Hellas Planitia. Αυτή η πίεση είναι πολύ πιο κάτω από το όριο Amstrong^[3] για το απροστάτευτο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 21 . Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη μικρότερη βαρύτητα του Άρη σε σχέση με τη Γη η οποία υπολογίζεται περίπου στο 38% της Γης. (<https://mars.nasa.gov/allaboutmars/>)

Ο Άρης διέθετε μαγνητόσφαιρα την οποία έχασε πάρα πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα ο ηλιακός άνεμος να αλληλεπιδρά με την ιονόσφαιρά του και να διώχνει άτομα από αυτήν. Έτσι με την πάροδο του χρόνου ο ηλιακός άνεμος, που ανεμπόδιστα έπεφτε πάνω στην ατμόσφαιρα του Άρη, σταδιακά την εξασθένησε.

Η ατμόσφαιρα του κόκκινου πλανήτη αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα. Η ατμόσφαιρα του Άρη αποτελείται από 96% διοξείδιο του άνθρακα, 1,9% αργό, 1.9% άζωτο και ίχνη ελεύθερου οξυγόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, νερού και μεθανίου, μεταξύ άλλων αερίων. Στην ατμόσφαιρα αιωρούνται αρκετά σωματίδια σκόνης, δίνοντας στον πλανήτη ανοικτό καφέ ή κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα όταν την βλέπουμε από την επιφάνεια.

Σε γενικές γραμμές η δομή της ατμόσφαιρας του πλανήτη παρουσιάζει ομοιότητες με την γήινη. Συγκεκριμένα αποτελείται αρχικά από την εξώσφαιρα η οποία ξεκινά στα 200 χλμ περίπου. Αυτή είναι η περιοχή όπου υπάρχουν οι τελευταίες δέσμες της ατμόσφαιρας κάτω από το κενό του διαστήματος. Δεν υπάρχει συγκεκριμένο όριο όπου σταματά η ατμόσφαιρα, απλώς απλώνεται στο κενό. Πιο κάτω υπάρχει η άνω ατμόσφαιρα ή θερμόσφαιρα όπου λόγω της θέρμανσης από τον Ήλιο παρατηρούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τα αέρια της ατμόσφαιρας αρχίζουν να διαχωρίζονται μεταξύ τους το ένα από το άλλο. Έπειτα υπάρχει η μεσαία ατμόσφαιρα όπου εκεί παρατηρείται ροή της ατμόσφαιρας. Παρακάτω έρχεται η χαμηλή ατμόσφαιρα, η οποία αποτελεί μία θερμή περιοχή που επηρεάζεται από τη σκόνη και το έδαφος. Τέλος υπάρχει μία περίπλοκη ιονόσφαιρα και μία στιβάδα όζοντος πάνω από το νότιο πόλο.

Η ατμόσφαιρα του Άρη θεωρείται ότι έχει μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της ιστορίας του. Κάποια στοιχεία υποδεικνύουν μεγάλους ωκεανούς πριν από μερικά δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτή η υπόθεση βασίζεται στο γεγονός ότι η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του Άρη δεν επιτρέπει το υγρό νερό να υπάρχει στα χαμηλά υψόμετρα, ενώ στα υψηλότερα υπάρχει μόνο με την μορφή στερεού ή υγρού. Οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες στην επιφάνεια είναι περίπου -63°C, σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που χρειάζεται για την διατήρηση υγρού νερού. Ωστόσο στην αρχή την ιστορίας του ο Άρης ίσως να είχε πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διατήρηση υγρού νερού στην επιφάνειά του.

Στις 16 Δεκεμβρίου 2014 η NASA ανέφερε την ανίχνευση μίας ασυνήθιστης αύξησης του μεθανίου και στη συνέχεια μείωσης στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Οργανικά στοιχεία έχουν βρεθεί από τη σκόνη ενός βράχου που έχει διατρυθεί. Με βάση τις μελέτες που έχουν γίνει με τη μέθοδο αναλογίας δευτερίου προς υδρογόνο, βρέθηκε ότι ένα μεγάλο μέρος του νερού του κρατήρα χάθηκε κατά το παρελθόν πριν καν δημιουργηθεί ο πυθμένας. Στη συνέχεια μεγάλες ποσότητες νερού συνέχισαν να χάνονται. Στις 18 Μαρτίου 2015, η NASA ανέφερε ότι παρατηρήθηκε το φαινόμενο του Σέλας που δεν είναι πλήρως κατανοητό. Στις 4 Απριλίου 2015 μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με την αναλογία ισοτόπων ξένο προς αργό, συμπεράναν μεγάλη απώλεια της ατμόσφαιρας νωρίς κατά τη γεωλογική ιστορία του Άρη.



Εικόνα 22. Αυτή η καλλιτεχνική εικόνα δείχνει το πρώιμο περιβάλλον του Άρη (δεξιά), που πιστεύεται ότι περιέχει υγρό νερό και μια παχιά ατμόσφαιρα σε σχέση με το κρύο, ξηρό περιβάλλον που επικρατεί σήμερα στον Άρη (αριστερά). Το Mars Atmosphere της NASA και το Volatile Evolution βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον κόκκινο πλανήτη για να μελετήσει την ανώτερη ατμόσφαιρα, τη ιονόσφαιρα και τις αλληλεπιδράσεις με τον ήλιο και τον ηλιακό άνεμο. (<https://www.nasa.gov>)



Εικόνα 23. Στις 19 Μαΐου 2005, το Spirit της NASA τράβηξε αυτή τη φωτογραφία καθώς ο Ήλιος βυθίζεται κάτω από το χείλος του κρατήρα Gusev στον Άρη. Αυτή η φωτογραφία λήφθηκε γύρω στις 6:07 το βράδυ της 489ης ημέρας Άρη. Εικόνες ηλιοβασιλέματος και λυκόφωτος λαμβάνονται από τους επιστήμονες για να καθορίσουν πόσο ψηλά στην ατμόσφαιρα επεκτείνεται η σκόνη του Άρη και να αναζητήσουν σκόνη ή σύννεφα πάγου. Άλλες εικόνες έδειξαν ότι η λάμψη του λυκόφωτος παραμένει ορατή, αλλά όλο και πιο αχνή, έως και δύο ώρες πριν την ανατολή ή μετά το ηλιοβασίλεμα. Το μακρύ λυκόφως του Άρη (σε σύγκριση με τη Γη) προκαλείται από το φως του ήλιου που είναι διάσπαρτο στη πλευρά του πλανήτη που δεν φωτίζεται από τον Ήλιο από την άφθονη σκόνη σε μεγάλα υψόμετρα. Παρόμοια μεγάλα λυκόφωτα ή πολύχρωμες ανατολές και ηλιοβασιλέματα εμφανίζονται μερικές φορές στη Γη όταν μικροσκοπική σκόνη από έκρηξη ισχυρών ηφαιστείων διασκορπίζουν το φως ψηλά στην ατμόσφαιρα. (<https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery>)

Κλίμα

Η λεπτή ατμόσφαιρα του Άρη και η μεγαλύτερη απόσταση του από τον Ήλιο σε σχέση με τη Γη τον καθιστά πολύ ψυχρότερο από τον δικό μας πλανήτη. Η μέση θερμοκρασία είναι περίπου -60°C , αν και μπορεί να κυμαίνεται από -125°C κοντά στους πόλους κατά τη διάρκεια του χειμώνα έως 20°C στον ισημερινό.

Η ατμόσφαιρα του Άρη είναι περίπου 100 φορές λεπτότερη από αυτή της Γης αλλά αρκετά παχιά για να μπορούν να δημιουργηθούν στον πλανήτη καιρικά φαινόμενα, σύννεφα και άνεμοι. Επίσης υπάρχει έντονη ακτινοβολία στην επιφανεία του.

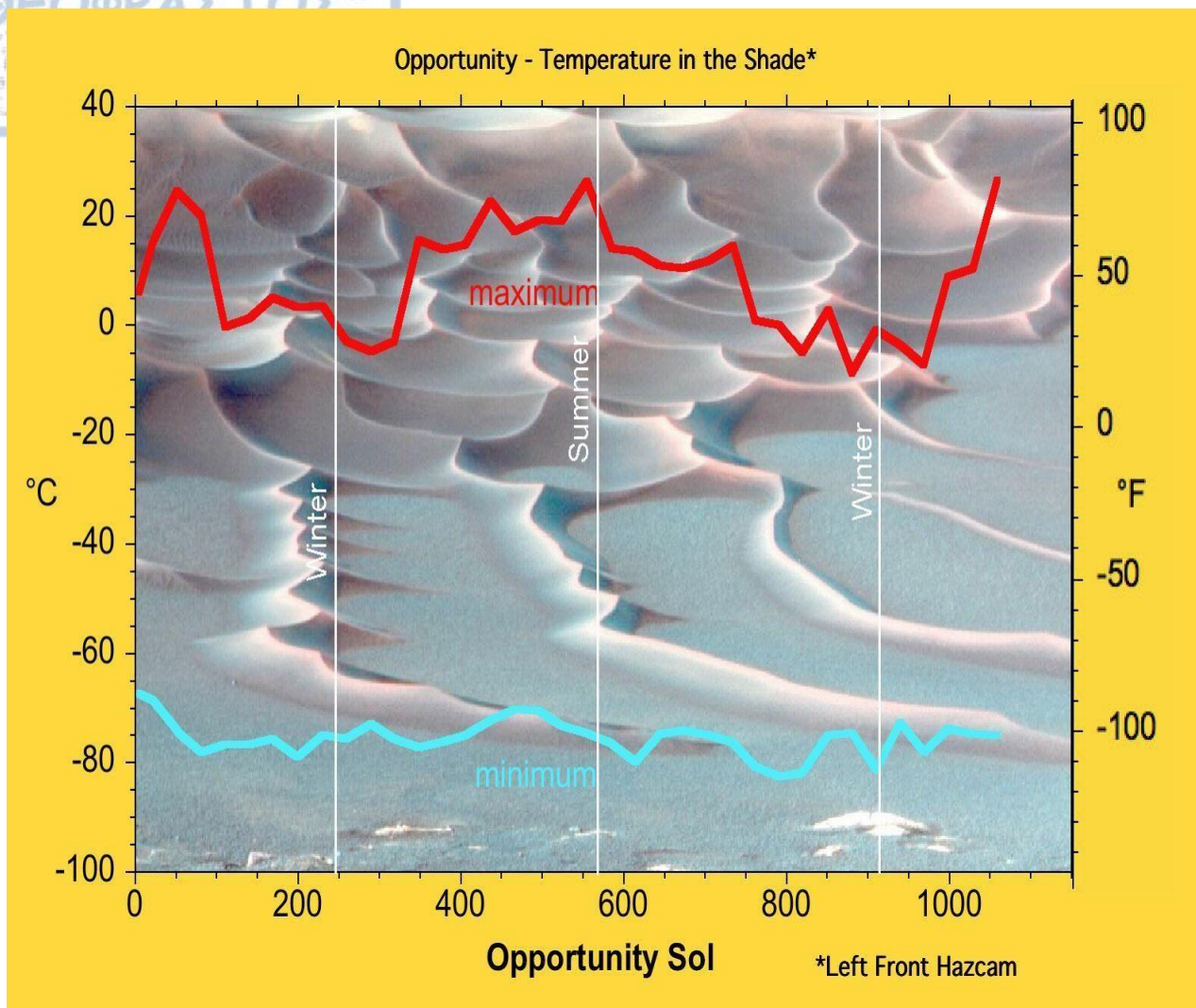
Γιγάντιες ανεμοθύελλες σηκώνουν μεγάλες ποσότητες σκόνης οξειδομένου σιδήρου που καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του πλανήτη. Η σκόνη αποτελεί μόνιμο κομμάτι της ατμόσφαιρας του πλανήτη, με μεγαλύτερες ποσότητες στα βόρεια το Φθινόπωρο και το Χειμώνα και μικρότερες κατά την Άνοιξη και Καλοκαίρι. Οι θύελλες στον Άρη είναι οι μεγαλύτερες γνωστές στο ηλιακό μας σύστημα, ικανές να καλύψουν ολόκληρο τον πλανήτη και να διαρκέσουν για μήνες. Τέτοιες θύελλες λαμβάνουν χώρα σηνήθως το Καλοκαίρι και την Άνοιξη.

Μία θεωρία που απαντά στο γιατί οι θύελλες στον Άρη είναι τόσο μεγάλες ξεκινά με τα σωματίδια σκόνης που απορροφούν το ηλιακό φως, θερμαίνοντας την ατμόσφαιρα στην περιοχή όπου βρίσκονται. Οι θερμές μάζες αέρα ρέουν προς ψυχρότερες περιοχές, δημιουργώντας ανέμους. Οι ισχυροί αυτοί άνεμοι ανυψώνουν κι άλλο σκόνη από το έδαφος, η οποία με τη σειρά της θερμαίνει την ατμόσφαιρα αυξάνοντας τους ανέμους και εκσφαιδονίζοντας περισσότερο σκόνη. Μελέτη του 2015 υποστηρίζει ότι η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής του Άρη, η οποία επηρεάζεται από τους άλλους πλανήτες, παράγει τέραστιες καταιγίδες σκόνης όταν η ταχύτητα περιστροφής του είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου των εποχών των καταιγίδων σκόνης.

Έχουν παρατηρηθεί και χιονοπτώσεις στον Άρη. Οι νιφάδες χιονιού αποτελούνται από διοξείδιο του άνθρακα και όχι από νερό. Θεωρούνται πολύ μικρά σωματίδια που δημιουργούν φαινόμενα ομίχλης και όχι σαν πτώση χιονιού. Οι βόρειες και νότιες πολικές περιοχές του Άρη καλύπτονται από πάγο, ένα μεγάλο μέρος του οποίου προέρχεται από διοξείδιο του άνθρακα και όχι από νερό.

Οι επιστήμονες από τη NASA πιστεύουν ότι οι εποχιακές αλλαγές στον πλανήτη οφείλονται στην απόξυση και πτώση των καλυμμάτων πάγου.

Στη σκόνη που κυκλοφορεί στην ατμόσφαιρα και σε υδρατμούς που υπάρχουν ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και την επιφάνεια (το μεγαλύτερο μέρος αυτών των υδρατμών προέρχεται από το βόρειο πόλο όπου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού εξατμίζεται ο πάγος που αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα.



Εικόνα 24. Η παραπάνω εικόνα δείχνει τις θερμοκρασίες υπό σκιά που μετρήθηκαν από το ρομπότ Opportunity και κυμαίνονται από 30 °C το καλοκαίρι έως -80°C το χειμώνα. Στο φόντο εμφανίζονται ψευδώς έγχρωμες αμμοθίνες. (NASA / JPL-Caltech / Cornell / NMMNH)

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι θερμοκρασίες στις πολικές περιοχές είναι αρκετές χαμηλές έτσι ώστε το διοξείδιο του άνθρακα να συμπυκνώνεται και να συσσωρεύεται σε αυτές τις περιοχές, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και της άνοιξης εξατμίζεται και επιστρέφει πάλι στην ατμόσφαιρα. Στο βόρειο ημισφαίριο ο πάγος διοξειδίου του άνθρακα λιώνει τελείως το καλοκαίρι, αποκαλύπτοντας ένα πάρα πολύ παλαιό παγωμένο στρώμα νερού. Στο νότιο ημισφαίριο την ίδια περίοδο ένα πολύ μικρό τμήμα πάγου CO₂ διατηρείται.

Από το 2017 αρκετές αποστολές παρακολουθούν μακροπρόθεσμες αλλαγές στον Άρη, όπως το Exomars και Mars Express (ESA), MAVEN, Mars Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter, οι αποστολές που μελετούν την επιφάνεια Opportunity και Curiosity (NASA) και η αποστολή Mangalyaan (Οργανισμός Ινδικού χώρου Έρευνας).

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΑΡΗ

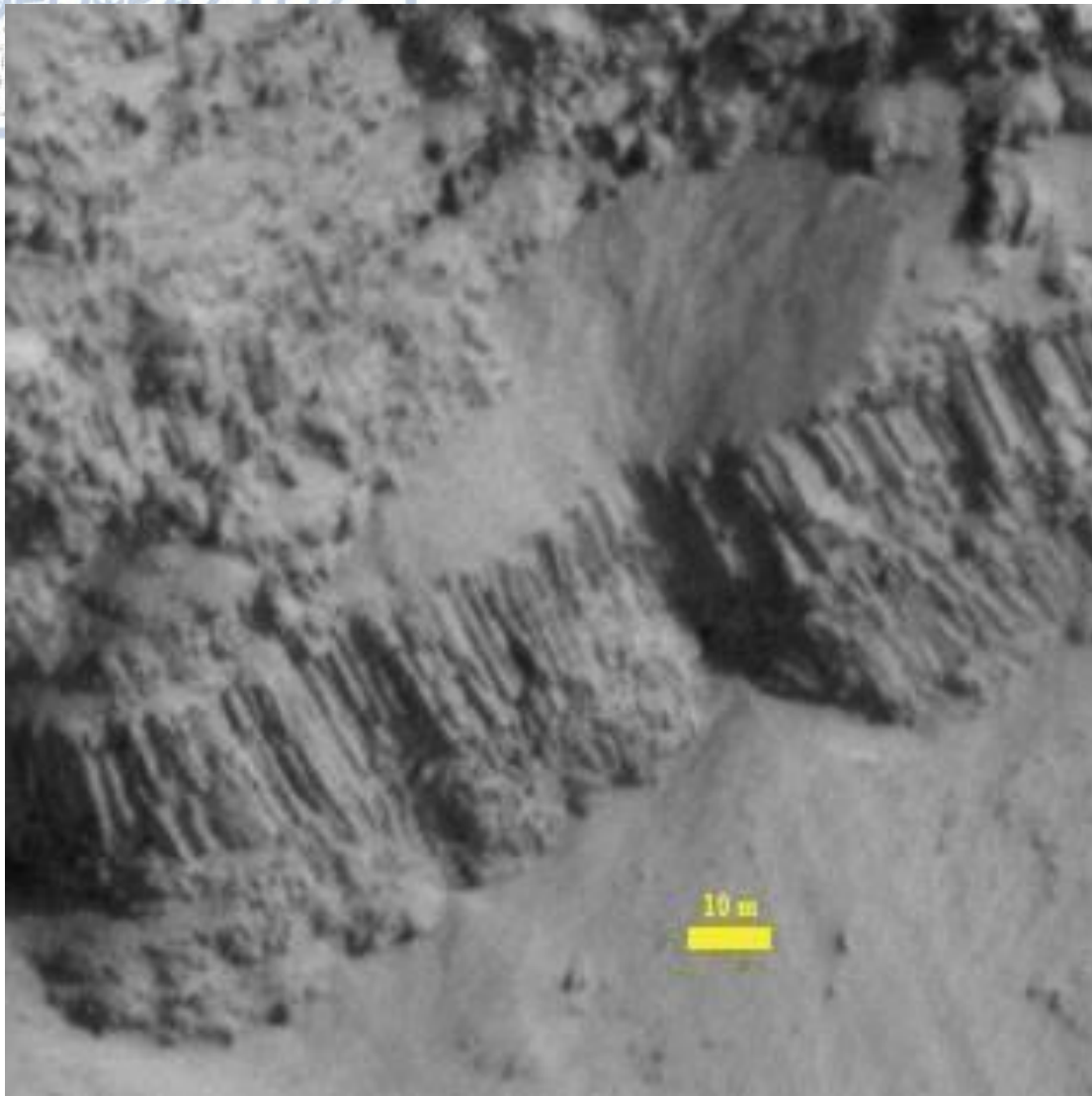
Ο Άρης είναι ένας πλανήτης ο οποίος έχει έναν κεντρικό πυρήνα που αποτελείται από σίδηρο και νικέλιο, ο οποίος περιβάλλεται από ένα πυριτικό μανδύα και πιο πάνω από το φλοιό. Το ξεχωριστό κόκκινο χρώμα του οφείλεται στην οξείδωση του σιδήρου στην επιφάνεια του.

Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία έχουν συλλεχθεί από διαστημικά σκάφη. Αυτά τα διαστημικά σκάφη φέρουν φασματόμετρα και άλλα όργανα για να μετρήσουν την επιφάνεια της σύνθεσης του Άρη, είτε με τηλεπισκόπηση από τροχιά, είτε με *in situ* αναλύσεις στην επιφάνεια. Έχουν βρεθεί επίσης πολλά δείγματα του Άρη με τη μορφή μετεωριτών που έχουν φτάσει στη Γη. Οι μετεωρίτες του Άρη παρέχουν στοιχεία για τη χημική σύνθεση του φλοιού και του εσωτερικού του.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι τα πιο άφθονα χημικά στοιχεία στο φλοιό του Άρη, εκτός από πυρίτιο και οξυγόνο, είναι ο σίδηρος, το μαγνήσιο, το αργίλιο, το ασβέστιο και το κάλιο. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν τα κύρια συστατικά των ορυκτών που

αποτελούνται τα πυριγενή πετρώματα. Τα στοιχεία τιτάνιο, χρώμιο, μαγγάνιο, θείο, φώσφορο, νάτριο και χλώριο είναι λιγότερο άφθονα αλλά εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικά συστατικά πολλών ορυκτών σε πετρώματα. Το υδρογόνο υπάρχει ως πάγος νερού (H₂O) και σε ενυδατωμένα μέταλλα. Ο άνθρακας εμφανίζεται ως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα και μερικές φορές ως ξηρός πάγος στους πόλους. Μια άγνωστη ποσότητα άνθρακα αποθηκεύεται επίσης σε ανθρακικά άλατα. Το μοριακό άζωτο (N₂) αποτελεί το 2,7% της ατμόσφαιρας. Από όσο είναι γνωστό, οι οργανικές ενώσεις απουσιάζουν, εκτός από ένα ίχνος μεθανίου που ανιχνεύεται στην ατμόσφαιρα.

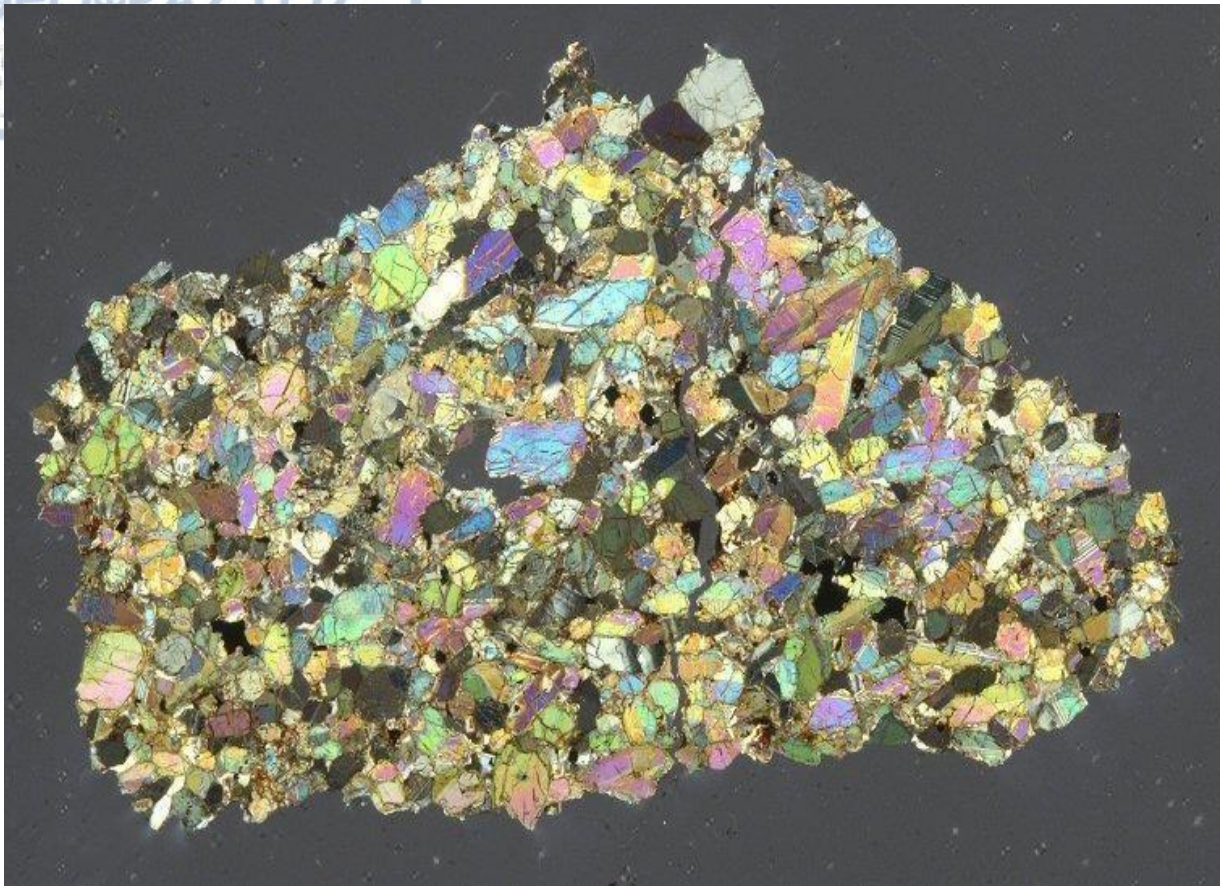
Η επιφάνεια του Άρη αποτελείται κυρίως από πυριγενή πετρώματα. Τα πετρώματα στην επιφάνεια και το φλοιό κρυσταλλώνονται από το μάγμα. Οι περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση των πετρωμάτων του Άρη προέρχονται από φασματοσκοπικά δεδομένα από τα διαστημόπλοια, τις *in situ* αναλύσεις πετρωμάτων και εδαφών από έξι περιοχές προσεδάφησης και τη μελέτη των μετεωριτών του Άρη (εικόνα). Τα φασματόμετρα που βρίσκονται σήμερα σε τροχιά περιλαμβάνουν το THEMIS (Mars Odyssey), το OMEGA (Mars Express) και το CRISM (Mars Reconnaissance Orbiter). Οι δύο συσκευές εξερεύνησης του Άρη φέρουν από ένα φασματόμετρο ακτίνων X των σωματιδίων άλφα (APXS), ένα φασματόμετρο θερμικής εκπομπής (Mini-TES) και ένα φασματόμετρο Mössbauer για τον εντοπισμό ορυκτών στην επιφάνεια. Στις 17 Οκτωβρίου 2012, το Curiosity πραγματοποίησε την πρώτη ανάλυση περίθλασης ακτίνων X του εδάφους του Άρη. Τα αποτελέσματα από τον αναλυτή CheMin του rover έδειξαν την ύπαρξη αρκετών ορυκτών, συμπεριλαμβανομένων των αδρανών, των πυροξένων και του ολιβίνη και έδειξαν ότι το αρειανό δείγμα ήταν παρόμοιο με τα «παλιά βασαλτικά εδάφη» των ηφαιστειών της Χαβάης.



Εικόνα 25. Η παραπάνω εικόνα τραβήχτηκε σε έναν κρατήρα κοντά στη Marte Vallis, στην οποία διακρίνονται εμφανέστατα οι στιλοειδείς ηφαιστειακές κατατμήσεις. (<https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/mars-honeycomb.html>)

Οι σκουρόχρωμες περιοχές στον Άρη χαρακτηρίζονται από πετρώματα που περιέχουν ολιβίνη, πυρόξενο και πλαγιόκλαστο. Αυτά τα τρία ορυκτά είναι τα κύρια συστατικά του βασάλτη. Το ορυκτό ολιβίνης εμφανίζεται σε όλο τον πλανήτη, αλλά κυρίως στο Nilli Fossae, μία περιοχή με πετρώματα ηλικίας Noachian^[8]. Μία ακόμη περιοχή πλούσια σε ολιβίνη είναι στο Ganges Chasma. Ο ολιβίνης καταβυθίζεται πολύ γρήγορα με την παρουσία νερού. Ως εκ τούτου, οι μεγάλες συγκεντρώσεις του δείχνουν ότι το υγρό νερό στον πλανήτη δεν ήταν άφθονο από τη στιγμή που σχηματίστηκαν τα πετρώματα.

Ο πυρόξενος είναι επίσης διαδεδομένος στην επιφάνεια. Τόσο ο χαμηλής σε περιεκτικότητα (όρθο-) όσο και ο υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (κλίνο-). Οι κλινοπυρόξενοι συνδέονται με τις νεότερες ηφαιστειακές ασπίδες, ενώ οι ορθοπυρόξενοι (πιο συνηθισμένοι) με παλαιότερα όροι.

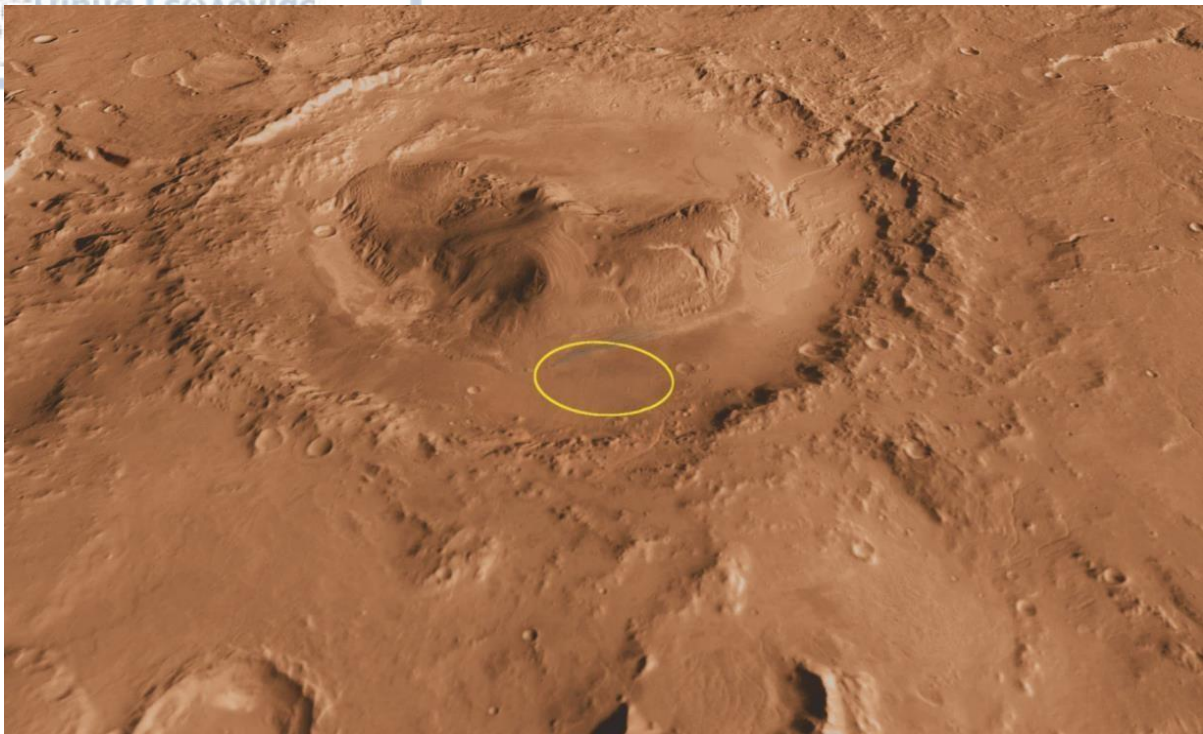


Εικόνα 26. Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα κομμάτι του μετεωρίτη NWA 998, ο οποίος προέρχεται από τον Άρη. Στο δείγμα διακρίνονται ολιβίνης, ορθοπυρόξενος και τιτανιούχος μαγνητίτης. (<https://www2.jpl.nasa.gov> πνευματικά δικαιώματα Adam και Greg Hupe.)

Μεγάλο μέρος της επιφάνειας του Άρη καλύπτεται από σκόνη τόσο λεπτόκοκκη όπως η πούδρα. Αυτό είναι το κύριο αίτιο που καθιστά αδύνατη την φασματοσκοπική ταυτοποίηση πρωτογενών ορυκτών σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Τα εδάφη αποτελούνται από λεπτά θραύσματα βασαλτικών θραυσμάτων και είναι εξαιρετικά εμπλουτισμένα σε θείο και χλώριο, προερχόμενα πιθανώς από εκπομπές ηφαιστειακών αερίων. Το ερυθρό χρώμα του πλανήτη οφείλεται στο οξείδιο του σιδήρου και το ορυκτό γκαιτίτη. Το Mars Exploration Rover προσδιόρισε και μαγνητίτη που πιθανόν περιέχει και τιτάνιο. Αυτό το ορυκτό θεωρείται από τους επιστήμονες υπεύθυνο για τη δημιουργία μαγνητικής σκόνης.

Επίσης, στον Άρη υπάρχουν ορυκτά που σχηματίστηκαν από υδροθερμική αλλοίωση βασικών βασαλτικών ορυκτών. Αυτά τα δευτερογενή ορυκτά είναι ο αιματίτης, φυλλοπυριτικά ορυκτά (ορυκτά της Αργίλου), ο γκαιτίτης, ο γιαροσίτης, διοξείδιο του πυριτίου και γύψο. Πολλά από αυτά τα ορυκτά απαιτούν νερό για να σχηματιστούν.

Οι ιζηματογενείς σχηματισμοί είναι ευρέως διαδεδομένες στον πλανήτη. Παχιές ιζηματογενείς στρώσεις παρατηρούνται στο εσωτερικό πολλών φαραγγιών όπως το Valles Marineris, σε μεγάλους κρατήρες όπως στο Meridiani Planum. Οι δελταικές αποθέσεις εμφανίζονται στον κρατήρα Ederswalde και αλλού όπως και πολύ κρατήρες στα νότια περιέχουν λιμναία ιζήματα. Ωστόσο ελάχιστα στοιχεία για μεγάλες συγκεντρώσεις ανθρακικών αλάτων στην επιφάνεια έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα.



Εικόνα 27. Αυτή η φωτογραφία τραβήχτηκε από το Mars Rover Curiosity της NASA το 2012 στον κρατήρα Gale. Δείχνει μία ιζηματογενή δομή που ονομάζεται διασταυρούμενη στρώση η οποία δείχνει την κατεύθυνση του ανέμου ή της ροής του νερού που αλλάζει με τη πάροδο του χρόνου. (<https://www.nasa.gov/>)



Εικόνα 28. Αυτή η δορυφορική εικόνα τραβήχτηκε από το Reconnaissance Orbiter της NASA τον Ιούλιο του 2015. Δείχνει έναν αμμόλοφο που κινείται και έχει δημιουργηθεί από πίεση λόγω βάρους και εναλλαγές στη θερμοκρασία.

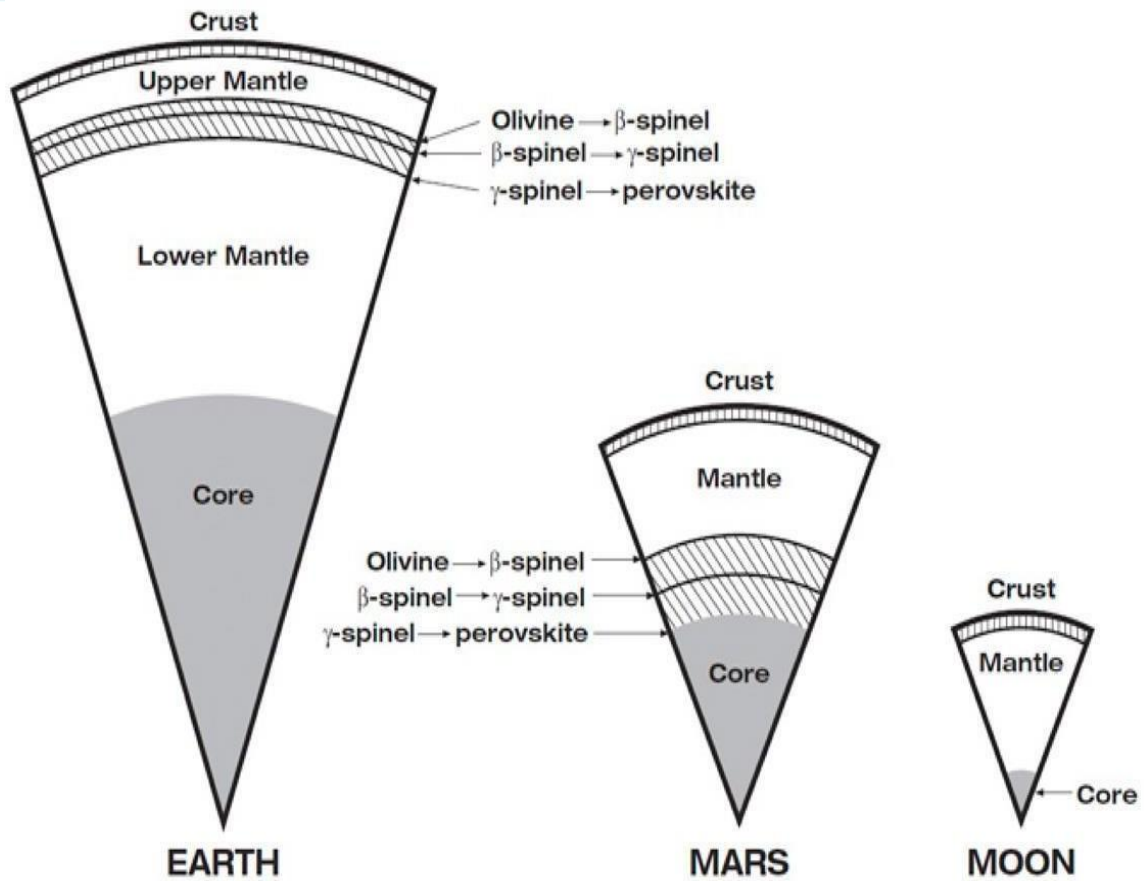
Ο πλανήτης Άρης έχει διαμορφωθεί κατά ένα πάρα πολύ μεγάλο βαθμό από τεκτονικές διεργασίες όπως συμβαίνει και στη Γη, αλλά με εντελώς διαφορετικούς μηχανισμούς. Κατά τη γεωλογική ιστορία του Άρη, ο πλανήτης ήταν ιδιαίτερα ενεργός τεκτονικά.

Στην επιφάνεια του πλανήτη εμφανίζονται δύο φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας. Το πρώτο είναι ότι το βόρειο ημισφαίριο του πλανήτη είναι πολύ χαμηλότερο από το νότιο και είναι νεότερο, υποδεικνύοντας ότι το πάχος του φλοιού κάτω από την επιφάνεια είναι διττό. Αυτό το χαρακτηριστικό αναφέρεται ως "ημισφαιρική διχοτόμηση". Το δεύτερο είναι η άνοδος του πεδίου Tharsis, μία τεράστια ηφαιστειακή επαρχία που είχε τεκτονικές επιρροές τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα στο παρελθόν του Άρη. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα η επιφάνεια του Άρη χωρίζεται σε τρεις μεγάλες φυσιογραφικές επαρχίες καθεμία με διαφορετικά γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά: το βόρειο ημισφαίριο (βόρειες πεδιάδες), το νότιο ημισφαίριο (νότια υψίπεδα) και το οροπέδιο Tharsis. Οι υποθέσεις που προτείνονται για την δημιουργία αυτών επαρχιών στηρίζονται κυρίως στις ενδογενείς δυνάμεις του πλανήτη και σε εξωγενείς (όπως είναι η πτώση κάποιου μετεωρίτη).

Σεισμικότητα

Η αποστολή στον Άρη για την πραγματοποίηση σεισμικών ερευνών θα ξεκινήσει το 2018, όπου θα γίνει λεπτομερείς γεωφυσική έρευνα του Άρη επί τόπου. Η σεισμική έρευνα στοχεύει στην ανίχνευση σεισμικών συμβάντων, όπου με τη σειρά τους θα δώσουν στοιχεία για το μέγεθος του πυρήνα, το πάχος του φλοιού και του μανδύα και τη σύνθεσή τους.

Δεν υπάρχουν διαπιστωμένα σεισμολογικά δεδομένα για τον πλανήτη Άρη ακόμη. Από την αποστολή Viking στον Άρη δεν έχουμε επιβεβαιωμένα σεισμικά δεδομένα. Θεωρητικά μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τα ορατά ρήγματα της επιφάνειας και γενικά επιφανειακές δομές παρόμοιες με της Σελήνης μετρήσεις, θεωρείται ότι ο Άρης έχει μεγαλύτερη σεισμικότητα από τη Σελήνη αλλά μικρότερη από τη Γη. Οι μεγαλύτεροι και πιο πολλοί σεισμοί αναμένονται στο Cerberus Fossae και στην περιοχή Tharsis, με τα τεράστια ηφαίστεια. Η σεισμικότητα στον Άρη πιστεύεται ότι δεν είναι πολύ βαθιά.



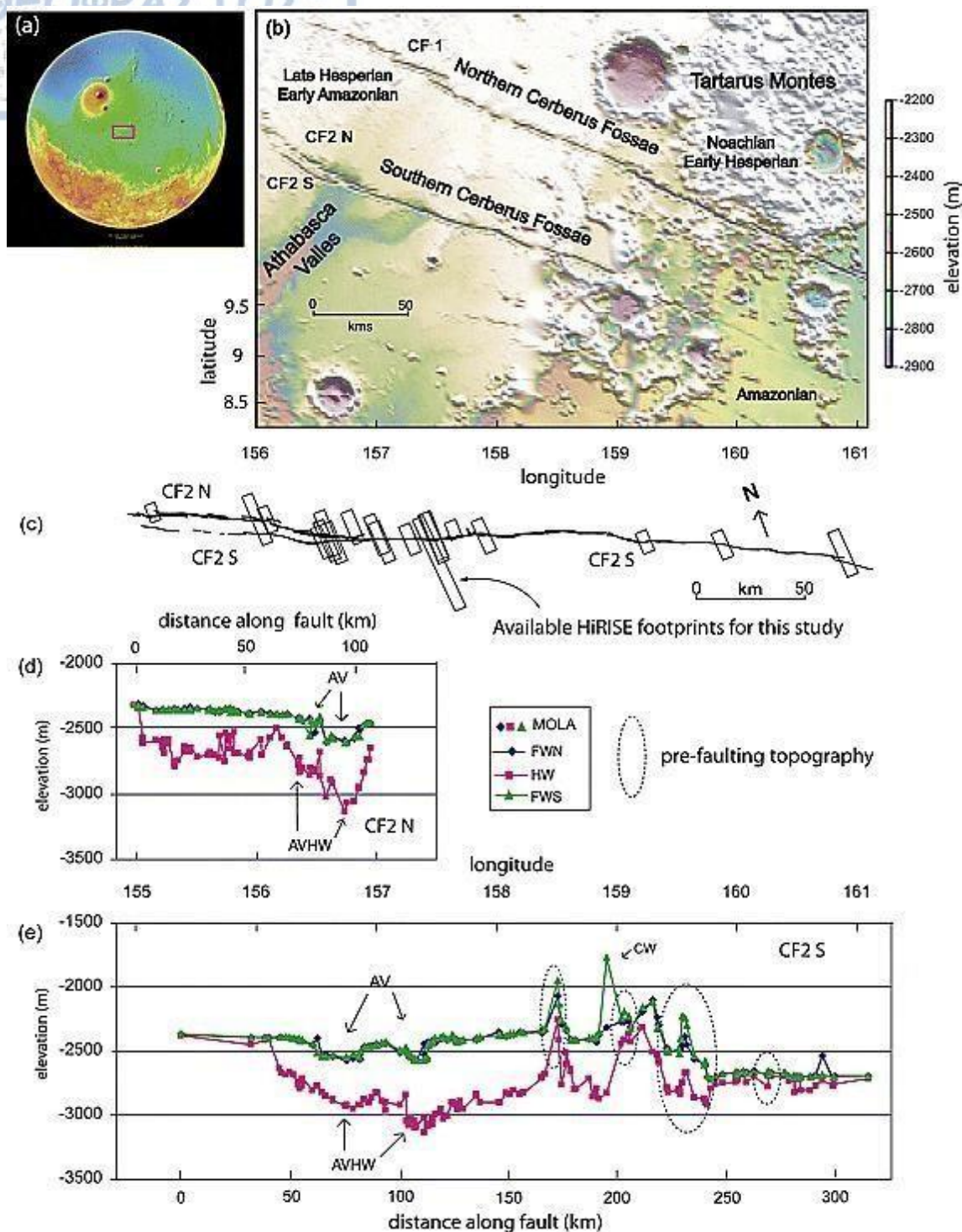
Εικόνα 29. Στη εικόνα φαίνεται πως οι επιστήμονες θα συνδυάσουν το υλικό από μετεωρίτες και τα δεδομένα από του σεισμούς στον Άρη για να κατανοήσουν τη δομή του εσωτερικού του. (<http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/snapshots/earthquakes-on-mars>)

Η μελέτη ενεργών ρηγμάτων στον πλανήτη Άρη αποτελεί ένα από τα πρόσφατα αντικείμενα μελέτης και τα στοιχεία που επεξεργάζονται θεωρούνται ακόμα ως ενδείξεις. Τον Μάιο του 2018 θα αποσταλεί η διαστημοσυσκευή Insight στην οποία μεταξύ άλλων θα υπάρχει και σεισμόμετρο με το οποίο θα αποσαφηνιστεί η ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων. Αν μη τι άλλο σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι ενδείξεις για ενεργά ρήγματα και σεισμικότητα στον πλανήτη Άρη σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις ειδικών επιστημόνων.

Αρχικά θα γίνει αναφορά στην εργασία των Roberts G.P. et. al με τίτλο ‘Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae’, Mars. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται πιθανές ενδείξεις παλαιοσεισμών από καταπτώσεις βράχων στο Cerberus Fossae, στον πλανήτη Άρη.

Σε πρώτη φάση η μελέτη χρησιμοποιεί εικόνες από το δορυφόρο HiRISE, που διατρέχει τον Άρη, με σκοπό να εντοπίσει ογκόλιθους. Οι ογκόλιθοι διακρίνονται σε αυτούς που έχουν μετακινηθεί από την επίδραση ενεργών ρηγμάτων και σε αυτούς που επηρεάστηκαν από κλιματικές/καιρικές συνθήκες. Πιο αναλυτικά οι ογκόλιθοι που μετακινήθηκαν από σεισμούς διαφέρουν σε μέγεθος από αυτούς που επηρεάστηκαν από κλιματικές διεργασίες. Επίσης οι ‘σεισμικοί’ ογκόλιθοι πολλές φορές αφήνουν ίχνη μετακίνησης και τείνουν να σχηματίζουν σωρούς. Τέλος μεταξύ των ογκολίθων που επηρεάζονται από σεισμούς παρατηρείται μία μείωση του μεγέθους από το επίκεντρο προς τα περίξ. Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε αρχικά για σεισμικά γεγονότα στη Γη. Έπειτα παίρνοντας τα επιθυμητά αποτελέσματα έγινε η εφαρμογή της και για τον πλανήτη Άρη. Συγκεκριμένα σε αυτή την εργασία πραγματοποιείται μελέτη πιθανών σεισμών στον Άρη κατά μήκος του Cerberus Fossae και της πιθανής ενεργότητας που σχετίζεται με τη δημιουργία αναχώματος (που είναι υποτρωική) στο ηφαίστειο Elysium Mons.

Μελέτες έχουν δείξει ότι ο Άρης είναι λιγότερο ενεργός σε σχέση με τη Γη. Αυτό οφείλεται στο πολύ μικρότερο μέγεθος του πλανήτη, το οποίο τον ανάγκασε να ψυχθεί γρήγορα και να μην υπάρχουν σήμερα ενδείξεις για πηγές θερμότητας. Ωστόσο το σύστημα THEMIS έχει δώσει ενδείξεις για κάποιες πηγές θερμότητας στο Cerberus Fossae. Το THEMIS συγκεκριμένα λειτουργεί με νυχτερινές φωτογραφήσεις όπου εκεί εντοπίζονται ίχνη φωτεινότητας στις εικόνες, τα οποία θεωρούνται πηγές θερμότητας. Η απαθανάτιση τέτοιων εικονών δείχνει την ύπαρξη ενδογενούς θερμότητας που σχετίζεται με την ύπαρξη ενεργών ρηγμάτων κατά τη νεότερη ιστορία του Άρη.



Εικόνα 30. (a) Χάρτης που δείχνει την τοποθεσία Cerberus Fossae. (b) Εικόνα MOLA του Άρη που δείχνει τη θέση περιοχής μελέτης. (c) DEM (digital elevation model-ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου) που κατασκευάζεται από MOLA (mars orbiter lazer Altimeter) και δείχνουν το Cerberus Fossae. (d και e) Γραμμικά σχέδια που δείχνουν τη διαθεσιμότητα απεικόνισης του HiRISE κατά τη διάρκεια καταγραφής του νότιου μέρους του Cerberus Fossae. Οι μετρήσεις των κατακórυφων μετατοπίσεων κατά μήκος των βράχων που ελέγχονται από ρήγματα προέρχονται από μεμονομένες διαδρομές MOLA. Τα σχήματα 1d και 1e κατασκευάστηκαν από μεμονομένα δεδομένα διαδρομής MOLA και όχι από μία διατομή διαμέσου του παρεμβαλλόμενου DEM. Ο βορράς είναι εκτός, εκτός από τις περιπτώσεις που υποδεικνύεται. (Gerald P. Roberts et al. 2012 από Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars)

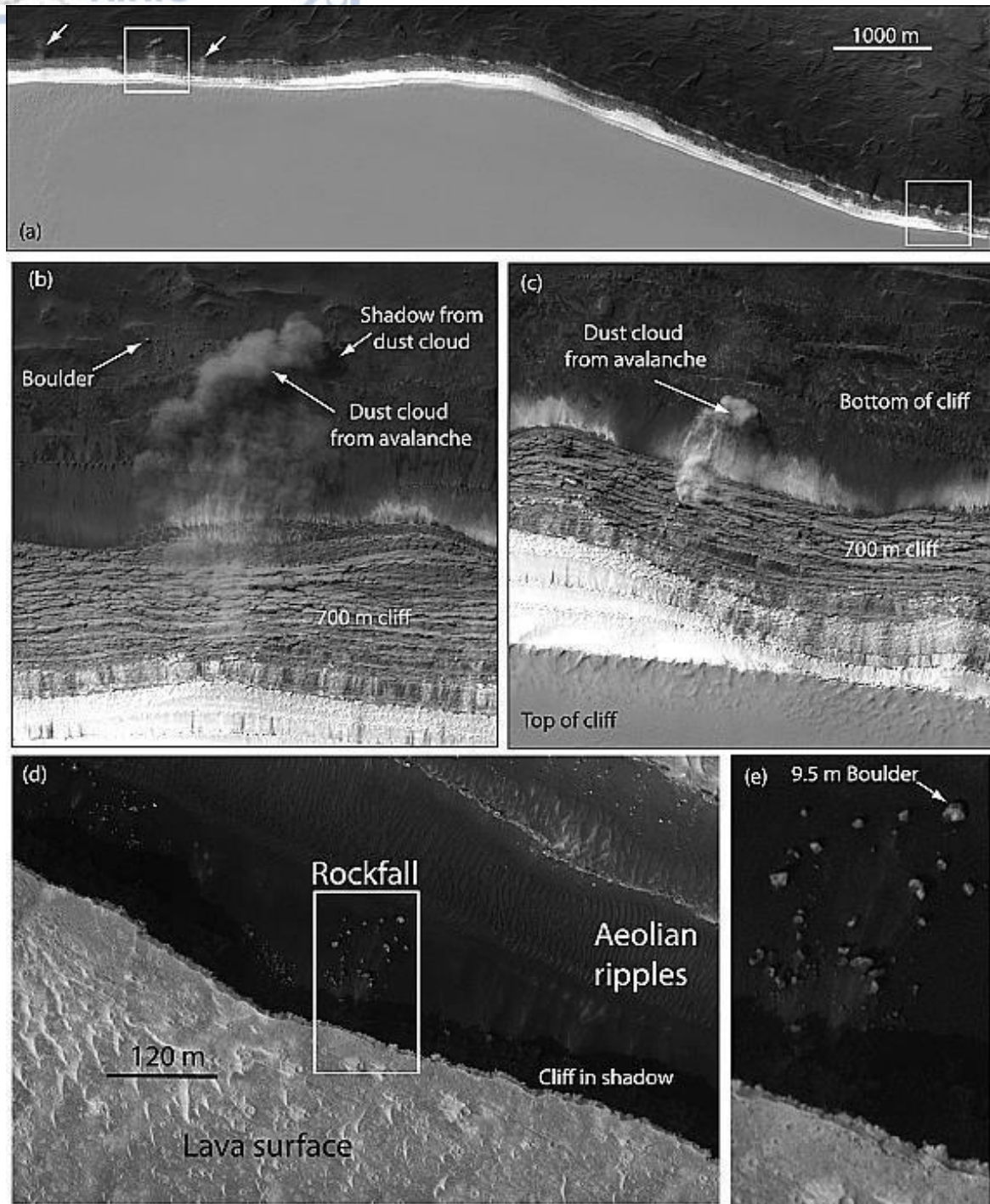
Μολαταύτα σεισμοί στον πλανήτη Άρη δεν έχουν καταγραφεί. Έχουν γίνει προσπάθειες μελέτης της σεισμικότητας με τη διαστημοσυσκευή Viking, η οποία λόγω δυνατών ανέμων, δεν μπόρεσε να καταγράψει ξεκάθαρα σεισμικά σήματα. Παρ'όλα αυτά έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για να εκτιμηθεί προσεγγιστικά η σεισμική δραστηριότητα στον Άρη, κυρίως μέσω φωτογραφικού υλικού.

Βασικό εργαλείο στην εκτίμηση παλαιοσεισμών στον Άρη (κυρίως μεγάλου μεγέθους) είναι οι φυσικές παλαιοσεισμολογικές διεργασίες. Η ερμηνεία τους βασίζεται στους επισφαλώς στηριγμένους ογκόλιθους. Συγκεκριμένα φυσικά σεισμόμετρα χρησιμοποιήθηκαν πρώτα στη Γη με ικανοποιητικά αποτελέσματα στο ρήγμα του Σαν Αντρέας και σε άλλες περιοχές της Γης. Σε αυτή την μελέτη για τον πλανήτη Άρη γίνεται χρήση εικόνων από το δορυφόρο HiRISE (imaginary resolution science system) δίνοντας πολλές πιθανότητες για σεισμικά γεγονότα στο Βόρειο πόλο και κατά μήκος της περιοχής Cerberus Fossae.

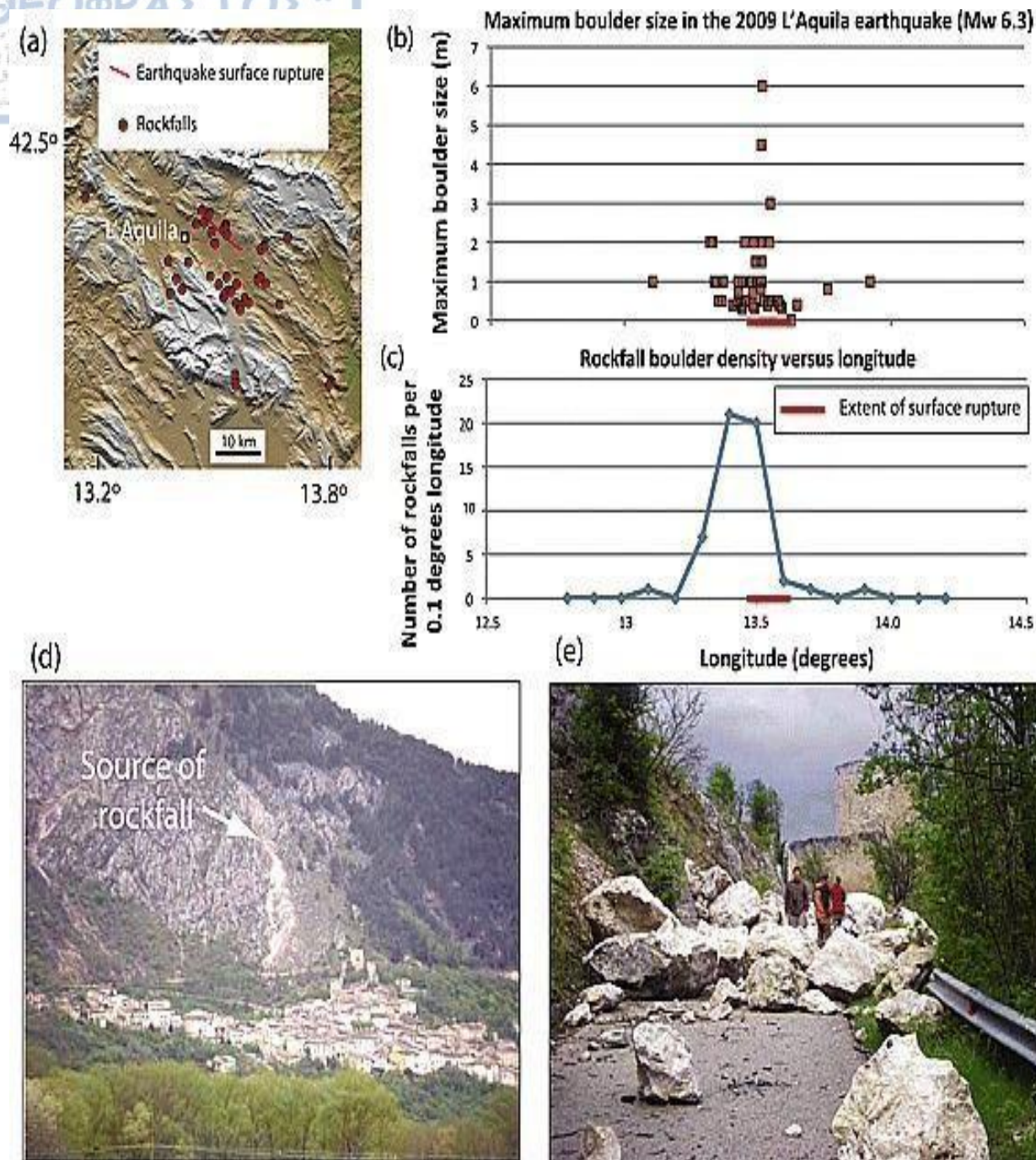
Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων που εφαρμόστηκαν στον Άρη έχουν πραγματοποιηθεί αρχικά στη Γη. Συγκεκριμένα το παρακάτω σχήμα μας δείχνει τη συμπεριφορά των ογκολίθων έπιτα από το σεισμικό γεγονός στις 6 Απριλίου 2009 στη L'Aquila ($M_w=6.3$) στην κεντρική Ιταλία. Σύμφωνα με το σχήμα παρατηρείται μία μείωση του μεγέθους των ογκολίθων από το επίκεντρο προς τα περίξ σε σύγκριση με τους ογκόλιθους που μετακινήθηκαν από κλιματικούς παράγοντες και επηρεάζονται από άλλες δράσεις (Ηλιακή ενέργεια, λιθολογία κ.α.). Επίσης η απόσταση όπου μετακινούνται οι ογκόλιθοι παίζει ρόλο. Οι ογκόλιθοι για να μετακινηθούν μακριά από την μητρική τους πηγή θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη ορμή η οποία δίνεται μόνο με την ενέργεια ενός σεισμικού γεγονότος. Επίσης οι 'σεισμικοί' ογκόλιθοι εμφανίζονται χωρίς κατακερματισμένο μητρικό υλικό τριγύρω τους σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Η περιοχή Cerberus Fossae έχει διεύθυνση προσανατολισμού ΔΒΔ-ΑΝΑ. Αυτό το στοιχείο δείχνει ότι δεν θα πρέπει να επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες (ηλιακή ενέργεια). Άρα θεωρείται η πλέον κατάλληλη περιοχή για τη μελέτη σεισμικών γεγονότων αντλώντας στοιχεία από την κίνηση των ογκολίθων. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν ογκόλιθοι οι οποίοι κατακάθονται πάνω σε αιολικά ιζήματα. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι υπάρχουν ενεργά ρήγματα στον πλανήτη και μάλιστα πρόσφατη σεισμικότητα, καθώς οι ογκόλιθοι αυτοί δεν έχουν προλάβει να καλυφθούν από τα αιολικά ιζήματα.

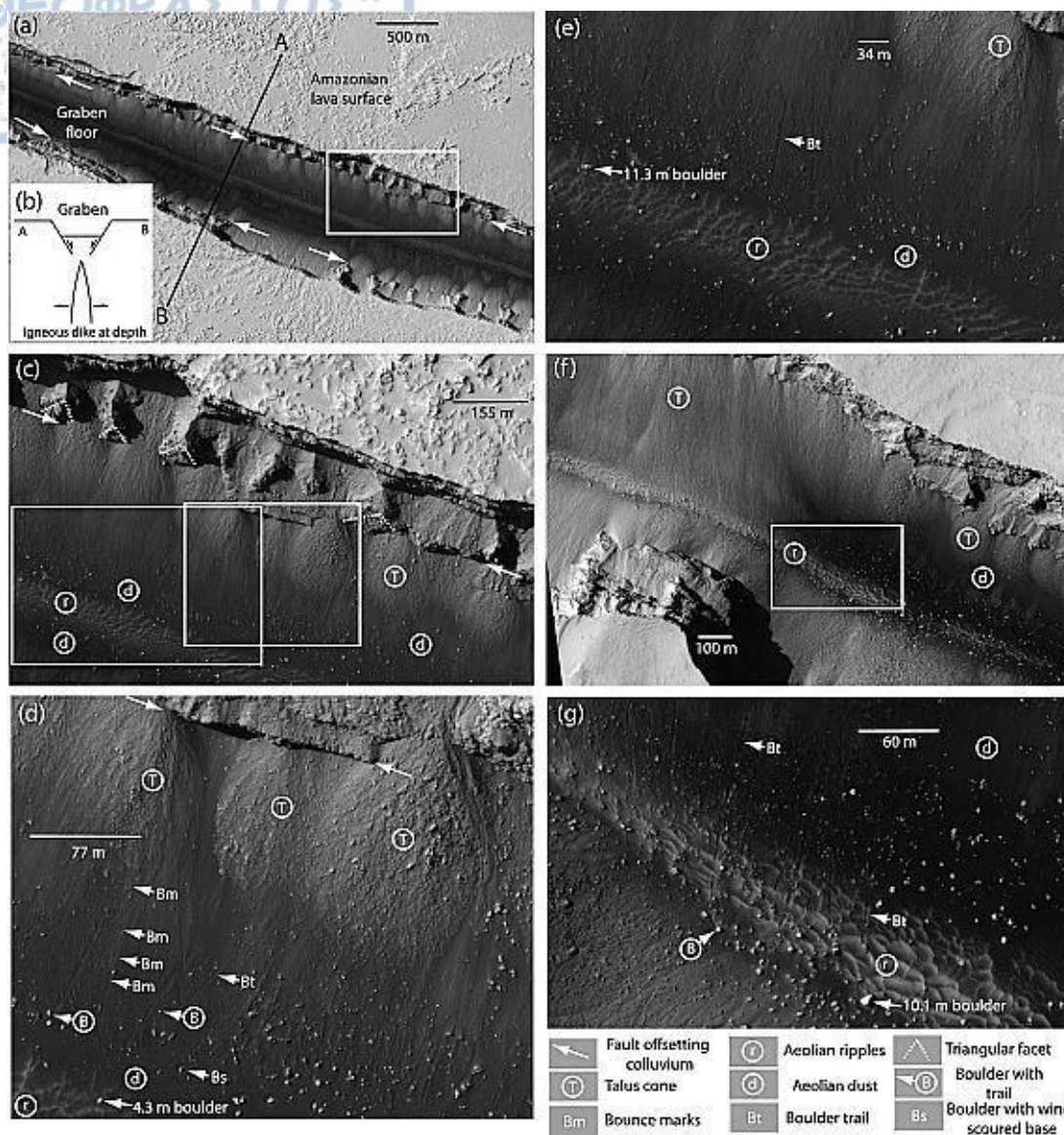
Η περιοχή μελέτης βρίσκεται όπως έχει προαναφερθεί στη περιοχή Cerberus Fossae και έχει προσανατολισμό ΔΒΔ-ΑΝΑ. Συγκεκριμένα καλύπτει ένα σύνολο ρυτιδώσεων μήκους 310 χλμ. Οι οποίες 'τεμαχίζουν' την επιφάνεια σε διάφορες ηλικίες με συντεταγμένες (9,8792 158,2179) (σχήμα 1). Επίσης πιθανολογούνται κάποιοι πυριγενείς σχηματισμοί σε βάθος, οι οποίοι προέρχονται από το Elysium Mons λόγω του τεκτονικού βυθίσματος (graben) που παρατηρείται στα ρήγματα.



Εικόνα 31.(a-c) Προβολή ταυτόχρονων πτώσεων βράχων στο βόρειο πόλο του Άρη από την εικόνα HiRISE PSP_007338-2640.(d και e) Εικόνα από το Cerberus Fossae που παρουσιάζει ογκολίθους με σαφή γεωμετρία από την εικόνα HiRISE ESP_014383_1910. Τα μονοπάτια που αφήνουν οι ογκόλιθοι ξεκινούν από ένα ύψος μερικών δεκάδων μέτρων. Σε αυτά διακρίνεται ένα εξωτερικό τόξο που αποτελείται από μεγάλους σχετικά ογκόλιθους που έρχεται σε αντίθεση με καταθέσεις κοντά στη πηγή που περιέχουν μικρούς βράχους. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι η ορμή έχει μεταφέρει το σχετικά μεγάλο όγκο μακρύτερα από τη πηγή σύμφωνα με ένα μηχανισμό υψηλής ταχύτητας/τοποθέτησης βράχων.((Gerald P. Roberts et al. 2012 από Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars)



Εικόνα 32. Δεδομένα από το σεισμό στην L'Aquila το 2009. Ο χάρτης της εικόνας a δείχνει τη διασπορά βράχων από καταπτώσεις. Στο διάγραμμα του σχήματος b παρατηρούνται τα μεγέθη των βράχων σε σχέση με το γεωγραφικού μήκους. Στο διάγραμμα της εικόνας φαίνεται η πυκνότητα του βράχου ανά 0,1 μοίρες γεωγραφικού μήκους. Στην εικόνα d απεικονίζονται οι ογκόλιθοι που έπεσαν από το σεισμό. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βράχοι κυριαρχούν στην εμφάνισή τους σε σχέση με τους μικρούς, καθώς οι μικρότεροι δεν είχαν αρκετή δυναμική για να αναπηδήσουν και κυλίσουν στις ίδιες αποστάσεις. (Roberts P. G. et al. 2012 από Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars)



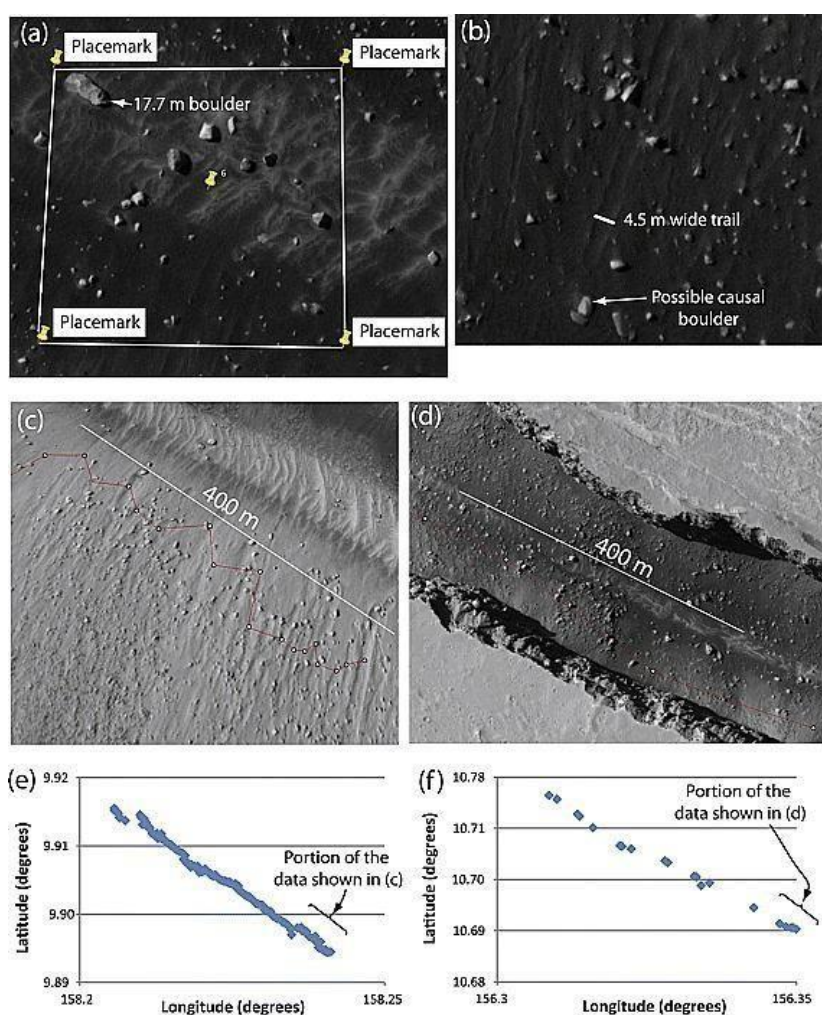
Εικόνα 33. Παραδείγματα ογκολίθων κατά μήκος του Cerberus Fossae. (a) Προβολή μέρους από το Cerberus Fossae που δείχνει Τα απότομα ελεγχόμενα από ρήγματα βράχια. (b) Σχηματική διατομή που δείχνει τον τρόπο που δημιουργείται μια τάφρος η οποία ελέγχεται από ρήγματα. (c) Αποτυπώματα καταθέσεων από τη δράση ρηγμάτων. (d και e) Προβολή ογκοίθων και μονοπατιών που οδηγούν σε αυτά. Οι ασυνεχείς διαδρομές φανερώνουν αναπήδηση (συνήθως οι μεγαλύτεροι) των βράχων ενώ οι συνεχείς κύλιση. (f) Προβολή σχηματισμών από τη δράση αιολικής ενέργειας. (g) Προβολή της διαδρομής (αναπήδησης) των ογκολίθων οι οποίοι παραμορφώνουν τους σχηματισμούς που έχουν δημιουργηθεί από τη δράση αιολικής ενέργειας. (Gerald P. Roberts et al. 2012 από Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars)

Οι ογκόλιθοι που έχουν πέσει από τους γκρεμούς στη συγκεκριμένη περιοχή ελέγχονται κυρίως από ρήγματα. Οι ίδιοι εμφανίζονται απομονωμένοι, δηλαδή χωρίς μητρικό υλικό τριγύρω τους. Γύρω από τους ογκολίθους αυτούς υπάρχει συνήθως αιολικό υλικό πάνω στο οποίο κατακάθονται, πολλές φορές χαράσσοντας και μονοπάτι κύλισης. Άλλες φορές το μονοπάτι αυτό καλύπτεται από το αιολικό υλικό.

Παρόμοιες μελέτες στη Γη δείχνουν ότι η ύπαρξη τέτοιων ογκολίθων παρατηρείται μόνο για μεγάλου μεγέθους σεισμούς ($M_s > 6$).

Γενικά υπάρχει η εντύπωση ότι οι ογκόλιθοι είναι σχετικά νέοι όπου διακρίνεται ίχνος κύλισης. Σε αυτούς που δεν έχει βρεθεί τέτοιο μονοπάτι θεωρείται ότι καλύφθηκε από αιολικές διεργασίες που είναι έντονες στον πλανήτη. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι η παρατήρηση των εικόνων και μόνο από το HiRISE δεν μπορεί να αποσαφηνίσει πλήρως ποιοι ογκόλιθοι αποσφηνώθηκαν λόγω σεισμικότητας και ποιοι λόγω κλιματικών γεγονότων.

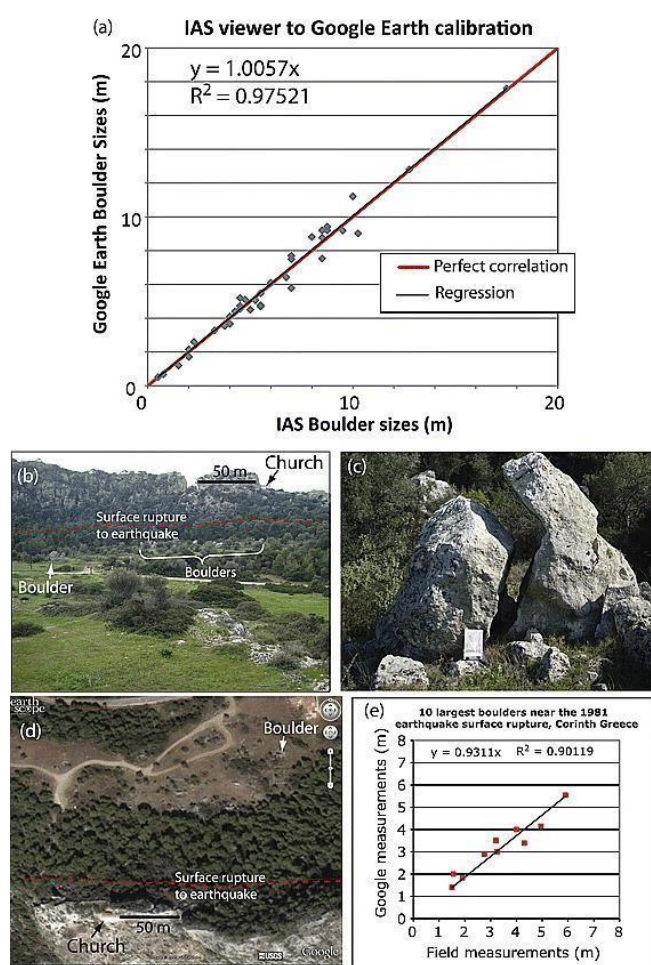
Σε γενικές γραμμές πραγματοποιήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά λήφθηκαν εικόνες από το δορυφόρο HiRISE με την μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση. Έπειτα εισάχθηκαν οι εικόνες αυτές στο Google Earth. Στο πεδίο Cerberus Fossae καλύφθηκαν 12 περιοχές με τη μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση, για τους σκοπούς της μελέτης. Έπειτα έγινε η χρήση του εργαλείου χάρακα του Google Earth για να μετρηθούν τα μεγέθη των ογκολίθων και το μήκος των διαδρομών τους.



Εικόνα 34.(α)Παράδειγμα εικόνας όπου μετρήθηκαν οι 10 μεγαλύτεροι ογκόλιθοι (εικόνα HiRISE ESP_019829_1900). Ο μεγαλύτερος ογκόλιθος που μετρήθηκε σε αυτή την μελέτη είναι 17,7 μέτρα. (b)Το πλάτος των ογκολίθων ορίζεται από τις κορυφογραμμές που φωτίζονται από τον Ήλιο.(c) Παράδειγμα που δείχνει τη συχνότητα των διαδρομών των ογκολίθων(HiRISE εικόνα ESP_016216_1900).(d) Παράδειγμα που δείχνει αραιή συγκέντρωση ογκολίθων σε σχετικά στενά μονοπάτια.(e και f) Γραφήματα που δείχνουν την πυκνότητα των διαδρομών των ογκολίθων που βρέθηκαν κατά μήκος μίας διαδρομής ΔΒΔ-ΑΝΑ που διέρχεται από 0,05° γεωγραφικό μήκος.(Gerald P. Roberts et al. 2012)

Από τα παραπάνω δεδομένα επιλέχθηκαν οι 10 μεγαλύτεροι ογκόλιθοι για κάθε μία από τις 12 περιοχές υψηλής ανάλυσης του HiRISE. Μέσω των εικόνων εντοπίστηκαν διαδρομές ογκολίθων 2-6 χλμ. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του εργαλείου χάρακα του Google Earth σε συνδυασμό με τον αριθμό των εικονοστοιχείων μέσω του προγράμματος IAS, με την προϋπόθεση να μην υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία περιοχή της κεντρικής Ελλάδας (και συγκεκριμένα στην περιοχή Ανατολικού Κορινθιακού στις Αλκυωνίδες) το 1981 με μέγεθος 6.7. Από αυτό το σεισμικό γεγονός κινητοποιήθηκαν ογκόλιθοι οι οποίοι επειδή δεν βρίσκονται κοντά σε κατοικημένη περιοχή έμειναν ανέπαφοι. Αυτοί λοιπόν οι ογκόλιθοι εύκολα μπορούν να εντοπιστούν από το Google Earth. Η επόμενη κίνηση των μελετητών είναι να μετρήσουν τις διαστάσεις των βράχων στην πραγματικότητα και έπειτα με τη βοήθεια του χάρακα του Google Earth. Από αυτή τη διαδικασία βρέθηκε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων με μία απόκλιση +/- 1 μέτρο.



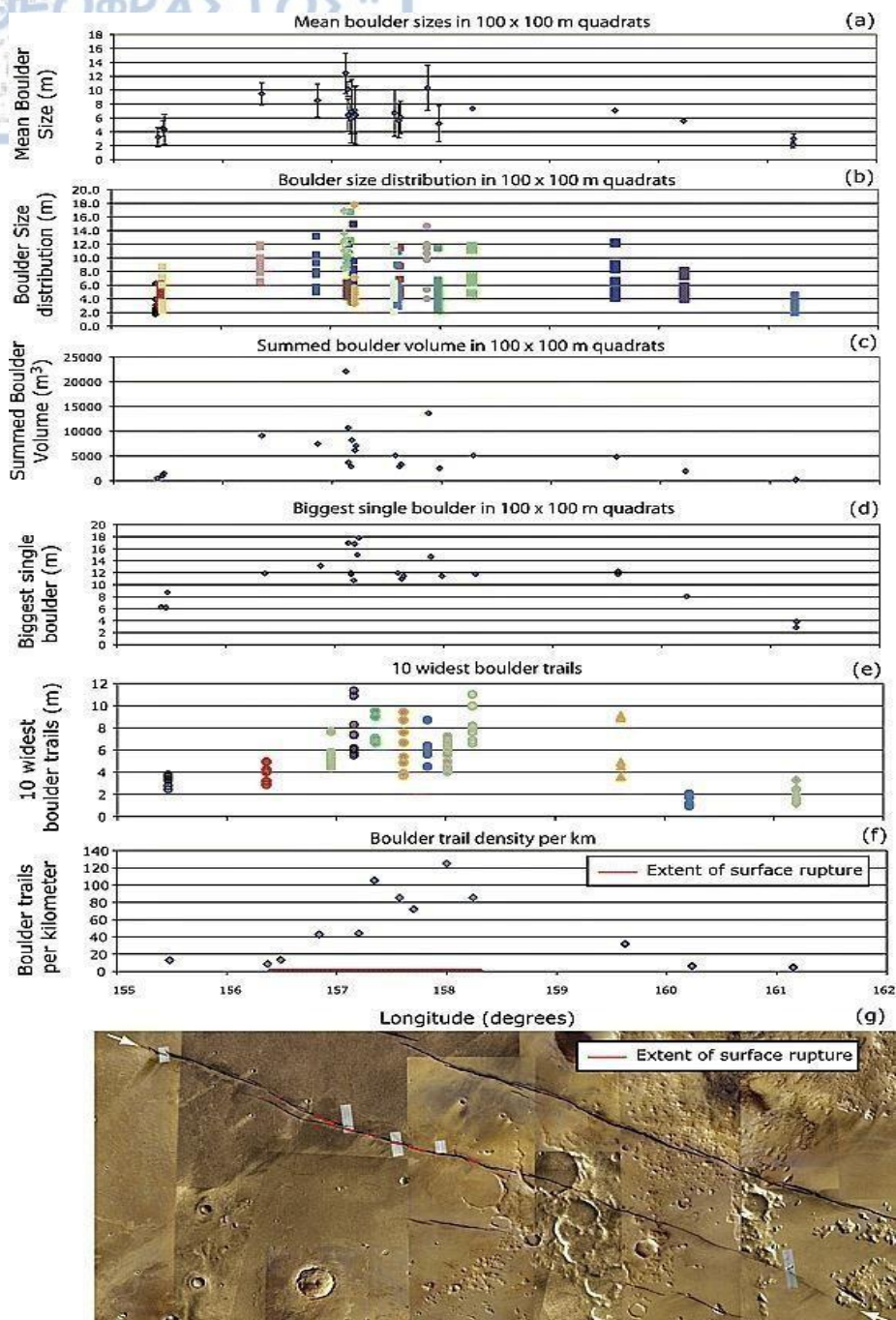
Εικόνα 35.(α) Γράφημα που δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του εργαλείου χάρακα Google Earth και της καταμέτρησης των εικονοστοιχείων στο πρόγραμμα προβολής IAS. (b) Κατακρημνίσματα βράχων που έχουν πέσει από την επιφάνεια ρήγματος κατά τον σεισμό που πραγματοποιήθηκε στην κεντρική Ελλάδα το 1981.(c) Προβολή ενός πεσμένου ογκόλιθου. (d) Εικόνα από το Google Earth που δείχνει πεσμένους ογκόλιθους.(e) Γράφημα που δείχνει την συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του εργαλείου χάρακα του Google Earth και δεδομένα των μετρήσεων από ογκόλιθους που κινητοποιήθηκαν από σεισμούς στην κεντρική Ελλάδα. Η τοποθεσία στην Ελλάδα βρίσκεται στα περίχωρα του Κορινθιακού.(Roberts G. P. et al. 2012)



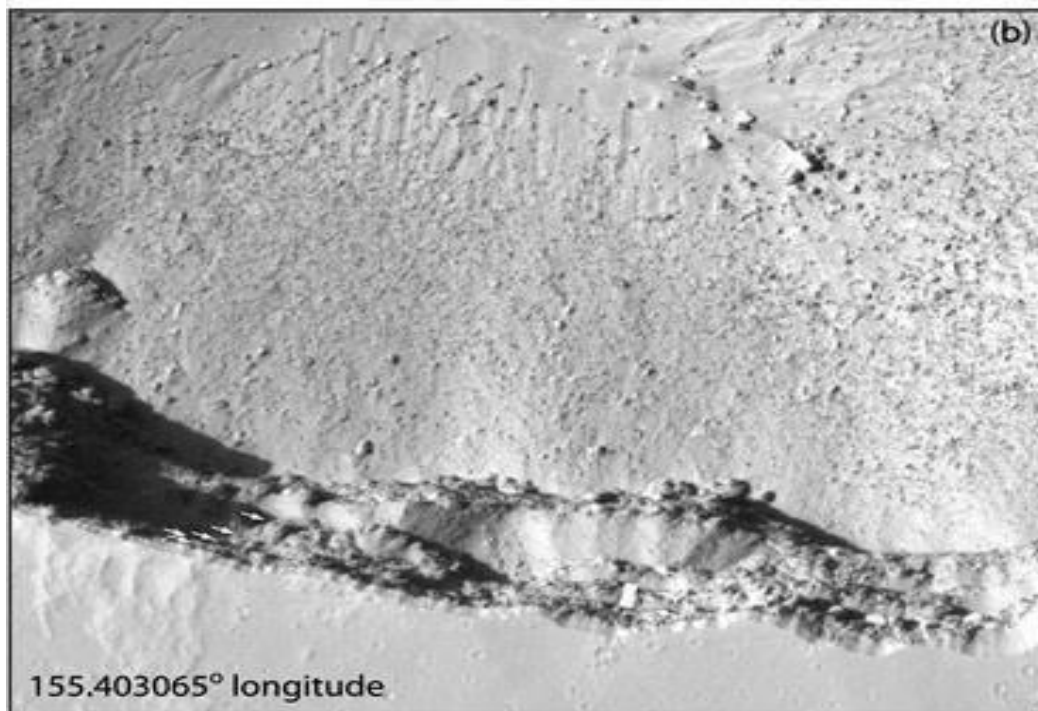
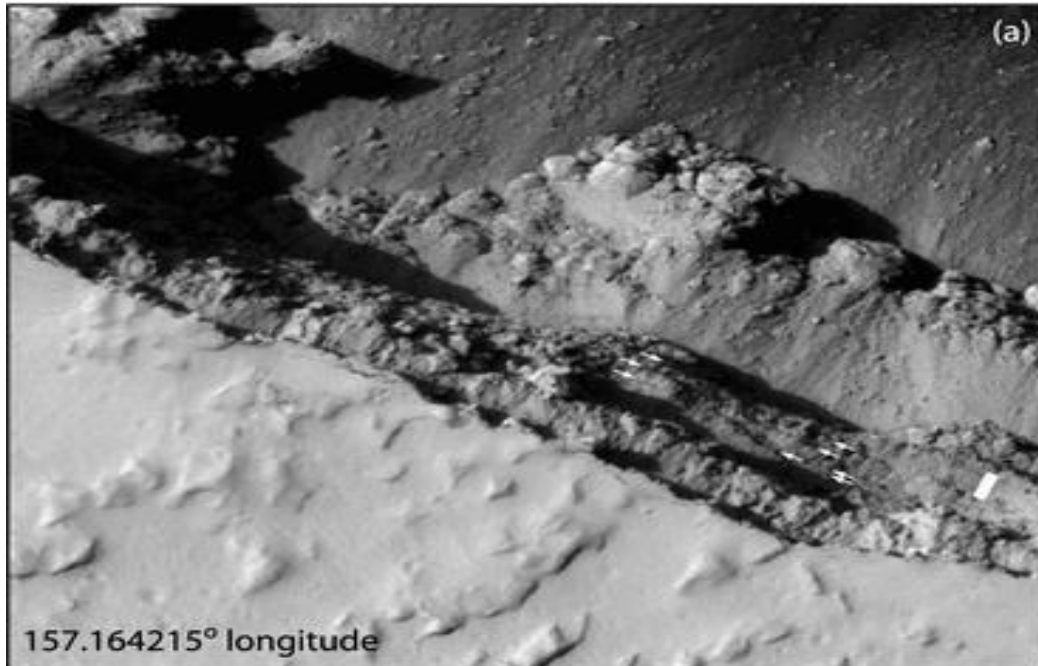
Γενικά οι μετρήσεις διαστάσεων με τη βοήθεια του χάρακα του Google Earth έχουν αποδειχθεί αξιόπιστες με κάποιες αποκλίσεις ± 1 μέτρο. Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα παρατηρούνται χωρικές διαφοροποιήσεις τόσο στο μέγεθος όσο και στην πυκνότητα των ογκόλιθων. Οι τιμές αυτές φαίνεται ότι μειώνονται προς το τέλος τις διαδρομής.

Έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ύψους και απόστασης βράχου σε σχέση με τον πλησιέστερο ογκόλιθο. Γενικά παρατηρείται ότι οι νεότεροι ογκόλιθοι ακολουθούν τα ήδη υπάρχοντα ίχνη πάνω στην αιολική σκόνη. Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι τα δυνιτικά ενεργά ρήγματα στον Άρη θεωρούνται από παρόμοιες δομές και διεργασίες στη Γη.

Αναφορικά τονίζεται ότι πολλοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή Cerberus Fossae και πως οι ογκόλιθοι έχουν μετακινηθεί αποκλειστικά και μόνο από κλιματικούς παράγοντες. Οι σεισμοί θα πρέπει να ήταν ή είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να επηρεάσουν τους ογκόλιθους για περισσότερο από 100X100 μέτρα. Ωστόσο σε αντίθεση με τα παραπάνω οι ογκόλιθοι που υποστηρίζεται ότι έχουν μετακινηθεί από σεισμικά γεγονότα δεν θα μπορούσαν να έχουν μετακινηθεί από κλιματικούς παράγοντες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αποστάσεις κύλισης είναι πολύ μεγάλες. Άρα χρειάστηκαν μεγάλη ορμή την όπου μόνο σεισμικά συμβάντα μπορούν να παράγουν. Επίσης δεν έχουν αναγνωριστεί στοιχεία ψύξης, θέρμανσης στους ογκόλιθους της μελέτης.



Εικόνα 36. Μεταβολή πληθυσμών ογκολίθων και των αντίστοιχων ιχνών τους κατά μήκος του Cerberus Fossae. (a) Μέσες τιμές για τους 10 μεγαλύτερους ογκόλιθους σε τετράγωνο διαστάσεων 100X100 από εικόνα του HiRISE. (b) Κατανομές μεγεθών για τους 10 μεγαλύτερους ογκόλιθους σε ίδιο τετράγωνο. (c) Όγκος του υλικού βράχου που σχετίζεται με τους 10 μεγαλύτερους ογκόλιθους σε κάθε τετράγωνο διαστάσεων 100X100 μέτρα. (d) Διάμετρος μεγαλύτερου ογκόλιθου σε κάθε τετράγωνο 100X100 μέτρων. (e) Πλάτος διαδρομών ογκολίθων. (f) Πυκνότητα διαδρομών ογκολίθων ανά χιλιόμετρο. (g) Προβολή από το Google Earth της γεωμετρίας του συστήματος ρηγμάτων στην ίδια κλίμακα με τα γραφικά στα σχήματα (a) - (f). (Gerald P. Roberts et al. 2012 από Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars)



Εικόνα 38. Πιθανή πυκνότητα ρωγματώσεων σε βράχους του Cerberus Fossae που ελέγχονται από ρήγματα. Οι λευκές ράβδοι υποδεικνύουν την κλίμακα 10 μέτρων/ράβδο. Τα λευκά βέλη δείχνουν ρωγμές που συνδέονται με πιθανά ρήγματα.(Roberts G. P. et al. 2012)

Δεν υπάρχει κάποια σύνδεση μεταξύ πετρολογίας και τεκτονικής καθώς οι βράχοι των ογκολίθων είναι πολύ παλαιότεροι από τα ρήγματα. Επίσης οι τεκτονικοί ογκόλιθοι που μελετήθηκαν φαίνεται ότι είχαν σταθερή ηλιακή ακτινοβολία άρα δεν επηρεάστηκαν από την ηλιακή ενέργεια. Άρα οι σεισμοί φαίνεται να είναι η μόνη λογική εξήγηση για την ύπαρξη αυτών των ογκολίθων. Σαφώς θα πρέπει να τονιστεί ότι η ενεργή σεισμικότητα στον Άρη που έχουμε θεωρήσει σε αυτή τη μελέτη περιορίζεται μόνο στην περιοχή Cerberus Fossae, αφού δεν έχουν εντοπιστεί παρόμοιοι ογκόλιθοι αλλού. Αυτό υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της επιφάνειας του Άρη.

Τα πραγματικά μεγέθη των σεισμών στον Άρη δεν μπορούν εύκολα να υπολογιστούν. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε από γήινα σεισμικά συμβάντα θα έπρεπε οι μελετούμενοι σεισμοί στον Άρη να είναι πολύ μεγάλου μεγέθους. Ωστόσο η βαρύτητα στον Άρη είναι το 38% της γήινης. Οπότε η κίνηση των ογκολίθων θα είναι πολύ πιο εύκολη. Επίσης δεν υπάρχει δυνατότητα μέσω φωτογραφιών να μελετηθεί ένα μεμονωμένο σεισμικό γεγονός.

Γενικά οι σεισμοί στον Άρη θεωρούνται νέοι. Τα ρήγματα έχουν αφήσει τα αποτυπώματά τους σε λάβες ηλικίας Amazonian [8]. Επίσης οι ογκόλιθοι θεωρούνται πρόσφατοι ίσως και σημερινοί, αφού δεν έχουν καλυφθεί από τις αιολικές διαδικασίες που είναι ιδιαίτερα έντονες στον Άρη. Ωστόσο δεν έχει αποδειχθεί κάτι τέτοιο ακόμη.

Τέλος στην περίπτωση όπου η εργασία αυτή αποδειχθεί αληθής και υπάρχουν ενεργά ρήγματα στον πλανήτη σήμερα θα μας δώσει πολύ σημαντικά στοιχεία. Η ύπαρξη τεκτονικής δραστηριότητας συνεπάγεται ύπαρξη μάγματος και ηφαιστειότητας το οποίο με τη σειρά του αποτελεί πηγή θερμότητας. Η θερμότητα στην συνέχεια μπορεί να λιώσει το πάγο νερού που έχει ανακαλυφθεί ικανοποιώντας το αναγκαίο κριτήριο για την ύπαρξη και διατήρηση ζωής στον Άρη.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η εργασία των Knapmeyer M. et al. 2012 , J. με τίτλο “Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity”, η οποία πραγματεύεται μοντέλα για την χωρική κατανομή ρηγμάτων και τα επίπεδα σεισμικότητας στον Άρη.

Έχουν δημιουργηθεί διάφοροι κατάλογοι ρηγμάτων κανονικών και ανάστροφων για τον πλανήτη Άρη. Συνολικά έχουν καταγραφεί 8.500 ρήγματα συνολικού μήκους 680.000 χλμ. Όλα αυτά τα ρήγματα χαρτογραφήθηκαν με τη βοήθεια του MOLA^[10]. Με βάση αυτούς τους καταλόγους έχουν γίνει εκτιμήσεις της σεισμικότητας στον Άρη. Η σεισμικότητα υπολογίζεται με τη βοήθεια 5 σεισμικών μοντέλων που έχουν κατασκευαστεί. Έχει διαπιστωθεί σύμφωνα με αυτά τα μοντέλα, ότι τα περισσότερα σεισμικά γεγονότα αναμένονται στο πεδίο Tharsis, Hellas και βόρεια της Utopia Plantia.

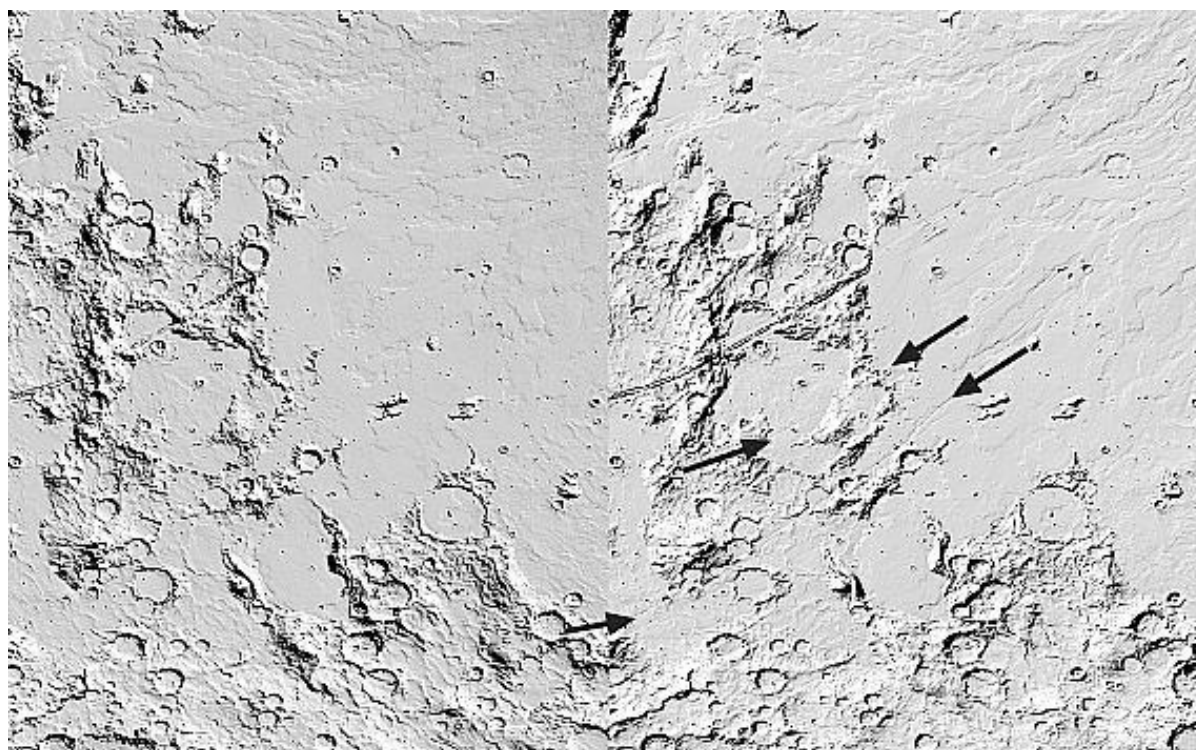
Τα έγκυρα σεισμολογικά δεδομένα προϋποθέτουν την καλύτερη δυνατή κατανόηση της δυναμικής του Άρη. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γνωρίζουμε το μέγεθος του πυρήνα, την αλλαγή ορυκτολογικών φάσεων και το πάχος του φλοιού κατά τόπους. Συμπερασματικά, βασική προϋπόθεση για να υπάρχουν έγκυρα σεισμολογικά δεδομένα είναι η σχολαστική επιλογή της θέσης όπου πραγματοποιείται η μέτρηση.

Γενικά στον πλανήτη Άρη έχει πραγματοποιηθεί πολύ καλή χαρτογράφηση ρηγμάτων ειδικά στο δυτικό ημισφαίριο. Όλα αυτά τα ρήγματα χαρτογραφήθηκαν με τη βοήθεια εικόνων. Τα μοντέλα και οι υποθέσεις για τη σεισμικότητα προέρχονται από τα ήδη χαρτογραφημένα ρήγματα της επιφάνειας.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που λάβαμε από τη χρήση σεισμικών μοντέλων, η σεισμικότητα στον Άρη βρίσκεται ανάμεσα σε αυτήν της Γης και της Σελήνης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα μόνα πλανητικά σώματα για τα οποία έχουμε έγκυρα σεισμολογικά δεδομένα είναι η Γη και η Σελήνη, με τη Γη να είναι κατά 4 περίπου φορές πιο σεισμικά ενεργή από τη Σελήνη.

Ο υπολογισμός των σεισμικών γεγονότων στον Άρη βασίζεται στα μοντέλα σεισμικής δραστηριότητας. Αυτά τα 5 μοντέλα με τη σειρά τους βασίζονται στον παγκόσμιο κατάλογο συστημάτων ρηγμάτων που έχει δημιουργηθεί. Επίσης ένας κατά προσέγγιση υπολογισμός της ηλικίας, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τους γεωλογικούς σχηματισμούς όπου βρίσκονται τα ρήγματα. Όλα αυτά τα δεδομένα στη συνέχεια εισάγονται σε ένα αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τη σεισμική δραστηριότητα, ακολουθώντας την προσέγγιση της παγκόσμιας λιθοσφαιρικής ψύξης του Phillips.

Σε πρώτη φάση θα γίνει αναφορά στη διαδικασία χαρτογράφησης. Ο πλανήτης Άρης χαρτογραφήθηκε με τη βοήθεια του MOLA_[10]. Πιο συγκεκριμένα, οι παγκόσμιοι τοπογραφικοί χάρτες αποτελούν 4 ξεχωριστά φύλλα με ανάλυση 64 pixel/deg (0.9264 m/pixel). Οι επιστήμονες πήραν αυτά τα φύλλα και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή εντόπισαν τα ρήγματα. Οι χάρτες αυτοί φωτίστηκαν τεχνητά ανά 90°. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκαν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η λανθασμένη φωτοσκίαση ίσως έκρυβε η εμφάνιζε ρήγματα.



Εικόνα 39 . Εικόνα που προέρχεται από το MOLA και είναι τεχνητά φωτισμένες. Τα ρήγματα που εκτείνονται ΒΔ και ΝΑ μπορούν να εντοπιστούν μόνο εάν φωτιστούν από τα ΒΔ (βλέπε βέλη). (Knapmeyer M. et.al 2006)

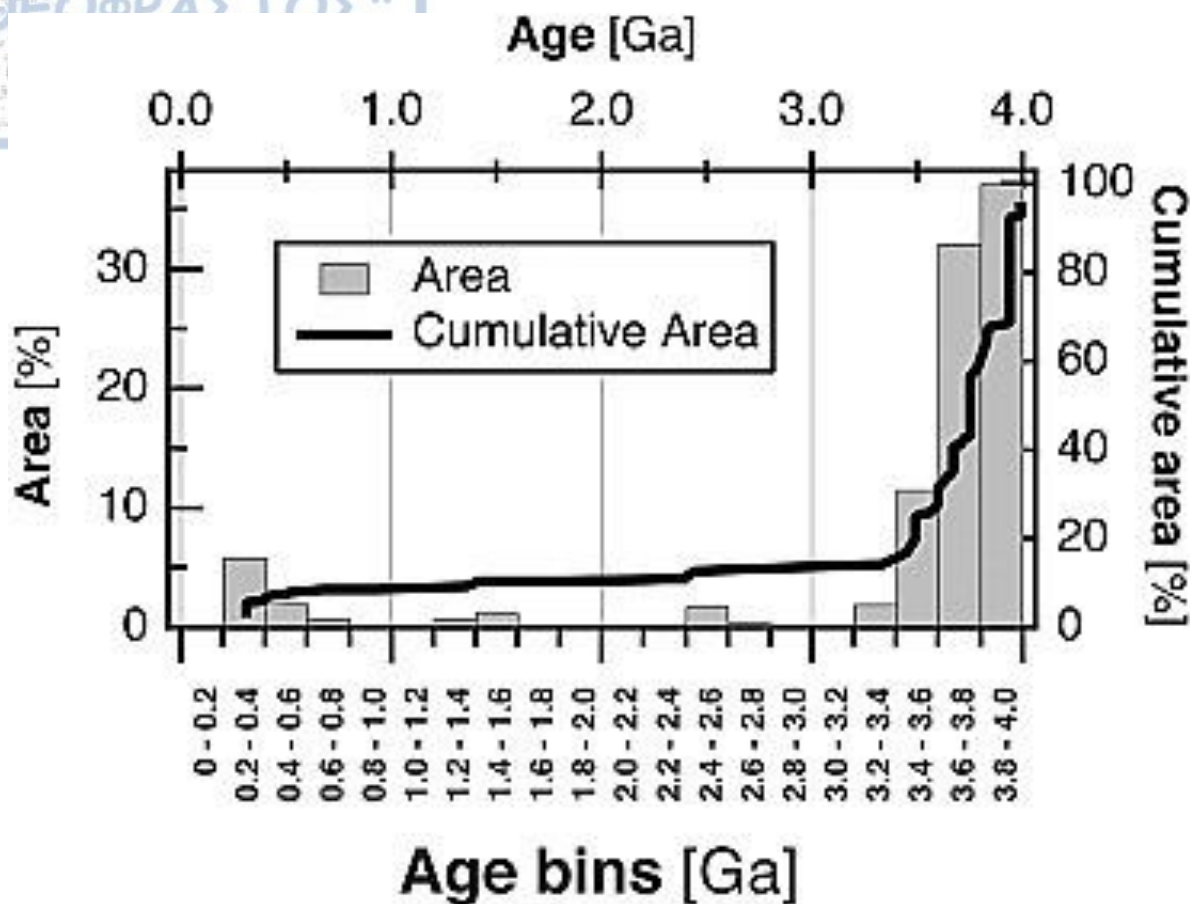
Στον πλανήτη Άρη έχουν χαρτογραφηθεί κανονικά και ανάστροφα ρήγματα. Τα οριζόντια μετατόπισης, τα οποία έχουν χαρτογραφηθεί χωρίς αμφιβολία είναι ελάχιστα. Αυτά τα δεδομένα ευ σταθούν σύμφωνα με τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για τον τεκτονισμό του Άρη. Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης στη Γη συνδέονται με την ύπαρξη τεκτονικών πλακών. Ωστόσο ο Άρης θεωρείται ότι δεν έχει τεκτονικές πλάκες. Ο κόκκινος πλανήτης έχει πολύ μικρότερο μέγεθος από τη Γη. Έτσι ψύχθηκε πολύ πιο γρήγορα και δεν πρόλαβαν να σχηματιστούν τεκτονικές πλάκες. Γι' αυτό το λόγο αναφέρεται και ως πλανήτης της μίας τεκτονικής πλάκας. Βέβαια, θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν συστήματα ρηγμάτων τα οποία φαίνεται να συνδέονται μεταξύ τους, αλλά δεν συνδυάζονται αυτά τα δεδομένα. Κάθε ρήγμα μελετάτε σαν ξεχωριστό και μόνο του.

Για τον εντοπισμό τεκτονικών στοιχείων οι επιστήμονες σχετίζουν δύο δομές στον Άρη. Οι δομές αυτές είναι οι ρυτιδώσεις τις επιφάνειας που εμφανίζονται με τη μορφή κορυφογραμμών και οι γκρεμοί οι οποίοι αποτελούνται από αυλακώσεις. Οι ρυτιδώσεις στην επιφάνεια του Άρη παρατηρούνται κυρίως γύρω από την περιοχή Tharsis, στη περιοχή Hesperia Planum και στη βάση λεκανών όπως στο Isidis. Ο γκρεμοί με τις αυλακώσεις έχουν τεράστιες εκτάσεις και θεωρούνται ρήγματα, τα οποία εύκολα ανιχνεύονται από το MOLA^[10]. Τέτοιοι γκρεμοί έχουν εντοπιστεί στο πεδίο Terra Cimeria και στο πεδίο Arabia Terra. Έχει παρατηρηθεί ότι συχνά προσανατολίζονται παράλληλα με το όριο διαφοροποίησης του Άρη.

Αφού πραγματοποιηθεί η λήψη όλων αυτών των δεδομένων, έπειτα γίνεται χρήση του Γεωγραφικού Πληροφοριακού Συστήματος (GIS) GRASS^[9], το οποίο είναι πολύ δημοφιλές εργαλείο στην πλανητική επιστήμη, καθώς συμπληρώνει, αποθηκεύει και αναλύει όλα αυτά τα δεδομένα με γρήγορο και εύκολο τρόπο.

Επόμενο βήμα είναι η χρονολόγηση των κρατήρων και των ρηγμάτων. Η διαδικασία που ακολουθείται αρχίζει με την καταμέτρηση των κρατήρων στη μελετούμενη περιοχή. Γενικά θεωρούμε την αρχή ότι όσο περισσότεροι κρατήρες υπάρχουν σε μία περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ηλικία. Έτσι οι μετρήσεις των κρατήρων μας δίνουν τη σχετική ηλικία, η οποία υπολογίζεται με τη χρήση του πολυνύμου παραγωγής κρατήρων. Αυτό το πολυνύμο μετράει ο μέγεθος των κρατήρων. Με τη βοήθεια των ελάχιστων τετραγώνων υπολογίζεται η αθροιστική τους συχνότητα, η οποία αντιπροσωπεύει τη σχετική ηλικία των κρατήρων. Σε δεύτερη φάση χρησιμοποιείται ένα μοντέλο το οποίο μας δίνει το χρόνο που πραγματοποιήθηκε η πρόσκρουση και τις απόλυτες ηλικίες. Αυτό το μοντέλο λειτουργεί συγκριτικά με τον αριθμό κρατήρων μεταξύ Άρη και Σελήνης.

Μία ηλικία $3,99\text{Ga}$ δόθηκε στις παλαιότερες γεωλογικές μονάδες του Άρη σύμφωνα με μελέτες. Άρα όλα τα ρήγματα θα πρέπει να είναι νεότερα από αυτή την ηλικία. Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι πρώτα σχηματίστηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί και μετά τα ρήγματα. Οπότε τα ρήγματα θα είναι πάντα μεταγενέστερα των γεωλογικών σχηματισμών που διαρρηγνύουν. Όμως, επειδή ένα ρήγμα μπορεί να σχηματιστεί οποιαδήποτε στιγμή μετά το σχηματισμό του γεωλογικού σχηματισμού, οι ηλικίες των ρηγμάτων αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες.



Εικόνα 40. Σχήματική αναπαράσταση των γεωλογικών σχηματισμών της επιφάνειας του Άρη εντός καθορισμένων ορίων ηλικίας. Το 75% των της επιφάνειας είναι παλαιότερο από 3,5 Ga.(Knapmeyer M. et.al 2006)

Έχουν εντοπιστεί συνολικά 93 γεωλογικοί σχηματισμοί στον πλανήτη Άρη. Κάθε κομμάτι ρήγματος έγινε προσπάθεια να εκχωρηθεί σε μία γεωλογική μονάδα. Όλη αυτή η διεργασία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του παγκόσμιου γεωλογικού χάρτη του Άρη 1:15.000.000, ο οποίος είναι διαθέσιμος και σε ψηφιακή μορφή με ανάλυση 32 pixel/deg. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για να υπάρξουν όσο το δυνατόν πιο έγκυρα αποτελέσματα, έχουν αφαιρεθεί οι κύριες γεωμετρικές μετατοπίσεις σε σχέση με το σκιασμένο ανάγλυφο του MOLA^[10].

Μετά τη λήψη όλων των παραπάνω δεδομένων, γίνεται η ανάλυση της σεισμικής δραστηριότητας ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα. Σε πρώτη φάση εκτιμάται το πλήθος των σεισμικών γεγονότων. Έπειτα αναλύονται αυτοί οι σεισμοί και υπολογίζεται η στιγμή και η συχνότητα παραγωγής. Τέλος πραγματοποιείται αντιστοίχιση των σεισμών αυτών με ρήγματα από τον κατάλογο.

Γενικά για να υπάρξει εφαρμογή των μοντέλων πραγματοποιούνται κάποιες παραδοχές. Αρχικά θεωρούμε ότι όλα τα ρήγματα του πλανήτη παρουσιάζουν τις ίδιες πιθανότητες να παράγουν σεισμούς. Όλοι οι σεισμοί είναι επιφανειακοί, διότι μόνο επιφανειακά δεδομένα έχουμε. Ωστόσο αυτή η παραδοχή θεωρείται αληθής, καθώς βαθύτεροι σεισμοί στη Γη σχετίζονται με την καταβύθιση τεκτονικών πλακών, όπου όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχουν στον Άρη. Ακόμη θεωρούμε ότι δεν παράγονται νέα ρήγματα.

Στηρίζομαστε στην παραδοχή ότι η παγκόσμια συρρίκνωση του πλανήτη, που προκαλείται λόγω ψύξης της λιθόσφαιρας αποτελεί την κύρια πηγή τεκτονισμού σήμερα. Τέλος θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι λόγω έλλειψης γνώσεων της δυναμικής του φλοιού του Άρη, το μοντέλο της σεισμικότητας δεν επεκτείνεται σε μετασεισμικές δραστηριότητες και αλληλουχία σεισμών.

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθούν κάποιοι τύποι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό σεισμικών παραμέτρων.

Το μέγεθος του σεισμού υπολογίζεται από το μέγεθος σεισμικής ροπής M_0 , που ορίζεται :

$$M_0 = \int_A \mu S dA \quad (1)$$

Όπου μ είναι το μέτρο διάτμησης (ακαμψία) του διαρρηγμένου πετρώματος, A η περιοχή ρήξης και το S η ολίσθηση στη περιοχή ρήξης. Η εξίσωση (1) στη συνέχεια μειώνεται :

$$M_0 = \mu S A \quad (2)$$

Επειδή οι περισσότεροι κρίνουν τη σπουδαιότητα του σεισμού από το μέγεθος δίνεται ο τύπος :

$$M_W = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 9.1) \quad (3)$$

Όπου το M_0 δίνεται σε Netwon-μέτρα(Nm)^[4] (ο ορισμός αυτός του μεγέθους ορίζεται από εμπειρικές σχέσεις που βρέθηκαν στη Γη, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στον Άρη εάν προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά διάδοσης των κυμάτων στον Άρη).

Εάν M_{0i} είναι η στιγμική του σεισμού i th, τότε το σύνολο των σεισμών που συμβαίνουν στο χρονικό διάστημα Δt είναι :

$$M_{cum} = \sum_i M_{0i} \quad (4)$$

Αυτό το χρονικό διάστημα συνδέεται με την ένταση σύμφωνα με την εξίσωση :

$$M_{cum} = \eta \bar{\epsilon} V \mu \Delta t \quad (5)$$

όπου V είναι ο όγκος του σεισμικού γεγονότος, το η το οποίο παίρνει τιμές $0 \leq \eta \leq 1$ είναι η σεισμική απόδοση και περιγράφει την ένταση που απελευθερώνεται σε ένα σεισμικό γεγονός σε αντικατάσταση των ασεισμικών παραμορφώσεων.

Ο σεισμολογικός όγκος είναι ο όγκος σεισμογενούς λιθόσφαιρας και θεωρείται ότι είναι ένα σφαιρικό "κελύφος" με ακτίνα που αντιστοιχεί στην πλανητική ακτίνα R_P και σε ένα συγκεκριμένο πάχος. Ο όγκος αυτού του "κελύφους" δίνεται από τον τύπο :

$$V = \frac{4}{3}\pi [R_P^3 - (R_P - H)^3] \quad (6)$$

Ο βαθμός καταπόνησης λόγω της συρρίκνωσης του πλανήτη δίνεται κατά προσέγγιση από τη συρρίκνωση του κελύφους του τύπου (6). Υπολογίζεται ο βς καταπόνησης :

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{H \left(R_P - \frac{H}{2} \right)^2} \int_{R_P-H}^{R_P} \alpha \dot{T} r^2 dr \quad (7)$$

Γίνεται η υπόθεση ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής α και η εξίσωση του ρυθμού ψύξης είναι σταθερά σε ολόκληρη τη σεισμική λιθόσφαιρα. Η ολοκλήρωση στη συνέχεια μπορεί να λυθεί εύκολα με την εισαγωγή της (6) έχουμε :

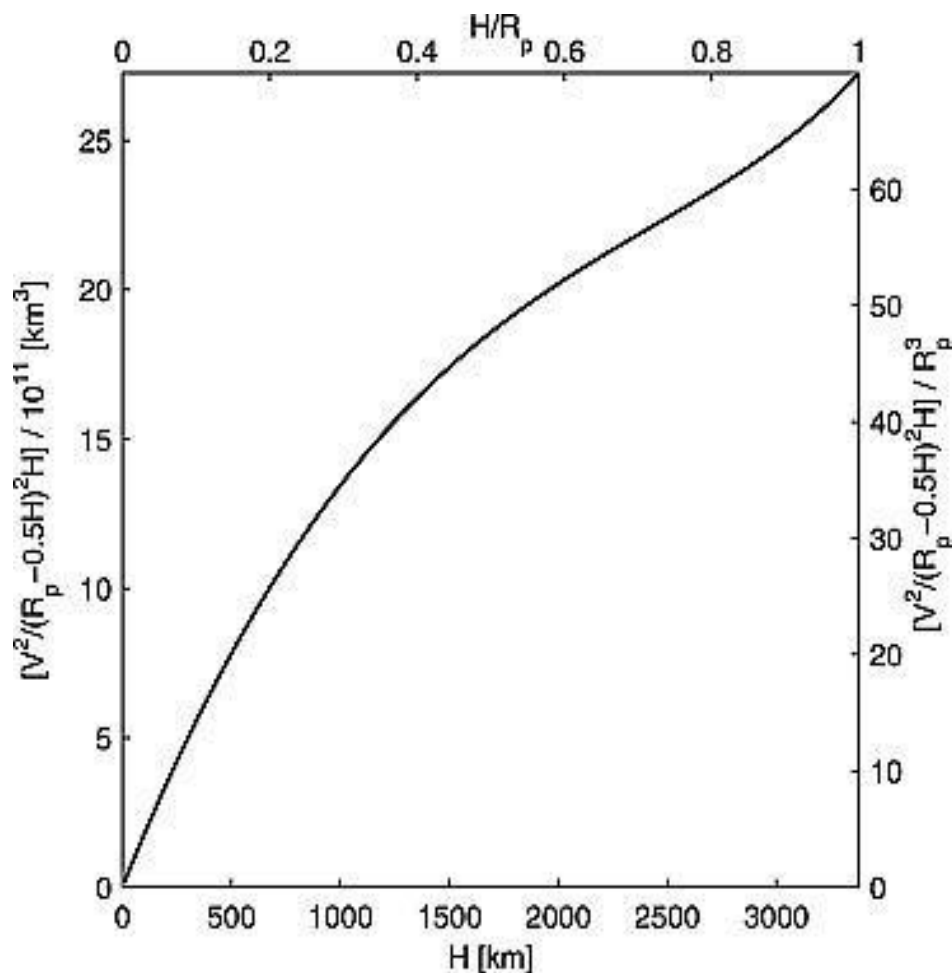
$$\dot{\epsilon} = \frac{\alpha \dot{T} V}{4\pi H \left(R_p - \frac{H}{2} \right)^2} \quad (8)$$

Τώρα εάν εισαχθεί η (8) εισαχθεί στη (5) έχουμε :

$$M_{cum} = \eta \mu \alpha \dot{T} \Delta t \frac{V^2}{4\pi H \left(R_p - \frac{H}{2} \right)^2} \quad (9)$$

όπου είναι η αθροιστική σεισμική ροπή σε χρονικό διάστημα Δt .

Για ένα μικρό πάχος H της σεισμογενούς λιθόσφαιρας , ο γεωμετρικός όρος $V^2/4\pi H (R_p - H/2)^2$ είναι ουσιαστικά μία γραμμική συνάρτηση του H και η συνολική σεισμική ροπή είναι περίπου ανάλογη του H . Χρησιμοποιείται η γραμμική προσέγγισή μόνο έως κανόνας (χρησιμοποιείται πιο ακριβής φόρμα στους υπολογισμούς).



Εικόνα 41. Συνάρτηση του M_{cum} από το πάχος του στρώματος H . Οι άξονες y και x δίνουν τις απόλυτες τιμές. Ο πάνω άξονας και ο δεξιά δίνουν τις κλίμακες που λαμβάνονται με την προσαρμογή R_p και R_p^3 αντίστοιχα...(Knappmeyer M. et.al 2006)

Η εξίσωση (9) αποτελεί το κατώτερο όριο της συνολικής ροπής λόγω της θερμικής συρρίκνωσης, αφού θεωρεί δεδομένο μόνο τη συστολή της ανώτερης λιθοσφαιρικού φλοιού.

Ωστόσο η συνολική μεταβολή της ακτίνας επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως η ψύξη ολόκληρου του μανδύα, ο ενδεχομένως ψυχρός πυρήνας και η μερική στερεοποίηση τήγματος.

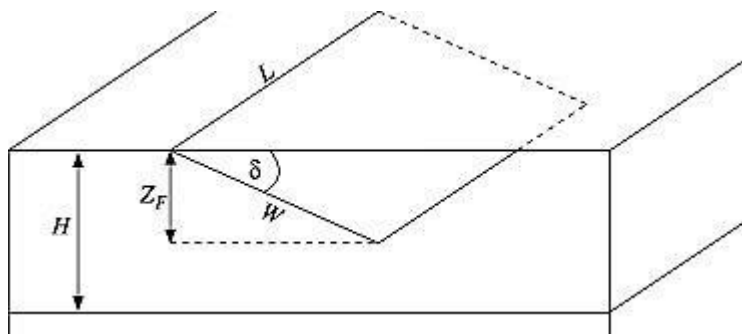
Η κατανομή μεγέθους-συχνότητας των σεισμών συχνά περιγράφεται από την γραμμική κατανομή Gutenberg - Richter

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (10)$$

Όπου $N(M)$ είναι ο αριθμός σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου από M . Οι παράμετροι a και b είναι εμπειρικές.

Η συγκεκριμένη κατανομή είναι έγκυρη μόνο σε συγκεκριμένο εύρος μεγεθών. Όταν τείνει προς μικρά μεγέθη οι κατάλογοι των σεισμών είναι ελλιπείς, επειδή είναι περιορισμένη η ευαισθησία των σεισμομέτρων. Άρα οποιοσδήποτε πραγματικός κατάλογος για μικρά μεγέθη δεν ακολουθεί την κατανομή των Gutenberg-Richter. Από την άλλη, για μεγάλα μεγέθη η πραγματική συχνότητα είναι σημαντικά μικρότερη από την προβλεπόμενη κατανομή Gutenberg-Richter σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής (Kagan 2002). Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι η σεισμική ροπή είναι πιο σωστό να χρησιμοποιείται αντί του μεγέθους.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση στη γεωμετρία ρήξης λόγω της δράσης ρήγματος. Εάν είναι γνωστό μόνο το μήκος του ρήγματος θεωρείται ότι η ρήξη ακολουθεί τη γεωμετρία του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 42 . Γεωμετρία ρήγματος. Όπου H σεισμικό βάθος, Z_F βάθος ρήγματος, L μήκος σφάλματος, W πλάτος ρήγματος, δ γωνία ρήγματος. (M.Knapmeyer et.al 2006 από Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity)

Η περιοχή διάρρηξης αποτελεί ένα ορθογώνιο που καταβυθίζεται με γωνία δ , μήκος L και πλάτος w . Για ρήγματα που δεν φθάνουν στο μέγιστο βάθος H , δηλαδή στο πάχος της σεισμογενούς λιθόσφαιρας, θεωρείται μία σταθερή αναλογία $a=L/w$. Αυτό δημιουργεί μία διάκριση μεταξύ μικρών και μεγάλων ρηγμάτων. Τα μικρά ρήγματα φθάνουν σε μικρά βάθη $Z_F < H$ και το εύρος θραύσης τους είναι :

$$W_{short} = L / a \quad (11)$$

Για μεγάλα ρήγματα το πλάτος ρήξης είναι :

$$W_{\text{long}} = H / \sin \delta \quad (12)$$

Για ρήγμα λοιπόν με δεδομένο μήκος L, θεωρείται ότι το εύρος δύναται από τον τύπο :

$$W = \min(W_{\text{long}}, W_{\text{short}})$$

Τέλος για να έχουμε τη σχέση χρόνου - μήκους, θα πρέπει να καθοριστεί η εξίσωση σχηματικά, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Μία προσομοίωση σεισμού με σεισμική ροπή M_{sim} μπορεί να θεωρηθεί ότι προκαλείται από χαρτογραφημένο ρήγμα μήκους L αν και μόνον αν $M_{\text{sim}} < M_0$ (όπου $M_0 = (2/\pi) * (\Delta\sigma / (\pi * (1-\nu)) * L_{\text{min}} * ((H/\sin\delta) * (L/a)))$

Κατά προσέγγιση έχει υπολογιστεί το πάχος της σεισμογόνου λιθόσφαιρας κατά το παρελθόν. Το βάθος των ρηγμάτων στην περιοχή Amethes Rupes είναι 25-30 χλμ. Αυτό το βάθος θεωρείται κατά μέσο όρο το πάχος της σεισμογόνου λιθόσφαιρας. Αντίθετα το πάχος της ελαστικής λιθόσφαιρας παρουσιάζει πολύ μεγάλη μεταβλητότητα 2-200 χλμ. Ωστόσο η σημερινή σεισμική δραστηριότητα είναι πολύ διαφορετική από αυτούς τους υπολογισμούς.

Η θερμική εξέλιξη επηρεάζει σαφώς το πάχος της σεισμογόνου λιθόσφαιρας και θα αναλυθεί παρακάτω. Οι ισόθερμες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του σεισμογόνου στρώματος είναι των 573k, 873k και 1073k. Ως κέντρο μίας σεισμικής ζώνης θεωρείται η ισόθερμη των 573k. Το πιο συνηθισμένο υλικό του γήινου φλοιού, ο χαλαζίας, γίνεται πλαστικός πάνω από αυτή τη θερμοκρασία. Ωστόσο ο φλοιός του Άρη θεωρείται βασαλτικός και ανδεδιτικός. Έτσι για τους υπολογισμούς του πάχους χρησιμοποιούνται η ισόθερμη των 1073k. Να τονιστεί ότι το βάθος αυτό δεν είναι ξεκάθαρο. Αναφορικά η ισόθερμη των 1073k συνδέεται με ενδοπλακική σεισμικότητα στον ωκεάνιο γήινο φλοιό.

Κατά κανόνα τα κανονικά ρήγματα έχουν μεγαλύτερη γωνία βύθισης από τα ανάστροφα. Η γωνία βύθισης των ανάστροφων ρηγμάτων για τον πλανήτη Άρη είναι 25° και για τα κανονικά 60°.

Ο ρυθμός ψύξης μέχρι το βάθος της ισόθερμης των 573K (ανώτατη λιθόσφαιρα) ψύχεται σύμφωνα με την εξίσωση $0,2 * 10^{-7} \text{ k yr}^{-1}$. Τα βαθύτερα στρώματα ψύχονται πιο αργά. Στα βάθη των ισόθερμων 873K και 1073K, ο ρυθμός ψύξης δίνεται από τον τύπο $0,5 * 10^{-7} \text{ k yr}^{-1}$. Οι εξισώσεις $0,2 * 10^{-7} \text{ k yr}^{-1}$ και $1,1 * 10^{-7} \text{ k yr}^{-1}$ χρησιμοποιούνται ως ακραίες περιπτώσεις.

Στη Γη οι περισσότεροι σεισμοί συμβαίνουν στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών και οφείλονται στην σχετική κίνησή τους. Αντίθετα στον Άρη, ο οποίος θεωρείται πλανήτης μίας τεκτονικής πλάκας, οι σεισμοί είναι τύπου ενδοπλακικών σεισμών.

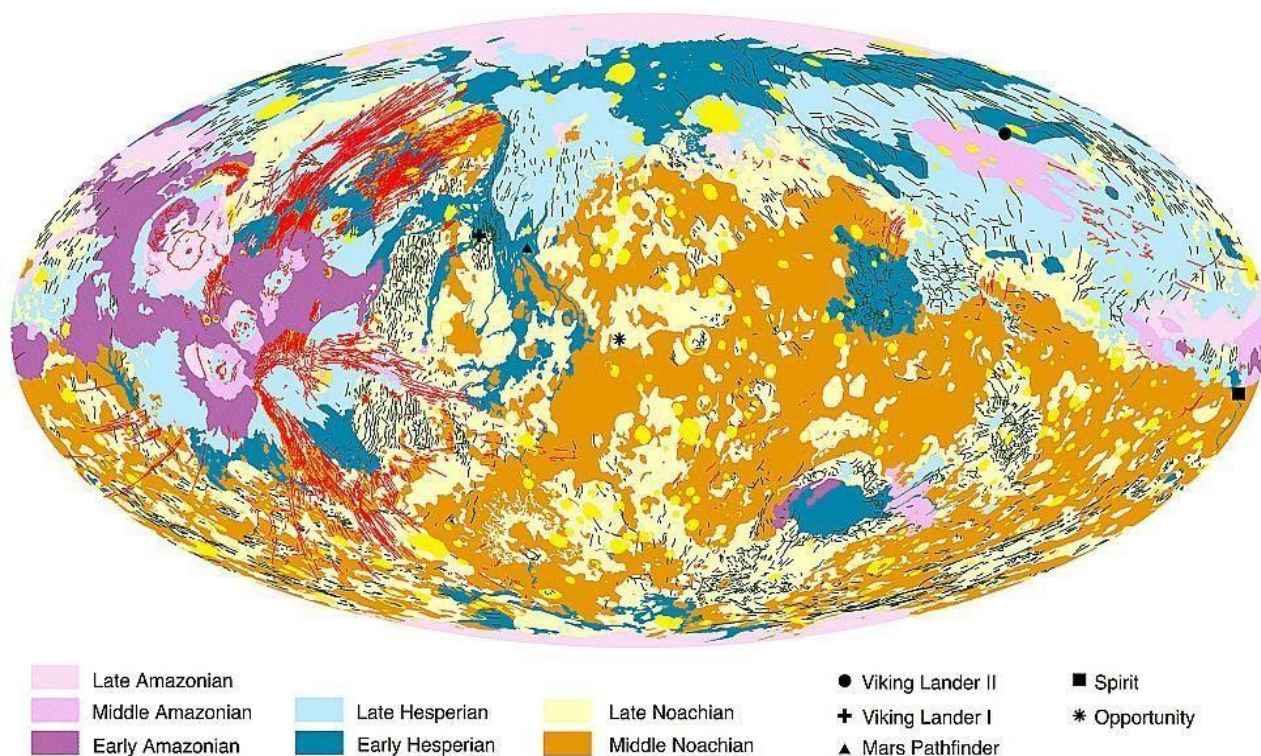
Το δυνητικό μέγεθος του μεγαλύτερου αρειανού σεισμού δεν μπορεί να εκτιμηθεί ακόμη και αν υπάρχουν κάποια μέγιστα για ρήγματα. Εάν ληφθούν υπόψιν μόνο τα μήκη των ρηγμάτων σύμφωνα με τον κατάλογο αυτής της εργασίας, το μέγιστο μέγεθος σεισμού είναι $M_w = 9,7$. Δηλαδή μέγεθος πάνω από το διπλάσιο του σεισμού της Χιλής το 1960 $M_w = 9,4$ (ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος σεισμός που έχει παρατηρηθεί στη Γη μέχρι σήμερα). Άρα αυτές οι τιμές σίγουρα είναι υπερεκτιμημένες.

Αντιθέτως εάν γίνει η υπόθεση ότι ο μεγαλύτερος δυνατός σεισμός στον Άρη προκαλείται από ένα μόνο σεισμικό γεγονός και απελευθερώνει την ετήσια συσσωρευμένη ένταση, τότε έχουμε πολύ μικρότερες τιμές $M_w = 4,9-6,4$, οι οποίες υποτιμούν το μέγιστο μέγεθος. Γενικά γίνεται αποδεκτός ένας μέσος όρος $M_w = 4,9...7,6$.

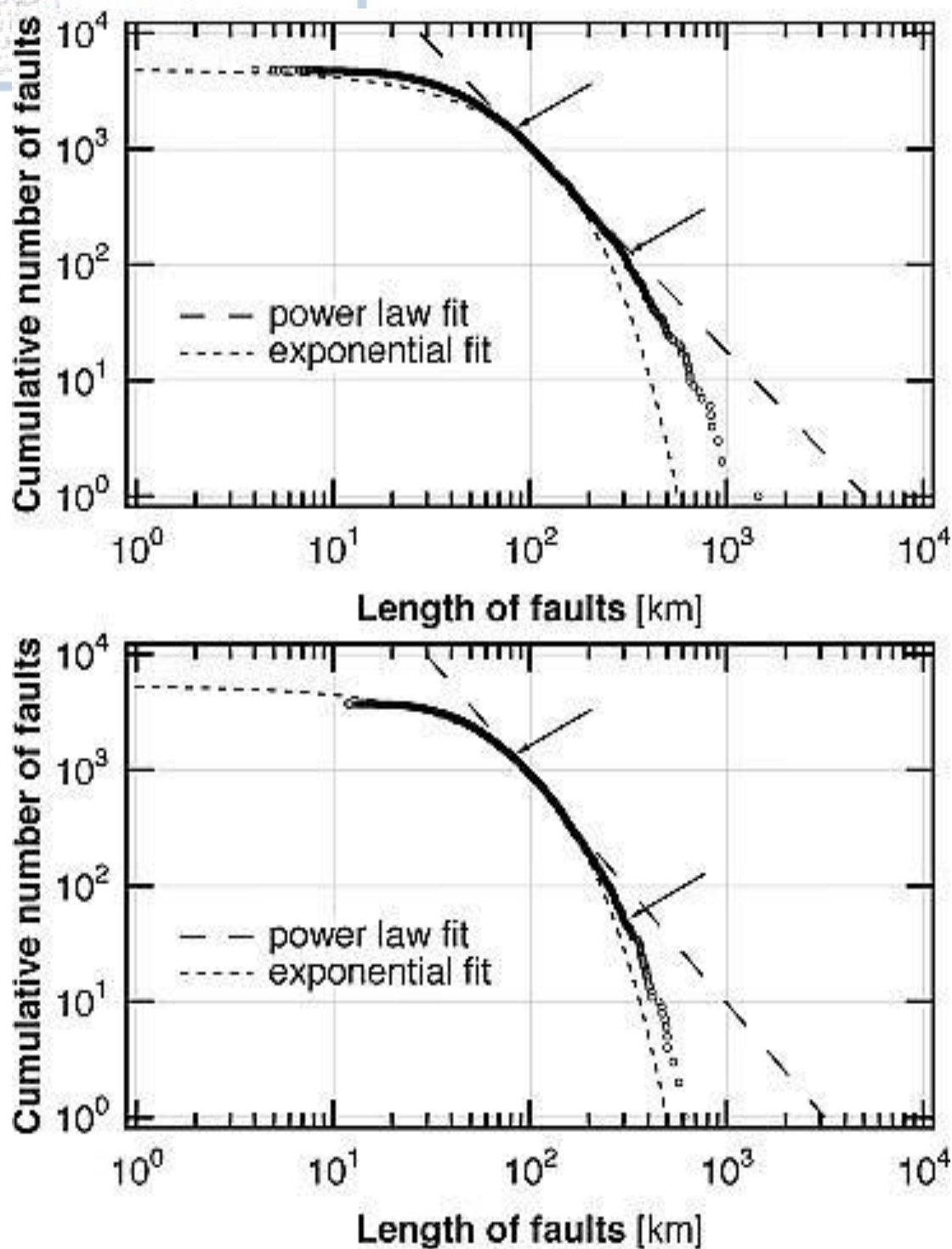
Υπολογισμοί δείχνουν ότι στον Άρη το 60% όλων των σεισμικών συμβάντων με μέγεθος μεγαλύτερο από $M_w = 2,6$ μπορούν να ανιχνευτούν από ένα σεισμικό δίκτυο τεσσάρων σταθμών. Έτσι μόνο τέτοιοι σεισμοί περιέχονται στον κατάλογο. Οι μικρότεροι είναι πολυάριθμοι και δύσκολα εκχωρούνται.

Γενικά έχουν διακριθεί δύο περιπτώσεις για να εξηγήσουν την ενεργότητα των ρηγμάτων στο κόκκινο πλανήτη. Αυτές οι παραδοχές στηρίζονται στην υποτιθέμενη τελευταία σεισμική δραστηριότητα του ρήγματος. Κατά πρώτη θεώρηση, όλα τα ρήγματα που έχουν χαρτογραφηθεί στον Άρη είναι ενεργά σήμερα. Έτσι υπάρχει μεγάλο εύρος σεισμικότητας σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη. Κατά δεύτερη θεώρηση, μόνο ρήγματα με ηλικία $< 500\text{Ma}$ που έχουν χαρτογραφηθεί είναι ενεργά. Άρα υπάρχει περιορισμός της σεισμικότητας σε λίγες περιοχές.

Έχουν καταγραφεί 3737 ανάστροφα ρήγματα και 4764 κανονικά, που κυμαίνονται μεταξύ 4 και 1445 χλμ. Το συνολικό μήκος όλων των ρηγμάτων είναι 680.000 χλμ. Χρησιμοποιώντας το γεωλογικό χάρτη, κάθε τμήμα ρήγματος εκχωρήθηκε σε μία γεωλογική περιοχή με μία συγκεκριμένη ηλικία.



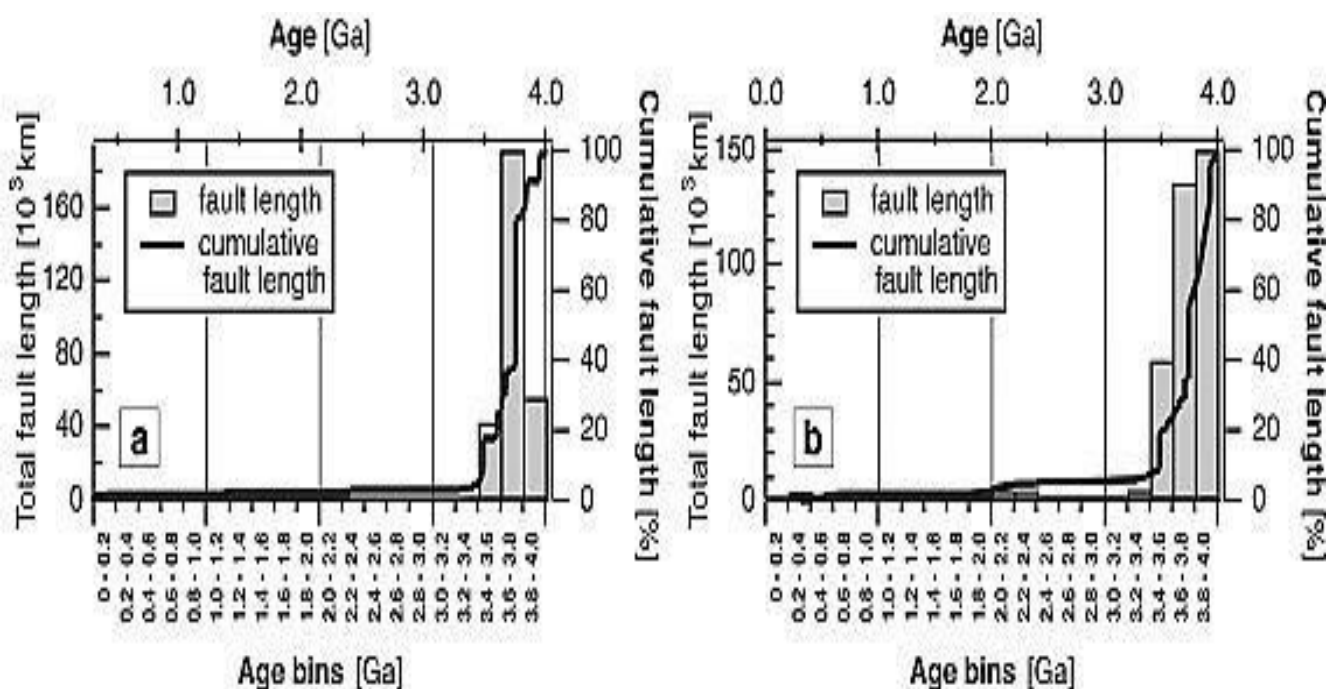
Εικόνα 43. Χάρτης χρονολογμένης αρειανής επιφάνειας. Στο χάρτη μπορούμε να διακρίνουμε τα κανονικά ρήγματα (κόκκινο χρώμα) και τα ανάστροφα ρήγματα (πράσινο χρώμα). Επίσης τα χρώματα στην επιφάνεια αντιστοιχούν στις επτά κύριες γεωλογικές εποχές του πλανήτη. Οι μαύρες κουκίδες δείχνουν τις θέσεις των επιτυχημένων αποστολών (έως το 2006)..(Knapmeyer M. et.al 2006)



Εικόνα 44. Σχηματική απεικόνιση του συνολικού πλήθους ρηγμάτων προς το συνολικό μήκος. Το επάνω σχήμα αναφέρεται στα εκτατικά ρήγματα και το κάτω στα συμπιεστικά ρήγματα. Έχουν ληφθεί υπόψιν ρήγματα με μήκος 80-30 χλμ. Τα παραπάνω σχήματα έχουν βασιστεί πάνω σε ένα σύνολο δεδομένων από το MOLA..(Knapmeyer M. et.al 2006)

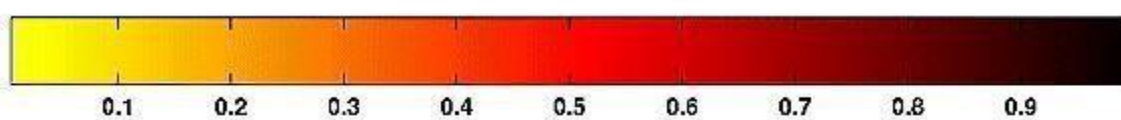
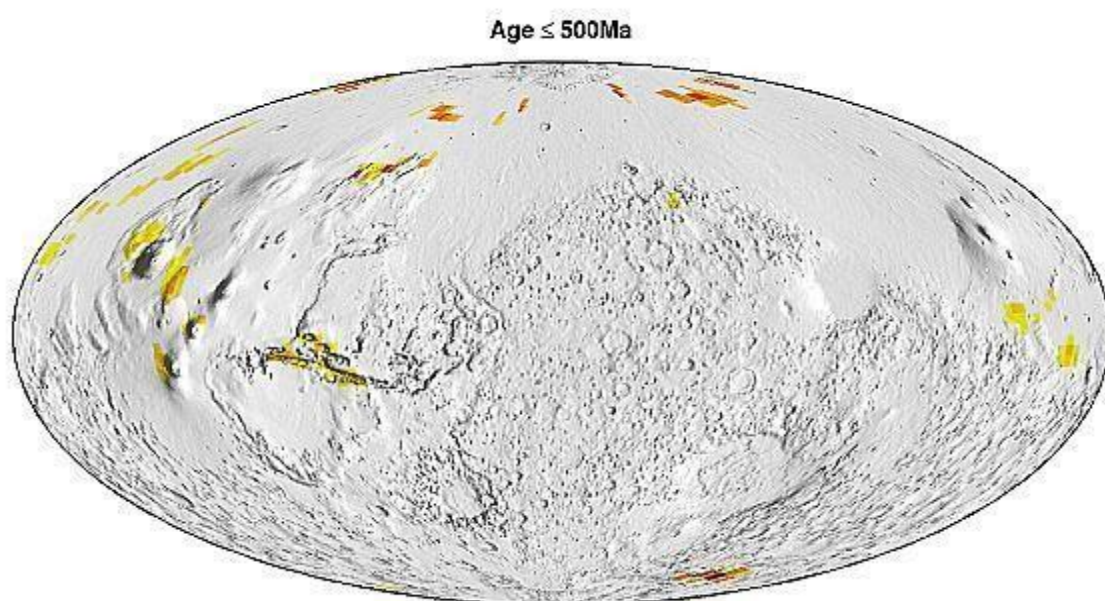
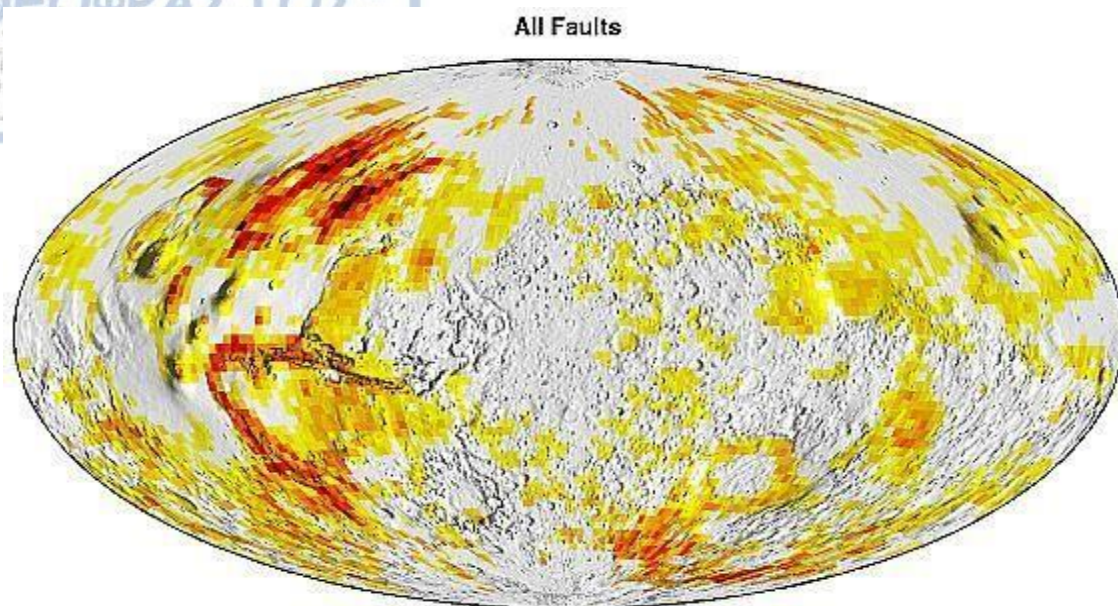
Η κατανομή μεγέθους-πλήθους ρηγμάτων περιγράφεται συχνά από τον τύπο $N(L) = aL^{-c}$, όπου $N(L)$ ο αθροιστικός αριθμός ρηγμάτων μεγαλύτερος ή ίσος του L , a παράμετρος που σχετίζεται με το μέγεθος του δείγματος και $-c$ εκθέτης που βασίζεται σε νόμους του τύπου. Η εφαρμογή του τύπου έχει επιλεγεί να γίνεται μόνο σε ρήγματα μήκους 80-300 χλμ. Τα αποτελέσματα δίνουν τιμές 1,97 για συμπιεστικά ρήγματα και 1,77 για εκτατικά. Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με αντίστοιχες τιμές ρηγμάτων στην Γη.

Αν και τα περισσότερα ρήγματα δημιουργήθηκαν στο ανώτερο Noachian και Hesperion^[8], όταν η δημιουργία ηφαιστειών ήταν έντονη, δεν παρατηρείται ξεκάθαρη χρονική εξάρτηση με τη δημιουργία μικρότερων και μεγαλύτερων ρηγμάτων. Επομένως, η σχέση μεγέθους-πλήθους, είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου.



Εικόνα 45. Απεικόνιση του απόλυτου μήκους ρήγματος και του σχετικού μήκους ρήγματος σε σχέση με την ηλικία. Το a σχήμα απευθύνεται σε ανάστροφα ρήγματα και το b σε κανονικά..(Knappmeyer M. et.al 2006)

Υποθέτουμε ότι στον Άρη όλα τα ενεργά ρήγματα έχουν την ίδια πιθανότητα να παράγουν σεισμούς. Ωστόσο μικρά ρήγματα δεν χαρτογραφήθηκαν καθώς λόγω πλήθους θα προκαλούσαν σύγχυση στα αποτελέσματα τις εργασίας. Μολαταύτα, ο χάρτης της παρακάτω εικόνας δείχνει περιοχές όπου θα μπορούσε να εμφανιστεί σεισμικότητα από μικρά ρήγματα και για τις δύο περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 46. Η παραπάνω εικόνα βασίζεται σε δεδομένα MOLA..(Knappmeyer M. et.al 2006)

Στην περίπτωση που όλα τα ρήγματα στον Άρη είναι ενεργά τότε έχουμε μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης σεισμών στο βύθισμα Thrasis, με τοπικά ακραία σημεία τις περιοχές Acheron, Ulysses και Claritas Fossae, Valles Marineris, Alba Patera με το χαρακτηριστικό δίκτυο ρηγμάτων τύπου ορολογιού και το πεδίο Tempe Terra. Κάπως πιο απομονωμένες περιοχές με αυξημένη πιθανότητα είναι το πεδίο Hesperia Planum και το Malea Planum.

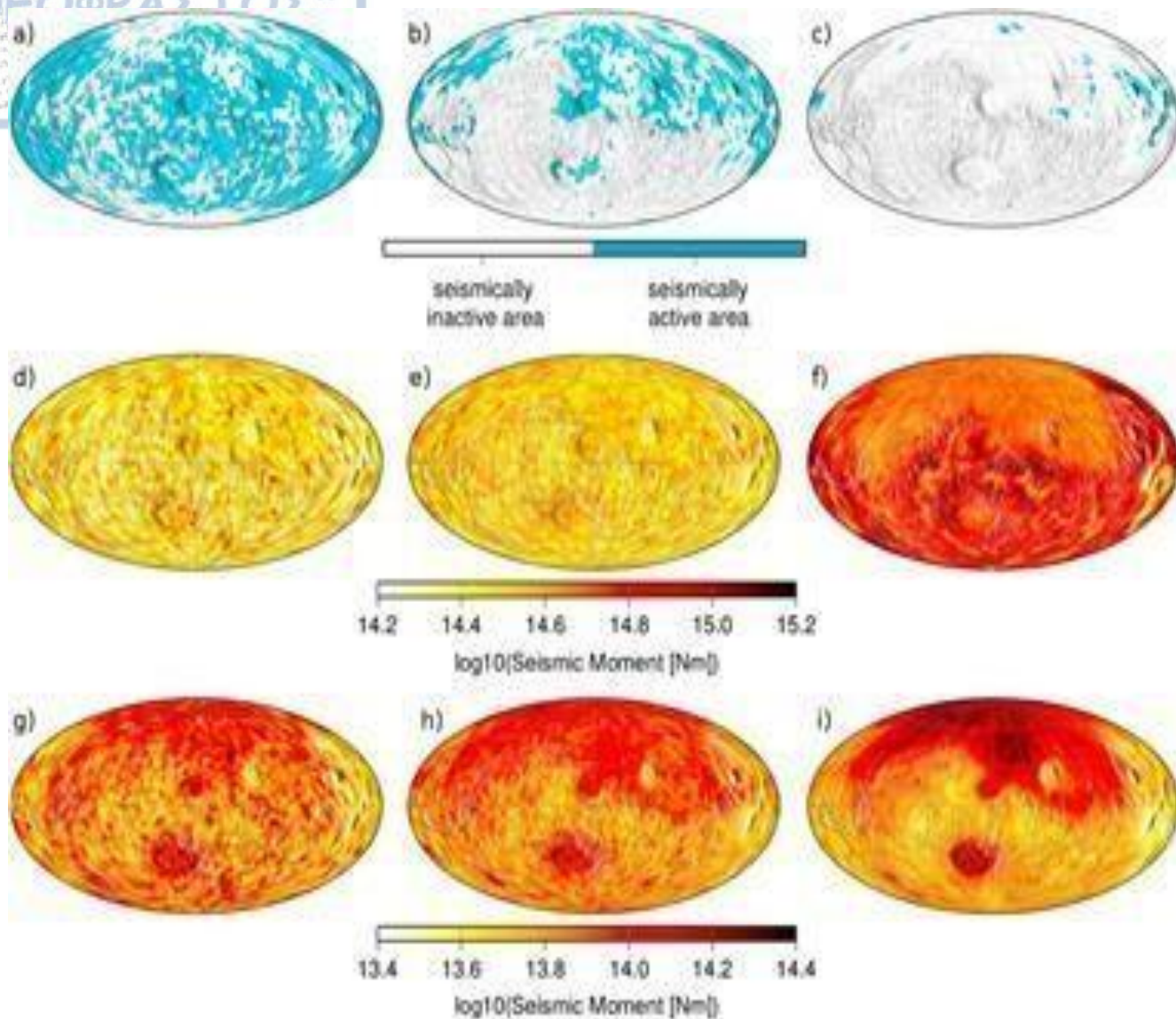
Αντιθέτως στην περίπτωση όπου ενεργά ρήγματα είναι μόνον αυτά τα οποία είναι νεότερα των 500 Ma τότε οι περιοχές με ενεργό τεκτονική μειώνονται. Μόνο ένα μικρό κομμάτι του Acheron Fossae φέρει κάποια σεισμική δραστηριότητα. Η ενεργή τεκτονική της περιοχής Arsia και της Pavonis Mons αυξάνεται όπως και σε μερικές ορισμένες πεδιάδες στο πεδίο Elysium Platia και Terra Cimmeria.

Σε αυτή την εργασία έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες παραδοχές για να δημιουργηθεί ο κατάλογος ρηγμάτων. Αρχικά αναφέρεται ότι τα δεδομένα λήφθηκαν από την ελεγχόμενη εναλλαγή του φωτός στις εικόνες από το MOLA^[10]. Επίσης οι ηλικίες των σχηματισμών που έχουν προαναφραθεί είναι θεωρητικές και ίσως δεν αντιστοιχούν στα σημερινά δεδομένα. Όλα τα σεισμικά γεγονότα που έχουν καταγραφεί είναι επιφανειακά και συμβαίνουν από προ υπάρχοντα ρήγματα. Δεν μπορούν ακόμη να πραγματοποιηθούν μελέτες στο βάθος. Η θεώρηση πως όλα τα ρήγματα είναι ενεργά και αυτόνομα αποτελεί μία υπεραπλούστευση χάριν της εργασίας. Επίσης πολύ μικρά ρήγματα δεν έχουν χαρτογραφηθεί.

Παρουσιάζεται ένας παγκόσμιος κατάλογος ρηγμάτων που παρουσιάζει πάνω από 8000 κανονικά και ανάστροφα ρήγματα.

Στη συγκεκριμένη εργασία όλα τα δεδομένα προέρχονται από εικόνες. Οπότε τα αποτελέσματα είναι σχετικά και υποκειμενικά και χρειάζονται μελλοντικές αναθεωρήσεις. Ωστόσο μέσω αυτής της μελέτης δίνεται το ερέθισμα για περεταίρω μελέτη της σεισμικότητας και τεκτονικής του Άρη. Τέλος, η εργασία χρησιμοποιεί 5 μοντέλα σεισμικότητας^{[5][6][7]} τα οποία εξαρτώνται από τα χαρτογραφημένα ρήγματα και τις ηλικίες των γεωλογικών μονάδων.

Η πιο πρόσφατη μελέτη σχετικά με την έκτασή της σημερινής σεισμικής δραστηριότητας στον Άρη από τον Knapmeyer M. et al. η οποία βασίζεται στη ‘‘Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity’’ είναι η ‘‘Present-Day Mars' Seismicity Predicted From 3-D Thermal Evolution Models of Interior Dynamics’’ και δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Geophysical Research Letters νωρίτερα το 2018. Η εργασία χρησιμοποιεί τα σεισμικά μοντέλα της προηγούμενης, ωστόσο με μία σφαιρική γεωμετρία 3-D για να αξιολογηθούν το μέγεθος και η χωρική κατανομή της σημερινής σεισμικής δραστηριότητας του Άρη. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας είναι παρόμοια με αυτά που πραγματοποιήθηκαν το 2006 αλλά πιο εξελιγμένα και αξιόπιστα καθώς χρησιμοποιείται πιο πρόσφατη τεχνολογία. Τα μελλοντικά σεισμικά δεδομένα που θα δοθούν από το InSight θα παρέχουν σίγουρα τα καλύτερα και πιο αξιόπιστα δεδομένα αφού θα πραγματοποιηθούν επί τόπου μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 47. Η παραπάνω εικόνα αποτελεί τη γεωγραφική κατανομή των ενδεχομένως σεισμικά ενεργών περιοχών στον Άρη σύμφωνα με τον κατάλογο ρηγμάτων του Knapmeyer. Στην εικόνα α εξετάζονται όλα τα ρήγματα. Στην εικόνα β μόνο ρήγματα με ηλικία <3700 Ma. Στην εικόνα γ ρήγματα που χρονολογούνται στην περίοδο Amazonian. Οι λευκές περιοχές αντιπροσωπεύουν περιοχές με μηδενική σεισμική δραστηριότητα. Η χωρική κατανομή των σεισμικών γεγονότων βασίζεται σε 3-D μοντέλα για την θερμική εξέλιξη. Τα σχήματα ε, f, και g σχετίζονται με τα μοντέλα σεισμικότητας όπως έχουν προαναφερθεί και την ισόθερμο των 1073k.

ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΡΗ

Η διδασκαλία της γεωλογίας του Άρη είναι ένα δύσκολο θέμα απέναντί στο οποίο θα μπορούσε να βρεθεί ένας εκπαιδευτικός. Βασική προϋπόθεση είναι η καλή γνώση της επιστήμης της Γεωλογίας ούτως ώστε να μπορέσει πιο εύκολα να γίνει κατανοητή η ιδιόμορφη και άγνωστη πολλές φορές γεωλογία άλλων πλανητών. Ακόμη βασική είναι και η καλή γνώση της φυσικής και κατ' επέκταση αστροφυσικής με την οποία θα πρέπει να υπάρχει εξοικείωση. Τέλος η γνώση και η χρήση διάφορων προγραμμάτων και αλγορίθμων διότι διεξαγωγή συμπερασμάτων της γεωλογίας (και όχι μόνο) άλλων πλανητών πραγματοποιείται μέσω φωτογραφιών και της επεξεργασίας τους.

Ο Άρης έχει παραμείνει αντικείμενο γοητείας για πολλά χρόνια στην ιστορία του ανθρώπου. Ειδικά τώρα όπου υπάρχουν δηλώσεις για επικείμενες επανδρωμένες αποστολές, την ύπαρξη νερού ίσως και κάποιας αρχέγονης μορφής ζωής η διδασκαλία για περαιτέρω γνώση αυτού του πλανήτη φαίνεται πολύ σημαντική.

Στάδια διδασκαλίας:

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στην αρχή δημιουργίας του σύμπαντος και έπειτα πιο συγκεκριμένα του ηλιακού μας συστήματος. Έπειτα επικεντρωνόμαστε στον πλανήτη Άρη από την στιγμή που άρχισε σαν άμορφη μάζα αποτελούμενη από αέρα και βράχους, να συρρικνώνεται περνώντας το σφαιρικό σχήμα του πλανήτη. Στη συνέχεια ο πλανήτης έχει ακραίες συνθήκες με έντονες ηφαιστειακές εκρήξεις και αναταραχές, πολύ πιο πυκνή ατμόσφαιρα και οι συνθήκες αυτές πολλές φορές παρομοιάζονται με αυτές της Γης. Σε αυτό το σημείο γίνεται η άμεση σύγκριση των συνθηκών που επικρατούσαν στη Γη κατά τα πρώτα στάδια δημιουργίας της με τα αντίστοιχα του Άρη και τονίζονται τα κοινά τους σημεία.

Τέλος ερχόμαστε στη σημερινή κατάσταση του Άρη, όπου δίνεται βάση στη σημερινή γεωλογική κατάσταση. Είναι ένας έρημος πλανήτης, με πολύ αραιή ατμόσφαιρα, χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα από την οξείδωση του σιδήρου. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι ο Άρης είναι ένας μονότονος πλανήτης, χωρίς ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Από που αντλείται λοιπόν όλο αυτό το ενδιαφέρον; Σε αυτό το σημείο εισέρχεται καθαρά η σημαντικότητα της γεωλογίας και συγκεκριμένα της πλανητικής γεωλογίας. Ο πλανήτης έχει έντονα γεωλογικό ενδιαφέρον. Τεράστια ηφαιστεία έχουν βρεθεί, το μεγαλύτερο όρος του ηλιακού μας συστήματος (Olympus Mons), η ύπαρξη νερού ίσως και τρεχούμενου, η πιθανή σεισμικότητα, η ύπαρξη εποχών και άλλα πολλά κάνουν τον μαθητευόμενο να επικεντρώσει το ενδιαφέρον του στο συγκεκριμένο θέμα.

Σε αυτό το σημείο μπορούν να δοθούν διάφορες εικόνες στους μαθητές και φοιτητές για καλύτερη κατανόηση. Αρχικά ένας χάρτης του ηλιακού μας συστήματος για να εντοπιστεί η θέση του Άρη σε σχέση με τη Γη και τον Ήλιο. Έπειτα πανοραμικές εικόνες της Γης και του Άρη στις οποίες μπορεί ο καθηγητής να ζητήσει ομοιότητες και διαφορές των δύο πλανητών.

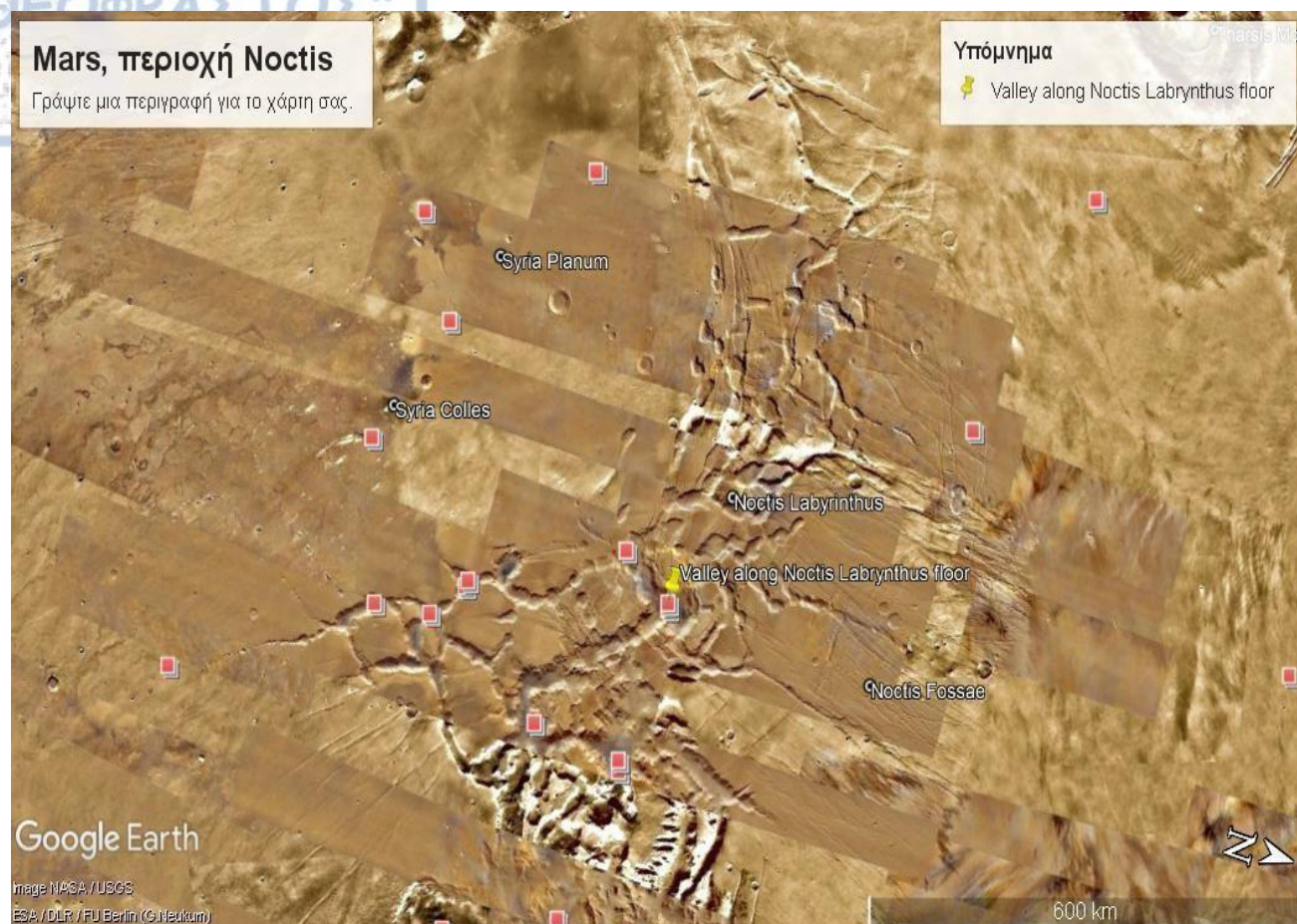
Στη συνέχεια έρχεται το πρακτικό κομμάτι της διδασκαλίας. Δηλαδή στον τρόπο που αντλείται όλη αυτή η γνώση.

Η κύρια πηγή πληροφοριών είναι οι φωτογραφίες από τον πλανήτη Άρη οι οποίες προέρχονται από τηλεσκόπια, δορυφόρους που διατρέχουν τον πλανήτη και διάφορες διαστημοσυσκευές που έχουν αποσταλεί. Σε πρώτη φάση θα μπορούσαν να δοθούν φωτογραφίες από δορυφόρους ή αεροπλάνα οι οποίες να απεικονίζουν σημαντικά γεωλογικά συμβάντα που συνέβησαν στη Γη τα τελευταία χρόνια (σεισμός προκαλεί θραυσμό και μετακίνηση βράχου, έκρηξη ηφαιστείου παράγει συναφή αέρια και πολλές φορές ροές λάβας κ.α). Με τον τρόπο αυτό είναι εξοικειώνεται ο μαθητευόμενος με την παρατήρηση γεωλογικών δομών από φωτογραφία, όπως επίσης παρατηρεί τις παραμορφώσεις που προκαλούνται αφού έχει και άφθονα επι τόπου δεδομένα. Οι τρεις σημαντικές γεωλογικές διεργασίες που εντοπίζονται με τη χρήση φωτογραφιών είναι η πρόσκρουση μετεωρίτη, ο τεκτονισμός και η ηφαιστειότητα. Στη συνέχεια δίνονται αντίστοιχες φωτογραφίες από την επιφάνεια του Άρη και αναγνωρίζονται οι δομές του. Επίσης μπορούν να δοθούν στερεοσκοπικές φωτογραφίες από την επιφάνεια της Γης και του Άρη έτσι ώστε να έχει ο μαθητής τρισδιάστατη αίσθηση των δομών.

Ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην διδασκαλία της γεωλογίας του Άρη αποτελεί η χρήση του προγράμματος Google Earth. Τα τελευταία χρόνια στην εφαρμογή Google Earth υπάρχει η επιλογή πλανητικού σώματος ανάμεσα στη Γη, τη Σελήνη και τον Άρη. Στην όψη του πλανήτη Άρη μπορούμε να βρούμε λεπτομέρειες της επιφάνειας του όπως κοιλάδες, ρήγματα, ηφαιστεια, βόρειος νότιος πόλος όπως επίσης και φωτογραφίες από διάφορες διαστημοσυσκευές που μελετάνε τον πλανήτη. Ακόμη με την χρήση των εργαλείων που παρέχει μπορούμε να κάνουμε μετρήσεις να περιηγηθούμε στα διάφορα μέρη και να δούμε επι τόπου φωτογραφίες από περιοχές ενδιαφέροντος. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί έναν από τους καλύτερους τρόπους να διδαχθεί η γεωλογία και γεωμορφολογία του πλανήτη Άρη και όχι μόνο.



Εικόνα 48. Αυτή η εικόνα έχει τραβηχτεί από το HiRISE και απεικονίζει την κοιλάδα Noctis στον πλανήτη Άρη.(NASA/JPL/University of Arizona)



Εικόνα 49. Αυτή η εικόνα προέρχεται από το Google Earth και δείχνει την ίδια ακριβώς περιοχή με την 47.(Google Earh)

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα.

Η πλανητική γεωλογία αποτελεί ένα διεπιστημονικό θέμα το οποίο στο άμεσο μέλλον θα μας απασχολήσει έντονα. Πιο συγκεκριμένα η γνώση της γεωλογίας του Άρη, ενός από τους πιο πολυμελετημένους πλανήτες μετά από τη Γη έχει βοηθήσει τους επιστήμονες στην αύξηση του συνόλου της γνώσης αλλά πιο σημαντικό στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της Γης.

Συγκεκριμένα σήμερα όπου οι ανακαλύψεις για τον κόκκινο πλανήτη αυξάνονται και συνεχώς εντυπωσιάζουν επιστήμονες και κοινό η πιο λεπτομερείς μελέτη του όχι μόνο από επιστημονικό προσωπικό αλλά και από τους πολίτες είναι επιθυμητή.

Οι τελευταίες ανακαλύψεις έχουν δείξει την ύπαρξη νερού, πολύ πιθανόν να είναι και τρεχούμενο. Επίσης τελευταία έχουν βρεθεί ενδείξεις για κάποια αρχέγονα μόρια, οι οποίες αναζωπυρώνουν τις υποθέσεις για την ύπαρξη ζωής και την επικείμενη αποίκηση του πλανήτη από τον άνθρωπο. Ήδη προγραμματίζεται μία επανδρωμένη αποστολή μέσα στα επόμενα 20 χρόνια περίπου.

Η κλιματικές αλλαγές που έχουμε προκαλέσει τα τελευταία χρόνια έχουν άμεσες επιπτώσεις στο ανθρώπινο είδος και προβλέπεται ότι το μέλλον θα είναι δυσόιωνο. Η προοπτική της αποίκησης του Άρη μοιάζει από πολλούς επιστήμονες σαν η μόνη λύση για την διατήρηση της ανθρώπινης ζωής. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που χρηματοδοτούνται αποστολές στον πλανήτη.

Ωστόσο ο πλανήτης Άρης ποτέ δεν θα είναι φιλικός για τον άνθρωπο γιατί δεν είναι φτιαγμένος για εμάς. Όσο και αν προχωρήσει η τεχνολογία οι δυσκολίες της αποίκησης είναι πολλές. Στην περίπτωση που ξεπεραστούν, οι άνθρωποι που θα φτάσουν εκεί και θα έχουν επιζήσει του ταξιδιού θα βρεθούν σε ένα αφιλόξενο μέρος στο οποίο θα είναι δυστυχημένοι και για πάντα ξένοι.

Εν κατακλείδι σε αυτό που θεωρώ ότι πρέπει να επικεντρωθεί η επιστημονική κοινότητα σε αντίθεση με τα σχέδια αποίκησης είναι πως θα διασφαλίσουμε την βιωσιμότητα του πλανήτη μας για το ανθρώπινο είδος και με αυτή τη βάση να εξελιχθούν οι γνώσεις μας και οι ανακαλύψεις όπου αποτελούν κομμάτι της ανθρώπινης φύσης.

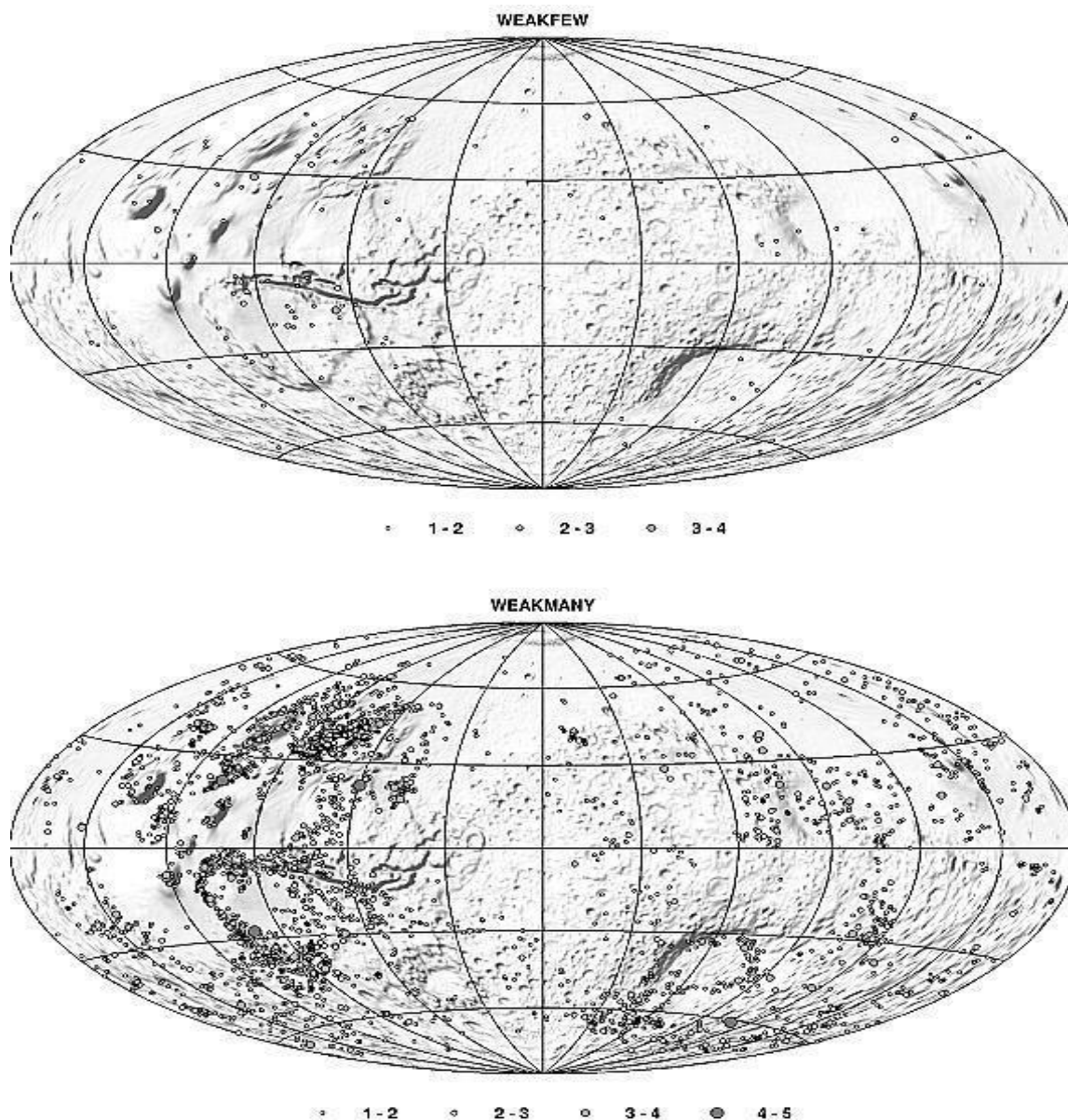
Ότι και αν συμβεί με το πέρασμα το χρόνου ο πλανήτης Γη θα συνεχίσει να κινείται και πολύ πιθανόν να φιλοξενεί ζωή, είτε με εμάς είτε χωρίς εμάς.



Ορισμοί

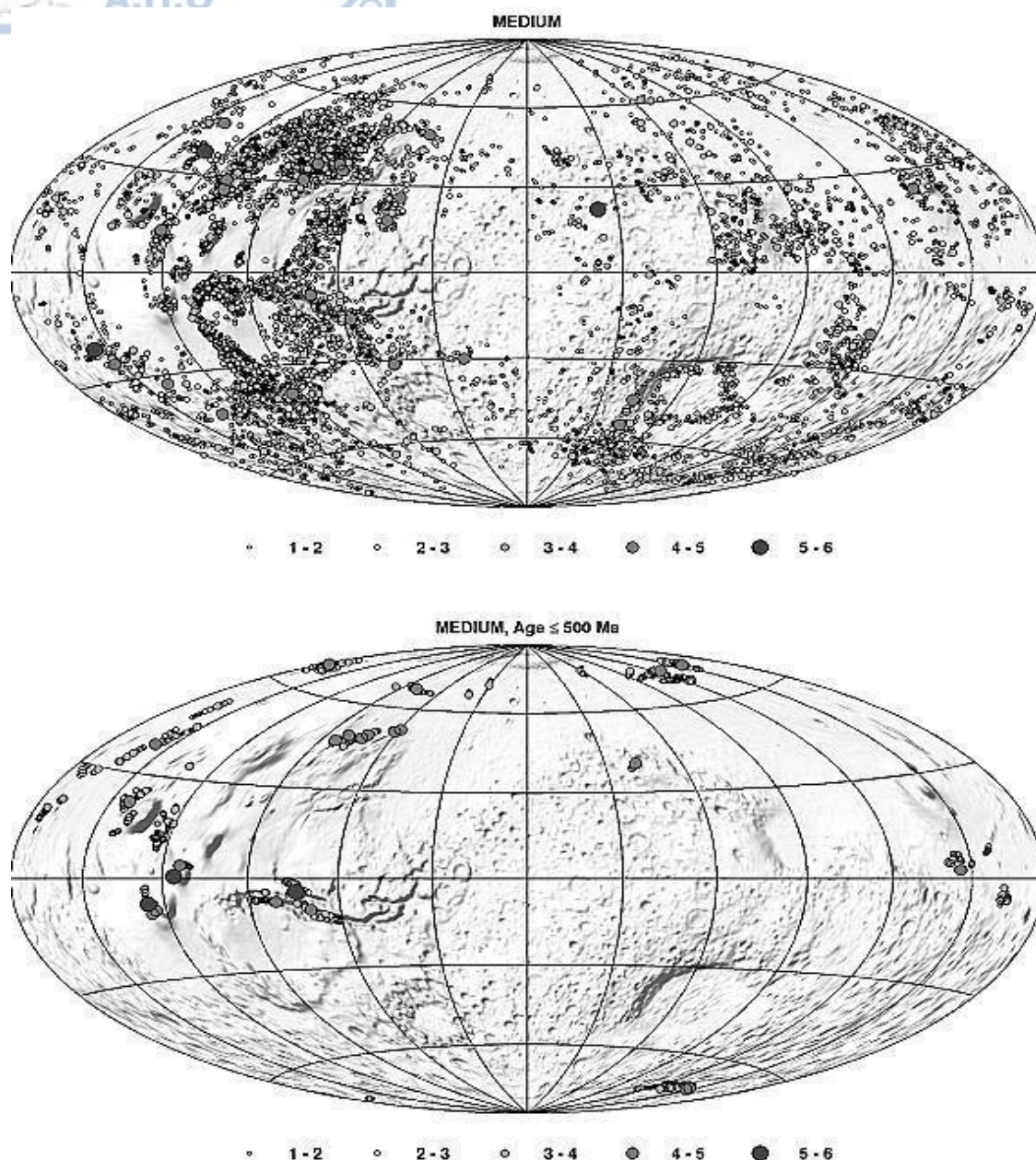
- [1] Φαινόμενο Doppler : Η συχνότητα του κύματος που παράγει μία πηγή είναι διαφορετική από αυτή που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής, όταν το σύστημα πηγή παρατηρητής βρίσκονται σε σχετική κίνηση.
- [2] AU Αστρονομική μονάδα : ορίζεται ως η απόσταση που έχει ένα σωματίδιο αμελητέας μάζας που εκτελεί κυκλική τροχιά γύρω από τον Ήλιο με περίοδο 365,2568983 ημερών.
- [3] Όριο Amstrong : είναι ένα όριο υψομέτρου στη Γη που η ατμοσφαιρική πίεση πέφτει τόσο πολύ που το νερό βράζει σε θερμοκρασία ανθρώπινου σώματος. Χωρίς την πίεση οι άνθρωποι δεν μπορούν να ζήσουν πάνω από αυτό το όριο.
- [4] Newton - μέτρα : αποτελεί μονάδα μέτρησης που προκύπτει από μία δύναμη ενός Newton που εφαρμόζεται κάθετα στην άκρη ενός βραχίονα μήκους ενός μέτρου.
- [9] GIS GRASS : λογισμικό γεωγραφικών πληροφοριών ανοιχτής πηγής που χρησιμοποιείται για την διαχείριση και επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων, εικόνων, την παραγωγή χαρτών και γραφικών στοιχείων και τη χωρική μοντελοποίηση.
- [10] MOLA : αποτελεί ένα από τα 5 όργανα τ διαστημικού σκάφους Mars Global Surveyor. Διέθετε δεδομένα από το 1997 έως το 2001. Το όργανο MOLA χρησιμοποιήθηκε κυρίως για να βοηθήσει στη χαρτογράφηση του πλανήτη.

[5]



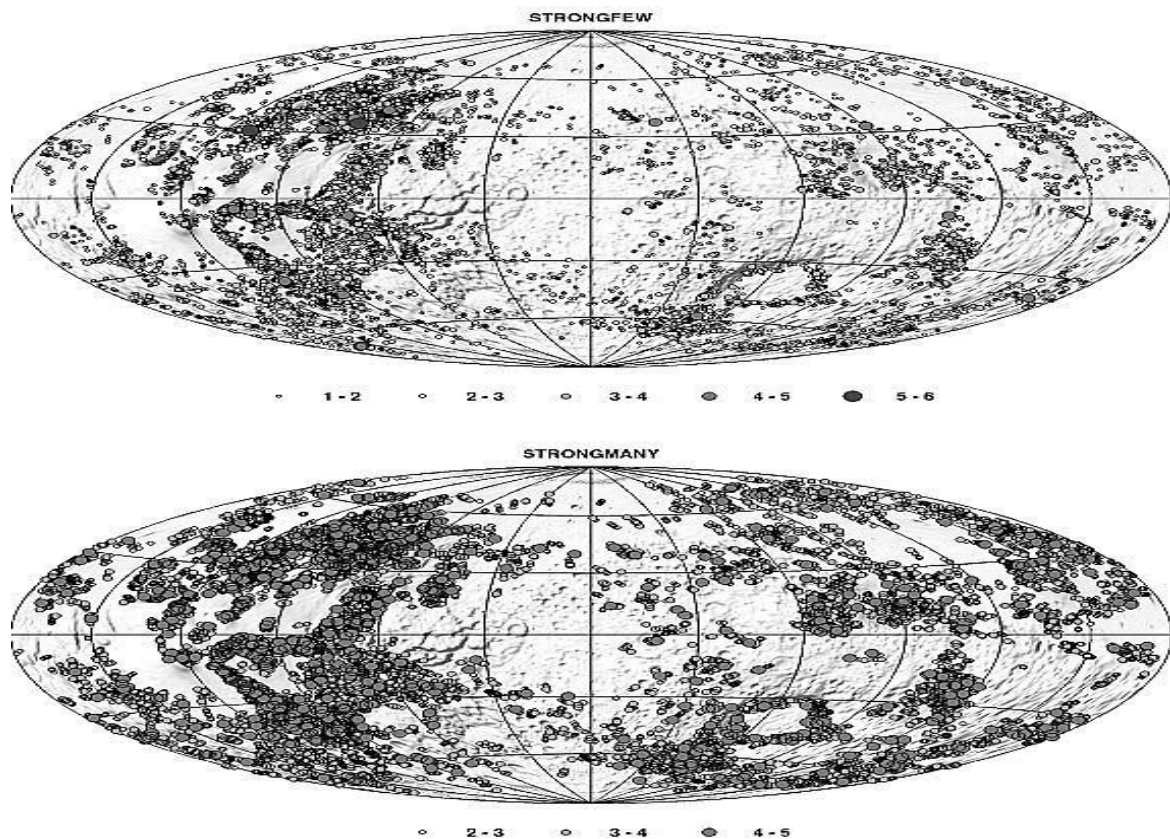
Εικόνα 50 . Απεικόνιση συνολικά 114 επικέντρων σύμφωνα με το μοντέλο WEAKE..(M.Knapmeyer et.al 2006 από Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity)

[6]



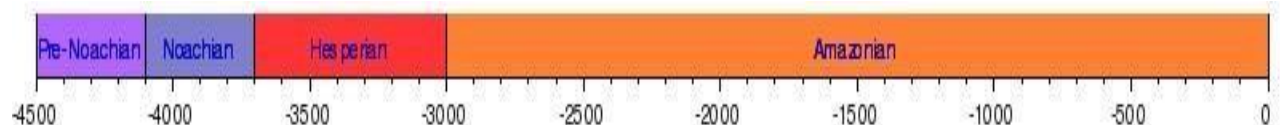
Εικόνα 51 . Απεικόνιση επικέντρων σύμφωνα με το μοντέλο MEDIUM. Όλα τα ενεργά ρήγματα μικρότερα από 500 Ma.(M.Knapmeyer et.al 2006 από Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity)

[7]



Εικόνα 52 . Απεικόνιση επικέντρων σύμφωνα με το μοντέλο STRONG με συνολικά 436.487 γεγονότα...(M.Knapmeyer et.al 2006 από Working models for spatial distribution and level of Mars' seismicity)

[8]



Εικόνα 53 . Απεικόνιση του γεωλογικού χρόνου στον Άρη. Η Pre-Noachian εποχή ξεκινάει από τη στιγμή που δημιουργία του πλανήτη έως και τη δημιουργία της λεκάνης Hellas (4.5-3.8 Ga). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της εποχής έχει χαθεί. Η Noachian εποχή όπου αποτελεί την παλαιότερη επιφάνεια του Άρη με συχνή την εμφάνιση κρατήρων(4.1-3.7). Η διόγκωση του Tharsis και διάφορες κοιλάδες πιστεύεται ότι δημιουργήθηκαν αυτή την περίοδο όπως πιθανολογούνται και κάποιοι ωκεάνιοι χώροι. Η Hesperian εποχή που σηματοδοτείται από τον έντονο σχηματισμό λάβας (3,7-3,0). Ο σχηματισμός του Olympus Mons πιθανολογείται αυτή την περίοδο. Η Amazonian περίοδος (3,0-0) με περιοχές εμφάνισης που παρουσιάζουν έντονη ποικιλομορφία.(https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_Mars)



Βιβλία

- Andrew N. R., (1999), Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences, vol 3, 509-550 pp (<https://books.google.gr>)
- Hauber, T.E., Jonas M., Voelker, Knapmeyer M., Grott M., Matz K.D. (2014), Fault scaling on Mars : slip distribution and displacement-length relationship derived from HRSC data, Συνέδριο σεληνιακής και πλανητικής επιστήμης. (<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1981.pdf>)
- Golombek M. P., Banerdt B. W., Tanaka K. L., Tralli D. M., (1992) A prediction of Mars seismicity from surface faulting, Science, vol 258 pp 979-981 (<http://science.sciencemag.org>)
- Greeley R., Bender K., Pappalard R., (1998) Planetary Geology A Teacher's Guide with Activities in Physical and Earth Sciences, vol. 2 pp 51-75, vol. 4 pp. 127, vol. 5 pp 183-215 (<https://www.nasa.gov/audience/foreducators>)
- Steele A., Cubbin F.M., Fries M., Kater L., Boctor N. Z., Fogel M. L., Conrad P. G., Glamoclija M., Spencer M., Morrow A. L., Hammond M. R., Zare R. N., Vicenzi E. P., Siljestrom S., Bowden R., Herd C. D. K., Mysen B. O., Shirey S. B., Amundsen H. E. F., Treiman A. H., Bullock E. S., Ju; A. J. T., (2012) A reduced carbon component in martian basalts, vol. 337 pp 212-215 (<http://science.sciencemag.org>)
- Wiley J. and sons, (1999), Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, vol 3, 509-564 pp, (<http://marswatch.sese.asu.edu>)



Ιστοσελίδες

- Bob Yirka, (2016), Chondrule evidence suggests ancient low-velocity collisions between rocky planetesimals and icy bodies, Phys.org, (<https://phys.org/news>)
- Chapman M. G., USGS, Gene Shoemaker - Founder of Astrogeology (<https://astrogeology.usgs.>)
- Composition of Mars, (τελευταία επεξεργασία 21 Ιουλίου 2018) (https://en.wikipedia.org/wiki/Composition_of_Mars)
- Geology of Mars,(τελευταία τροποποίηση 23 Ιουνίου 2018) Wikipedia, (<https://en.wikipedia.org>)
- Fraser C. (2013), Universe today, (<https://www.universetoday.com>),
- Planetary geology, (τελευταία τροποποίηση 23/8/2006), Wikipedia, (<https://en.wikipedia.org>)
- Plesa A. C., Knapmeyer M., Golombek M. P., Grott M., Kawamura M., Longonne P., Tosi N., Weber R. C., (2018) Present-Day Mars' Seismicity Predicted From 3-D Thermal Evolution Models of Interior Dynamics, AGU 100, (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com>)
- Roberts P. G., Matthews B., Bristow C., Guerrieri L., Vetterlein J., (2012), Possible evidence of paleomarsquakes from fallen boulder populations, Cerberus Fossae, Mars, AGU 100, (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com>)
- Sharp T. (2017), How Far Away is Mars? | Distance to Mars, Space.com, (<https://www.space.com>)
- Tectonics of Mars (τελευταία τροποποίηση 3 Φεβρουαρίου 2018), Wikipedia (<https://en.wikipedia.org>)



- Witze A. (2018), Mars quakes set to reveal tantalizing clues to planet's early years Nature, (<https://www.nature.com>)