

# Εργασία 1: Εξαγωγή ρυθμού σφάλματος για ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω του OMERE

Έκδοση v4.0

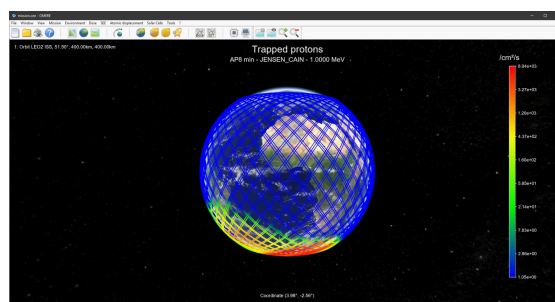
Αξιοπιστία Συστημάτων 2024-2025

## 1. Στόχος της Εργασίας

Η αποστολή σας για αυτήν την αναφορά είναι να συμπληρώσετε μια έκθεση ακτινοβολίας για έναν από τους επιλεγμένους δορυφόρους, που σημαίνει τον προσδιορισμό των τροχιακών παραμέτρων, τον υπολογισμό των ροών και πηγών ακτινοβολίας, και τέλος τον υπολογισμό της δόσης και της γραμμικής μεταφοράς ενέργειας (LET). Οι προηγούμενες παράμετροι θα χρησιμοποιηθούν για να εξάγουν τον **ρυθμό βλαβών ηλεκτρονικών στοιχείων** λόγω ακτινοβολίας και Single Event Effects, και να μας δώσουν μία αίσθηση για την αξιοπιστία αυτών των συσκευών σε τροχιά.

Η άσκηση αυτή εκτελείται εξ' ολοκλήρου στο πρόγραμμα **OMERE** της TRAD, το οποίο είναι δωρεάν λογισμικό για ανάλυση και προσομοίωση του περιβάλλοντος ακτινοβολίας στο διάστημα. Το OMERE χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιομηχανία, και μπορεί να εξάγει στοιχεία όπως:

1. Απ' ευθείας ανάλυση της τροχιάς ενός διαστημικού αντικειμένου.
2. Εκτίμηση του **περιβάλλοντος ακτινοβολίας**, δηλαδή της πυκνότητας και ροής των φορτισμένων σωματιδίων στη συγκεκριμένη τροχιά.
3. Εκτίμηση του **ρυθμού βλαβών** των ηλεκτρονικών, με βάση το περιβάλλον ακτινοβολίας όπου βρίσκονται.

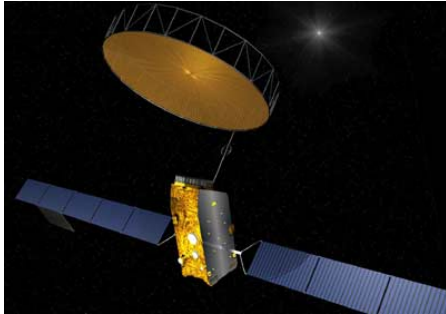


Εικόνα 1: Το περιβάλλον του OMERE

## 2. Αποστολές

Από τους παρακάτω δορυφόρους, επιλέξτε έναν του οποίου τα στοιχεία θα εισάγετε στο OMERE ώστε να εκτιμήσετε το αντίστοιχο περιβάλλον ακτινοβολίας.

### 2.1. Inmarsat-4A F4 (AlphaSat)



Ο AlphaSat είναι τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος της Βρετανικής εταιρείας Inmarsat σε συνεργασία με την European Space Agency. Προσφέρει mobile communication υπηρεσίες στην Αφρική, καθώς και σε κομμάτια της Ευρώπης και της Αφρικής.

Με τον AlphaSat να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 3, 4, 6.

### 2.2. STARLINK-3321



Το Starlink είναι σύστημα δορυφόρων που κατασκευάζεται από την SpaceX για την παροχή δορυφορικού διαδικτύου. Το σύστημα αποτελείται από χιλιάδες μικρούς δορυφόρους σε χαμηλή γήινη τροχιά (LEO), σε συνδυασμό με πομποδέκτες εδάφους.

Με τον STARLINK-3321 να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 1, 3, 4.

### 2.3. AEOLUS



Ο Aeolus είναι δορυφόρος της ESA. Είναι ο πρώτος δορυφόρος που μπορεί να συλλέξει δεδομένα για τα διάφορα προφίλ ανέμων σε παγκόσμια κλίμακα και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του καιρού.

Με τον Aeolus να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 1, 2, 5.

### 2.4. METEOR M2



Ο METEOR M2 είναι ρώσικος δορυφόρος που παρακολουθεί το κλίμα της γης, το στρώμα του όζοντος και τη θερμοκρασία των ωκεανών μεταξύ άλλων.

Με τον METEOR M2 να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 3, 4, 6.

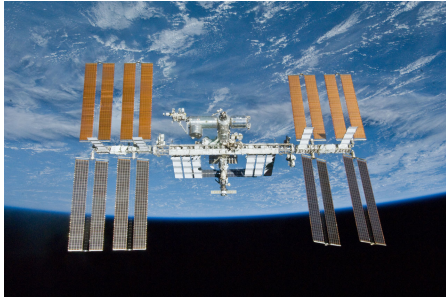
### 2.5. SAUDISAT 1C



Ο SAUDISAT 1C φέρει πολλά πειράματα, μεταξύ των οποίων και έναν ραδιοερασιτεχνικό repeater που λειτουργεί στα 145.8 MHz. Κατασκευάστηκε από ένα πρόγραμμα της Σαουδικής Αραβίας. Οποιοδήποτε άτομο φέρει ειδικό εξοπλισμό μπορεί να επικοινωνήσει μαζί του.

Με τον SAUDISAT 1C να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 2, 5, 6.

## 2.6. International Space Station



Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός είναι ένας ερευνητικός διαστημικός σταθμός σε τροχιά γύρω από τη Γη. Αποτελεί κοινό πρόγραμμα μεταξύ των διαστημικών οργανισμών NASA, Roscosmos (Ρωσία), JAXA (Ιαπωνία), CSA (Καναδάς) και ESA. Κατοικείται συνεχώς από τότε που το πρώτο πλήρωμα μπήκε στον σταθμό στις 2 Νοεμβρίου 2000, παρέχοντας έτσι συνεχή ανθρώπινη παρουσία στο διάστημα.

Με τον ISS να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 3, 4, 6.

## 2.7. UPSat



Το UPSat ήταν ο πρώτος open-source δορυφόρος που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα, από το Πανεπιστήμιο Πατρών και το Ίδρυμα Libre Space Foundation. Κατασκευάστηκε κατά την διάρκεια του προγράμματος QB-50 με στόχο την μέτρηση πλάσματος σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Όσλο.

Με τον UPSat να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 1, 2, 3.

## 2.8. Sentinel-6 Michael Frielich



Ο Sentinel-6 αποτελεί τον πιο νέο δορυφόρο του προγράμματος Copernicus της ESA. Αποτελεί συνεργασία διάφορων οργανισμών όπως της EU-METSAT, NASA, NOAA και CNES με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος. Ο στόχος της αποστολής είναι η μέτρηση της στάθμης της θάλασσας μέχρι το εκατοστό για περισσότερο από το 90% των παγκόσμιων ωκεανών.

Με τον Sentinel-6 να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 3, 4, 6.

## 2.9. GSAT-19



Η Carmen 4 είναι τελευταία έκδοση της σειράς CARMEN του Γαλλικού Διαστημικού Οργανισμού που θα πετάξει με τον δορυφόρο GSAT-19, με στόχο την παρακολούθηση του διαστημικού περιβάλλοντος.

Με τον GSAT-19 να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 1, 3, 4.

## 2.10. HellasSat-4



Ο HellasSat-4 αποτελεί τον τελευταίο δορυφόρο που εκτοξεύθηκε στο διάστημα για χάρη της εταιρίας Hellas Sat Consortium Ltd. Είναι τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος εξυπηρετώντας ανάγκες όχι μόνο της Ευρώπης, αλλά και της Μέσης Ανατολής.

Με τον HellasSat-4 να δοκιμαστούν τα εξαρτήματα 2, 4, 6.

### 3. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία (ολοκληρωμένα κυκλώματα) που πρέπει να προσομοιωθούν έχουν δοκιμαστεί απέναντι σε ακτινοβολία της μορφής Single Event Effects (SEE), και οι σχετικές λειτουργίες & αναφορές φαίνονται στον **Πίνακα 1**. Δεν ζητείται να προσομοιωθούν όλα, παρά μόνο αυτά που αντιστοιχούν στην εκάστοτε αποστολή.

Πίνακας 1: Test reports βαρέων ιόντων από ηλεκτρονικά εξαρτήματα

ID	Εξάρτημα	Είδος σφάλματος
1	Μνήμη Flash Micron MT29F32G08ABAAA	Αποτυχία εγγραφής (page program fail) Αποτυχία λειτουργίας (device loss of functionality)
2	Μικροελεγκτής MSP430FR5969-SP	Εντοπισμένο σφάλμα SEU Επανεκκίνηση μικροελεγκτή SEFI
3	Μικροελεγκτής Cypress EZ-USB FX2	Όλα τα σφάλματα (all errors recorded) Σφάλματα Read Enable Σφάλματα Write Enable
4	Μνήμη MRAM Freescale MR2A16A	Single Event Latchup (SEL)
5	Μνήμη SRAM Atmel M65608E	Single Event Upset (SEU)
6	Spacecraft Controller Atmel ATC18RHA	APB Register LEON3 Instruction Unit (IU) LEON3 Floating Point Unit (FPU)

Το κάθε έγγραφο περιέχει πολλές καμπύλες **LET – Cross-Section**, που δείχνουν πόσο επιρρεπές είναι το εξάρτημα σε διαφορετικές ενέργειες σωματιδίων. Κάθε είδος αποτυχίας περιγράφεται με μία διαφορετική καμπύλη.

### 4. Ορισμός Αποστολής

Αρχικά, θα πρέπει να καθοριστεί η τροχιά και ο χρόνος αποστολής του δορυφόρου. Πιο συγκεκριμένα, ζητείται:

1. Να συμπληρωθούν τα κεπλεριανά στοιχεία της τροχιάς και συμπληρωματικά στοιχεία της αποστολής
2. Να συμπληρωθούν τα στοιχεία της προσομοίωσης (number of orbits, points per orbit)



Τα παραπάνω στοιχεία για κάθε αποστολή μπορούν να βρεθούν ελεύθερα στο διαδίκτυο, και σε ιστοσελίδες όπως:

- <https://www.n2yo.com/>
- <https://www.heavens-above.com/>
- <https://in-the-sky.org/>
- <https://celestrak.org/satcat/search.php>

## 5. Προσομοίωση του Διαστημικού Περιβάλλοντος

Για την προσομοίωση του Διαστημικού Περιβάλλοντος όσο αφορά το κομμάτι των ακτινοβολιών θα πρέπει να οριστούν οι διάφορες πηγές τους. Οι κύριες πηγές αυτών είναι:

- *Trapped Protons and Electrons* από το μαγνητικό πεδίο της γης, και πιο συγκεκριμένα σε μια ενδιαφέρουσα περιοχή που είναι η Νοτιοατλαντική ανωμαλία, μέρος των ζωνών Van Allen.
- *Solar Protons and Ions* είναι σωματίδια υψηλής ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο και αποτελούνται από πρωτόνια, ηλεκτρόνια και ιόντα HZE με ενέργεια που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες keV έως πολλά GeV.
- *Solar Flares*, μια ξαφνική λάμψη της φωτεινότητας κατά την οποία μια σημαντική εκτόξευση σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες μερικών GeV θα μπορούσε να διεισδύσει στην ατμόσφαιρα της γης.
- *Galactic Cosmic Rays (GCR)*, τα οποία είναι ιδιαίτερα ενεργά ιόντα από τα άτομα H μέχρι U.

Ζητείται:

1. Να υπολογιστούν οι ροές (flux) για κάθε μία από τις παραπάνω πηγές ακτινοβολίας, και να παρουσιαστούν τα διαγράμματα ροών.
2. Να παρουσιαστούν οι ροές σε εικόνας μαζί με τον χάρτη 2D της γης, στον οποίο είναι φανερά τα όρια της περιοχής της Νότιας Ατλαντικής Ανωμαλίας (SAA) .

**Σημείωση:** Τυπικά, κοντά στην περιοχή του Ατλαντικού Ωκεανού (Νότια Ατλαντική Ανωμαλία — SAA), θα βρίσκονται σε μεγάλη συγκέντρωση τα πιο ενεργειακά trapped protons.

Η επιλογή των μοντέλων είναι βασισμένη στα ECSS standards, και πιο συγκεκριμένα από το ECSS-E-ST-10-04C Rev.1, Section 9 και Appendix I. Τα μοντέλα που πρέπει να επιλεγούν παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Τα μοντέλα για τις πηγές ακτινοβολίας

ID	Πηγή Ακτινοβολίας	Μοντέλο	Σχόλια
1	Trapped Protons	AP8	Min
2	Trapped Electrons	AE8	Max
3	Solar Protons	ESP	Confidence level 95%
4	Solar Ions	Psychic	Solar active period 2/3 of the mission lifetime
5	Solar Flare Protons	Sapphire	Confidence 95% + Solar active 2/3 of the mission
6	Solar Flare Ions	CREME86	Worst Case + (M6-M1)
7	Galactic Cosmic Rays	GCR-ISO	Mission

**Σημείωση:** Να γίνεται πάντα η επιλογή του *Magnetospheric cutoff*, για προσομοιώνεται με ακρίβεια το μαγνητικό πεδίο της γης.

## 6. Υπολογισμός της Δόσης και της Εναπόθεσης Ενέργειας (LET)

Αφού έχει γίνει ο υπολογισμός των ροών και κατ' επέκταση ο ορισμός του περιβάλλοντος ακτινοβολίας στην **Ενότητα 5**, ζητείται να υπολογιστεί η ιοντίζουσα δόση (TID) που θα δεχθούν τα ηλεκτρονικά, καθώς και η εναπόθεση ενέργειας (LET) που θα δεχθεί ο στόχος. Η θέση των ηλεκτρονικών ορίζεται από την γεωμετρία που θα επιλέξουμε και το πάχος της **θωράκισης κατά την ακτινοβολία** (shielding). Θεωρήστε ότι το shielding για κάθε αποστολή είναι **5 mm**.

Πιο συγκεκριμένα:

1. Να υπολογιστεί η δόση και να παρουσιαστεί το διάγραμμα dose depth curve.
2. Να υπολογιστεί το διάγραμμα LET–Energy, για το συγκεκριμένο shielding.

**Σημείωση:** Προσοχή στις μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιήσετε για το shielding!

## 7. Υπολογισμός SEE

Τελευταίο κομμάτι της εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός των σφαλμάτων των ηλεκτρονικών. Έχοντας ορίσει τις πηγές ακτινοβολίας από την **Ενότητα 5**, το OMERE μπορεί να εξαγάγει αυτόματα τους ρυθμούς βλαβών με την παρακάτω διαδικασία:



1. Να συμπληρωθούν τα στοιχεία για κάθε ηλεκτρονικό στοιχείο που θα δοθεί. Για πρωτόνια, να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο PROFIT, και για ιόντα, το μοντέλο WEIBULL.

Το μοντέλο WEIBULL απαιτεί τη χρήση των αποτελεσμάτων που βρίσκονται στην **Ενότητα 3**. Τα test reports των στοιχείων συνοδεύονται από καμπύλες **LET – cross-section**, τα σημεία των οποίων πρέπει να τοποθετηθούν στις αντίστοιχες εισόδους του OMERE.

2. Να ενεργοποιηθούν τα κατάλληλα μοντέλα, και πιο συγκεκριμένα:
  - Για πρωτόνια: (a) AP8 min και (b) GCR-ISO
  - Για ιόντα: (a) CREME86 σε μέγιστο ροής κατά την διάρκεια της ηλιακής έκλαμψης, και (b) GCR-ISO
3. Να υπολογιστεί ο μέσος ρυθμός σφαλμάτων σε /device/day και /device για τη διάρκεια της αποστολής.
4. Να υπολογιστεί ο περιοδικός ρυθμός σφαλμάτων.

*Σημείωση: Ο περιοδικός αριθμός σφαλμάτων απαιτεί μεγάλο χρόνο για να υπολογιστεί (μερικές ώρες). Σε περίπτωση που δεν μπορεί να εξαχθεί σε εύλογο χρόνο από τον υπολογιστή σας, μπορείτε να μειώσετε τη διάρκεια της αποστολής/αριθμό τροχιών.*

5. Να γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων, μια σύντομη σύγκριση των ηλεκτρονικών ως προς την ανοχή τους στην ακτινοβολία, και να σχολιαστεί αν τα συγκεκριμένα components είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη αποστολή.

**Σημείωση:** Να πολλαπλασιάσετε το αποτέλεσμα μοντέλου PROFIT με τον παράγοντα 10, ώστε να εκφραστεί το σφάλμα της διαδικασίας.

## 8. Οδηγίες χρήσης

- Οι εργασίες είναι **ομαδικές**. Οι ομάδες των υπολογιστικών εργασιών είναι ίδιες με αυτές των βιβλιογραφικών εργασιών.
- Να γίνει έγκαιρη εγκατάσταση του προγράμματος, από την ιστοσελίδα της εταιρίας TRAD: [https://www.trad.fr/download/packages/OMERE\\_Install.exe](https://www.trad.fr/download/packages/OMERE_Install.exe)
- Τα παραδοτέα κομμάτια της εργασίας είναι:

- (a) Ένας φάκελος με τα αρχεία του OMERE project και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (.flx, .fle, .cen, .let, .dos και .dat).
  - (b) Μία αναφορά (σε μορφή .pdf ή αντίστοιχη) που θα περιγράφει τα αποτελέσματα που ζητούνται, μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα και υπολογισμούς
  - (c) Ένας πίνακας που να καθορίζει κάθε μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.
- Αν και ενθαρρύνεται η συνεργασία, απαγορεύεται η αντιγραφή προτζεκτς και εργασιών.
  - Για οποιαδήποτε ερώτηση ή πρόβλημα, επικοινωνήστε μαζί μας ελεύθερα στο forum του μαθήματος ή μέσω e-mail.

## 9. Χρήσιμο Υλικό

1. *Introduction of the six basic parameters describing satellite orbits* (αρκετά χρήσιμο για να αντιληφθείτε πώς ορίζεται μία τροχιά)
2. *Effect of Space Radiation on LEO Nanosatellites*
3. *Space radiation environment prediction for VLSI microelectronics devices onboard a LEO satellite using OMERE-TRAD software*

## A. Changelog

Ημερομηνία	Έκδοση	Αλλαγές
2024-12-20	v4.0	Προσθήκη 4 αποστολών
2022-12-19	v3.0	Ανανέωση των 6 δορυφόρων, προσθήκη celestrak
2021-12-13	v2.0	Αφαίρεση UPSat, προσθήκη διευκρινήσεων
2020-12-02	v1.0	Αρχική έκδοση