ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Open Schools Journal for Open Science

Τόμ. 6, Αρ. 1 (2023)

Open Schools Journal for Open Science - Special Issue -Πρακτικά του «3ου Μαθητικού Συνεδρίου Έρευνας και Επιστήμης»

Μέτρηση μάζας σε συνθήκες μικροβαρύτητας: Πείραμα στο διάστημα!

Σταμάτιος Σέττας, Αναστάσης Βατίστας, Ιάσονας Παυλόπουλος, Άρης Φραντζεσκάκης

doi: 10.12681/osj.31911

Copyright © 2023, Σταμάτιος Σέττας, Αναστάσης Βατίστας, Ιάσονας Παυλόπουλος, Άρης Φραντζεσκάκης

Άδεια χρήσης Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

Βιβλιογραφική αναφορά:

Σέττας Σ., Βατίστας Α., Παυλόπουλος Ι., & Φραντζεσκάκης Ά. (2023). Μέτρηση μάζας σε συνθήκες μικροβαρύτητας: Πείραμα στο διάστημα!. *Open Schools Journal for Open Science*, *6*(1). https://doi.org/10.12681/osj.31911

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 18/02/2026 04:38:19

Μέτρηση μάζας σε συνθήκες μικροβαρύτητας: Πείραμα στο διάστημα!

Άρης Φραντζεσκάκης[1], Σταμάτης Σέττας[2], Αναστάσης Βατίστας[3], Ιάσονας Παυλόπουλος[4]
[1] Ζάννειο Πρότυπο Λύκειο, Πειραιάς, [2]Ηλεκτρολόγων Μηχανικών , [3]Ναυπηγών Μηχανικών, [4]Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Επιβλέποντες Καθηγητές: Σωτήριος Τσαντίλας[1], Εύα Τέγκερη[2]
[1]Μαθηματικός - Αστροφυσικός, Ζάννειο Πρότυπο Λύκειο,
stsant@phys.uoa.gr
[2]Πληροφορικός, Ζάννειο Πρότυπο Λύκειο,
eyategkeri@sch.gr

Περίληψη

Πώς ζυγίζονται οι αστροναύτες; Είναι δυνατόν να μετρήσουμε τη μάζα ενός αντικειμένου σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας ή πιο σωστά «μικροβαρύτητας»; Το Νοέμβριο του 2018 ο όμιλος Διαστημικής και Ρομποτικής του Ζαννείου Προτύπου Λυκείου συμμετείχε επιτυχώς στον 1ο Πανελλήνιο Διαγωνισμό Αεροδιαστημικής με έπαθλο την αποστολή ενός πειράματος στο διάστημα μέσω της αποστολής NS12/P9 της εταιρείας αεροδιαστημικής Blue Origin. Η ιδέα που αποφασίσαμε να υλοποιήσουμε ήταν να συνδέσουμε το προς ζύγιση αντικείμενο με ένα ελατήριο γνωστών χαρακτηριστικών το οποίο θα απελευθερωνόταν τη στιγμή που ο πύραυλος θα βρισκόταν σε κατάσταση «μηδενικής» βαρύτητας. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός αισθητήρα ToF θα μετρούσαμε την απόσταση του αντικειμένου από τον αισθητήρα, θα υπολογίζαμε την περίοδο ταλάντωσης, και από εκεί τη μάζα του. Στις 11 Δεκεμβρίου 2019 ο πύραυλος New Shepard εκτοξεύτηκε από το Τέξας των ΗΠΑ μεταφέροντας το πείραμά μας στο διάστημα. Η αποστολή και το πείραμά μας στέφθηκαν με απόλυτη επιτυχία. Στην εργασία αυτή θα σας παρουσιάσουμε το πείραμα και τα αποτελέσματά του.

Λέξεις κλειδιά: Μικροβαρύτητα, Διάστημα, Blue Origin, ταλαντώσεις

Εισαγωγή

Οι συνθήκες έλλειψης βαρύτητας, ή πιο σωστά μικροβαρύτητας, παρατηρούνται σε ένα σώμα που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Γη, όπως για παράδειγμα ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός, ή ένας πύραυλος σε τροχιά. Επίσης παρατηρείται για μερικά λεπτά σε έναν πύραυλο που φτάνει στο μέγιστο του ύψους του λίγο πριν αρχίσει να επιστρέφει στη Γη. Μια τέτοια περίπτωση είναι ο πύραυλος New Shepard της

αμερικανικής αεροδιαστημικής εταιρείας Blue Origin (Σχήμα 1). Χρησιμοποιεί έναν κινητήρα BE-3 υγρού υδρογόνου/υγρού οξυγόνου που έχει ισχύ 490 kN, καίει για 110 sec και φτάνει σε ύψος περίπου 100 km μέχρι την Karman line που είναι το θεωρούμενο σύνορο του διαστήματος. Εκεί αφού η κάψουλα αποχωριστεί από τον πύραυλο, για περίπου 200 sec το εσωτερικό της βρίσκεται σε κατάσταση έλλειψης βαρύτητας (Σχήμα 2). Στη συνέχεια, η κάψουλα και ο πύραυλος επιστρέφουν στη Γη, η πρώτη με τη βοήθεια αλεξιπτώτων, ενώ ο δεύτερος προσγειώνεται κατακορύφως με τη βοήθεια των κινητήρων του. Να σημειωθεί ότι η Blue Origin είναι μαζί με την SpaceX οι μοναδικές εταιρείες που μπορούν και ανακτούν τους πυραύλους τους προσγειώνοντάς τους κατακορύφως σε προκαθορισμένα σημεία.

Σχήμα 1: Ο πύραυλος New Shepard της Blue Origin.

Σχήμα 2: Η κάψουλα του πυραύλου New Shepard σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας.

Η ομάδα του ομίλου μας σχεδίασε και υλοποίησε μια πειραματική διάταξη Nanolab για να εκτελεστεί στο διάστημα, στο εσωτερικό της κάψουλας του New Shepard.

Η φυσική του πειράματος

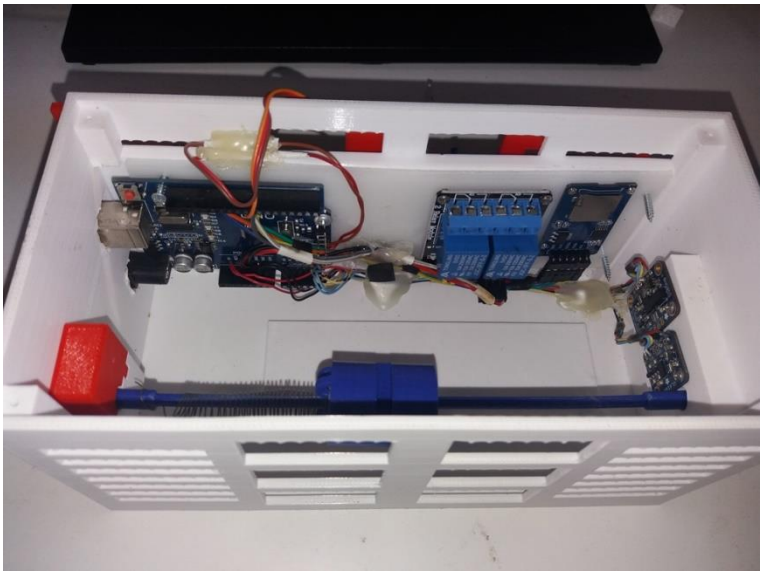
Το ερευνητικό ερώτημα που θελήσαμε να απαντήσουμε με το πείραμά μας είναι «πώς μπορούμε να μετρήσουμε τη μάζα ενός σώματος σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας;»

Η απάντηση δόθηκε από τη θεωρία των ταλαντώσεων. Η περίοδος ταλάντωσης ενός σώματος που είναι συνδεδεμένο σε ένα ελατήριο, εξαρτάται μόνο από τη μάζα του και από τη σταθερά του ελατηρίου, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

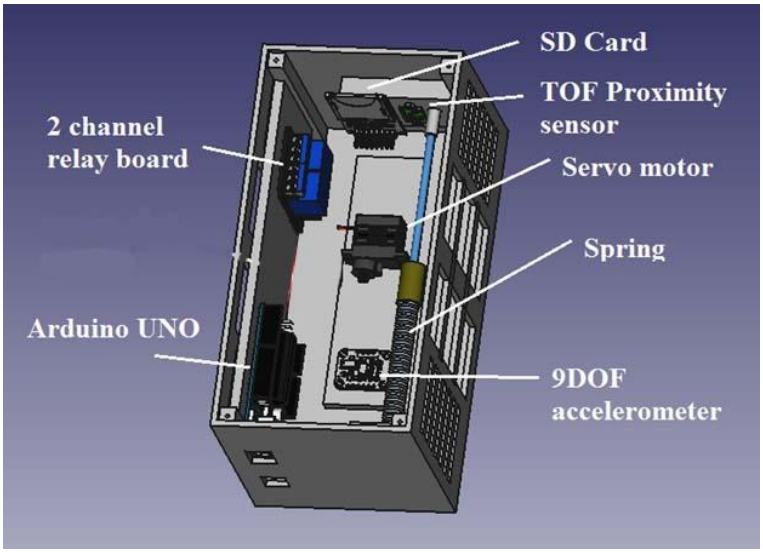
$$m = \frac{kT^2}{4\pi^2}$$

όπου m η μάζα του σώματος, k η σταθερά του ελατηρίου και T η περίοδος ταλάντωσης.

Είναι φανερό ότι τίποτα από τα παραπάνω δεν επηρεάζεται από την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί η μάζα υπό οποιεσδήποτε συνθήκες ακόμα και σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας.



Σχήμα 3: Το Nanolab του πειράματός μας.



Σχήμα 4: Το Nanolab του πειράματός μας. Σχεδίαση 3D.

Σχήμα 5: Το Nanolab του πειράματός μας.

Η υλοποίηση της πειραματικής διάταξης

Η μορφή και οι διαστάσεις του πειράματος (Σχήματα 3-5) καθορίστηκαν με απόλυτη ακρίβεια από τις προδιαγραφές που θέτει η Nanoracks, η εταιρεία που αναλαμβάνει και επιβλέπει την ενσωμάτωση των πειραμάτων στην κάψουλα του πυραύλου New Shepard. Κατασκευάσαμε ένα πείραμα 2U, δηλαδή ένα παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 10cm X 10cm X 20cm. Η ομάδα μας βρισκόταν σε συνεχή επικοινωνία με τακτικές τηλεδιασκέψεις με τους υπεύθυνους της Nanoracks ώστε να εξασφαλιστεί ότι πληρούνται όλες οι προδιαγραφές διαστάσεων και ασφαλείας. Για το σκοπό αυτό συντάχθηκαν πολλές αναφορές προόδου αλλά και διαδοχικά Bill of Materials (BOM) όπου υπήρχε η καταγραφή και τα χαρακτηριστικά κάθε υλικού που περιλαμβανόταν. Στο εσωτερικό του Nanolab τοποθετήσαμε ένα σώμα κυλινδρικού σχήματος προσδεμένο στο άκρο ενός εξαιρετικά μαλακού ελατηρίου καθώς και τις παρακάτω ηλεκτρονικές και μηχανικές συσκευές για τον έλεγχο του πειράματος:

- Arduino Uno
- BNO055 Absolute Orientation Sensor (Adafruit)

- VL6180X Proximity sensor (Adafruit)
- Servo motor SG90
- Micro SD Card Adapter Reader Module for Arduino
- 2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module

Το πείραμα εκτοξεύτηκε με το ελατήριο σε θέση συσπείρωσης όπου το συγκρατούσε σταθερό το Servo Motor SG90.
Όλα τα δεδομένα πτήσης καταγράφονταν με δύο τρόπους:

- από τα όργανα του πυραύλου New Shepard που ήταν συνδεδεμένος με το Arduino Uno
- από το BNO055 Absolute Orientation Sensor στο εσωτερικό του πειράματος μας.

Οι πληροφορίες και από τις δύο πηγές καταγράφονταν στην SD κάρτα που βρισκόταν στο Micro SD Card Adapter Reader Module for Arduino.
Τη στιγμή που τα όργανα του πυραύλου και ο αισθητήρας BNO055 Absolute Orientation Sensor κατέγραψαν μηδενική βαρύτητα, δόθηκε εντολή από το Arduino Uno στο Servo motor να απελευθερώσει το ελατήριο, το οποίο άρχισε να ταλαντώνεται με τον πλαστικό κύλινδρο στο άκρο του. Απέναντι από τον κύλινδρο βρισκόταν ο αισθητήρας απόστασης VL6180X Proximity sensor που κατέγραφε την απόσταση του σώματος ως συνάρτηση του χρόνου, επιτρέποντας μας έτσι να υπολογίσουμε την περίοδο ταλάντωσης. Και αυτά τα δεδομένα καταγράφονταν στην SD κάρτα αλλά σε χωριστό αρχείο από την υπόλοιπη τηλεμετρία.
Τέλος, για όλα αυτά γράφτηκε ειδικό πρόγραμμα ελέγχου του πειράματος και φορτώθηκε στο Arduino Uno πριν την αποστολή του στην Αμερική.

Το όλο πείραμα κλείστηκε σε πλαστικό περίβλημα (Σχήμα 5) που σχεδιάστηκε με ειδικό CAD λογισμικό (Σχήμα 4) και κατασκευάστηκε με 3D εκτύπωση ώστε να έχει τις ακριβείς διαστάσεις αλλά και τις κατάλληλες υποδοχές για να τοποθετηθούν τα εξαρτήματα του πειράματος. Με 3D εκτύπωση κατασκευάστηκε και ο άξονας του ελατηρίου καθώς και το κυλινδρικό σώμα που θέλαμε να «ζυγίσουμε». Αποτέλεσμα αυτού ήταν να είναι εξαιρετικά ελαφρύ και επομένως να παρουσιάζει πολύ μικρή περίοδο ταλάντωσης, δηλαδή να ταλαντώνεται πολύ γρήγορα. Αυτό ήταν το πρώτο από τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπίσουμε. Έπρεπε λοιπόν να κατασκευάσουμε ένα ελατήριο με πολύ μικρή σταθερά k, δηλαδή πολύ μαλακό, ενώ παράλληλα ο αισθητήρας απόστασης να μπορεί να κάνει αρκετές μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο ώστε να μπορεί να καταγράψει την περίοδο ταλάντωσης. Μετά από ειδική παραγγελία κατασκευάσαμε ελατήριο σταθεράς $k = 6.2$
Ο αισθητήρας απόστασης ήταν ένα laser χαμηλής ενέργειας που ήταν ρυθμισμένος να λειτουργεί στα 10 Hz, δηλαδή να παίρνει 10 μετρήσεις/sec. Η περίοδος ταλάντωσης όμως ήταν περίπου 0.3 sec με αποτέλεσμα να μην μπορεί να κατασκευαστεί μια ικανοποιητικά λεπτομερής καμπύλη της ταλάντωσης του σώματος ώστε να γίνει εμφανής η περίοδος της ταλάντωσης. Μετά από αρκετές προσπάθειες καταφέραμε να αλλάξουμε τις εργοστασιακές ρυθμίσεις ώστε να λειτουργεί στα 25 Hz περίπου.
Το τρίτο πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν το βάρος της όλης διάταξης. Η προς εκτύπωση διάταξη του κουτιού με τα εξαρτήματά του ζύγιζε αρχικά πολύ περισσότερο από 499 gr που ήταν το όριο βάρους για το πείραμά μας. Η λύση που δώσαμε ήταν να ξανασχεδιαστεί ολόκληρη η διάταξη σε 3D CAD πρόγραμμα, αλλά

με κενά και ανοίγματα στα τοιχώματά του με τρόπο όμως που να μην επηρεάζεται η ανθεκτικότητά του.

Η εκτόξευση

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, το πείραμα απεστάλη στην Blue Origin στο Τέξας των ΗΠΑ. Στις 19.53, στις 11 Δεκεμβρίου 2019, το πείραμά μας εκτοξεύτηκε στο διάστημα μέσα στην κάψουλα του πυραύλου New Shepard, φτάνοντας σε ύψος 105000 μέτρων στα πλαίσια της αποστολής NS12/P9. Κατά τη διάρκεια των 3.5 λεπτών μηδενικής βαρύτητας το πείραμα στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία αφού λειτούργησε άψογα σε όλα τα επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα:

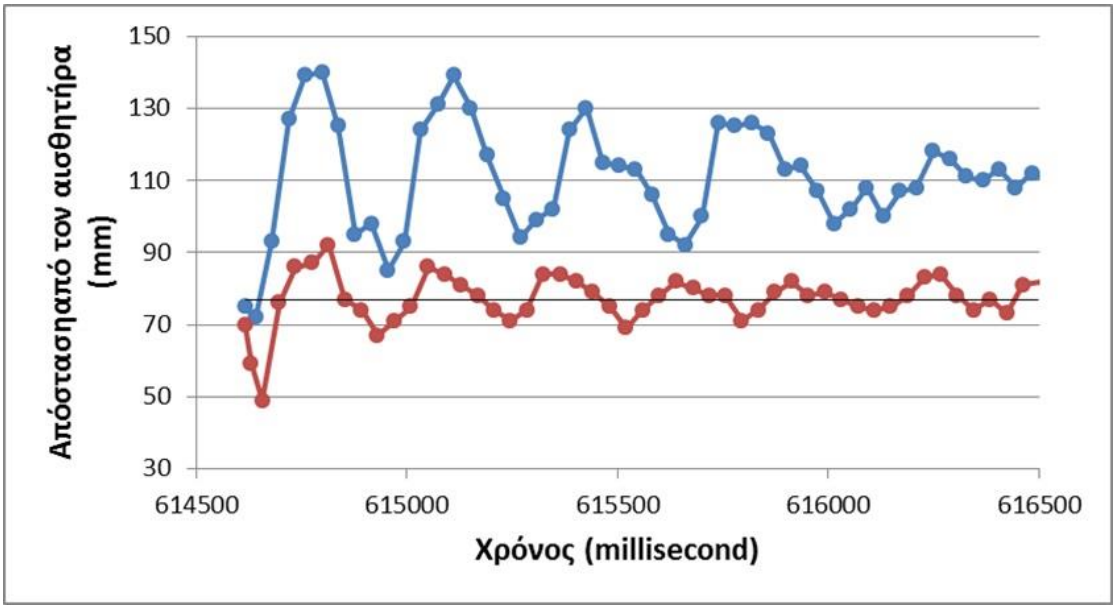
- Η επικοινωνία του πυραύλου New Shepard και του πειράματός μας ήταν πλήρης και χωρίς κανένα πρόβλημα από την αρχή μέχρι το τέλος της αποστολής.
- Το ελατήριο παρέμεινε συσπειρωμένο από τον ειδικό βραχίονα κατά την εκτόξευση και κατά τη διάρκεια της ανόδου.
- Το ελατήριο απελευθερώθηκε μόλις ελήφθη το σήμα κατάστασης μηδενικής βαρύτητας από τον πύραυλο και διασταυρώθηκε από τους αισθητήρες του πειράματος.
- Το laser απόστασης κατέγραψε την ταλάντωση του ελατηρίου με την απαιτούμενη ακρίβεια.
- Όλα τα δεδομένα καταγράφηκαν στην κάρτα SD με μηδενικές απώλειες.
- Ένα επιλεγμένο μέρος από την τηλεμετρία του πυραύλου κατεγράφη στην κάρτα SD του Nanolab.

Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της καταγραφής της ταλάντωσης ενός σώματος προσδεμένου σε ένα ελατήριο σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας αποδείχθηκαν πολύ ενδιαφέροντα. Η καμπύλη της ταλάντωσης στη Γη (κόκκινο) και στο διάστημα (μπλε) φαίνεται στο Σχήμα 6. Οι σημαντικότερες διαφορές είναι:

- Το κέντρο ισορροπίας είναι «ψηλότερα» στο διάστημα από ότι στη Γη.
- Το πλάτος της ταλάντωσης είναι πολύ μεγαλύτερο στο διάστημα.

Αντίθετα, όπως ήταν αναμενόμενο η περίοδος ταλάντωσης ήταν ίδια αφού το ελατήριο ήταν το ίδιο καθώς επίσης και το προσδεμένο σώμα.



Σχήμα 6: Η ταλάντωση του ελατηρίου στο Διάστημα (μπλε) και στη Γη (κόκκινο).

Μετρήσαμε την περίοδο του ελατηρίου για τις πρώτες 7 ταλαντώσεις, ώστε να μην έχουμε αλλοίωση των αποτελεσμάτων από την απόσβεση, υπολογίζοντας τις αποστάσεις των μεγίστων και των ελαχίστων και πήραμε το μέσο όρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1**.**

Περίοδος μεταξύ μεγίστων (millisecond)	Περίοδος μεταξύ ελαχίστων (millisecond)	Μέση τιμή ελαχίστων	Μέση τιμή μεγίστων
333	314	323.5	340
314	314		
	392		

Πίνακας 1: Υπολογισμός της περιόδου ταλάντωσης

Η περίοδος εκτιμήθηκε από τις μέσες τιμές σε

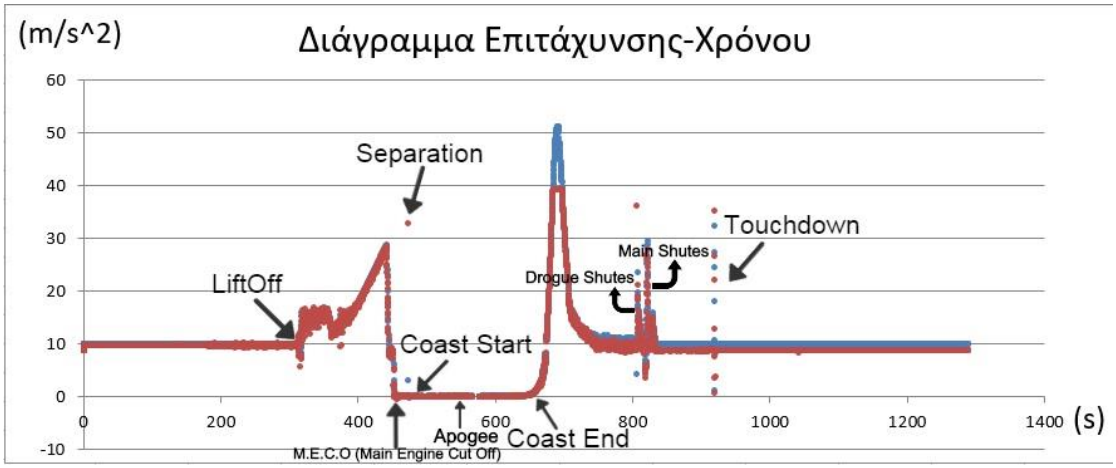
$$T = 331.75\ msec$$

Το ταλαντούμενο σώμα είχε μετρηθεί στη Γη με ζυγό ακριβείας και είχε βρεθεί 16.85 gr.
Αντικαθιστώντας τη σταθερά $k = 6.2$ και την περίοδο $T = 331.75$ στη σχέση

$$m = \frac{kT^2}{4\pi^2}$$

παίρνουμε $m = 17.01$ gr.
Δηλαδή η εκτιμώμενη μάζα υπό μηδενική βαρύτητα, μετρήθηκε από το πείραμά μας με ακρίβεια μεγαλύτερη του 99%.
Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της αποστολής, καταγράψαμε τις επιταχύνσεις που δέχθηκε το Nanolab σύμφωνα με τον αισθητήρα BNO055 Absolute Orientation Sensor του πειράματός μας (κόκκινη γραμμή), αλλά και σύμφωνα με τα όργανα του πυραύλου (μπλε γραμμή).

Στο Σχήμα 7 που περιέχει τα διαγράμματα επιτάχυνσης – χρόνου είναι σημειωμένες οι διάφορες φάσεις της αποστολής NS12/P9.



Σχήμα 7: Διάγραμμα επιτάχυνσης – χρόνου στο οποίο είναι σημειωμένες οι φάσεις της αποστολής. Με μπλε είναι τα δεδομένα του πυραύλου, ενώ με κόκκινο είναι τα δεδομένα από τον αισθητήρα BNO055 Absolute Orientation Sensor του πειράματός μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

2 Channel 5V Optical Isolated Relay Module,2021. [online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: https://grobotronics.com/relay-module-2-channel.html. [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].

Arduino Uno, 2021. [online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].

Blue Origin, 2021.[online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: https://www.blueorigin.com/ [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].

Kevin Townsend, 2021. Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor. [online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].

Lady Ada, 2021. Adafruit VL6180X Time of Flight Micro-LIDAR Distance Sensor Breakout. [online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: https://learn.adafruit.com/adafruit-vl6180x-time-of-flight-micro-lidar-distance-sensor-breakout. [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].

Micro SD Card Adapter Reader Module for Arduino, 2021. [online]. Διαδικτυακή πρόσβαση: http://datalogger.pbworks.com/w/file/fetch/89507207/Datalogger%20-%20SD%20Memory%20Reader%20Datasheet.pdf. [Ημερομηνία ανάκτησης Φεβρουάριος 2021].