

Το διαστημικό πρόγραμμα Apollo

Διονύσης Στεφανάτος

Ειδικός Επιστήμονας, Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων

1. Εισαγωγή και επισκόπηση του προγράμματος

Το ταξίδι στη Σελήνη και η εξερεύνηση της αποτελούσε ανέκαθεν ένα όνειρο που εξίταρε την ανθρώπινη φαντασία. Στο μυθιστόρημα του Λουκιανού «Αληθινή Ιστορία», που γράφτηκε τον 2^ο αιώνα μ.Χ., ο συγγραφέας πραγματεύεται ένα φανταστικό ταξίδι στη Σελήνη, την οποία παρουσιάζει κατοικημένη από αλλόκοτα όντα [1]. Στα νεότερα χρόνια, ο πατέρας της επιστημονικής φαντασίας, Ιούλιος Βερν, προτείνει στο μυθιστόρημά του «Από τη Γη στη Σελήνη», τη χρήση ενός τεράστιου κανονιού για την εκτόξευση μιας οβίδας-διαστημοπλοίου με τρεις αστροναύτες προς τη Σελήνη [2]. Το πρωτόγονο αυτό διαστημόπλοιο δεν καταφέρνει να προσεδαφιστεί στη Σελήνη, λόγω της βαρυτικής επίδρασης ενός αστεροειδούς που δεν είχε ληφθεί υπόψιν, αλλά διαγράφει μέρος της τροχιάς του γύρω από αυτήν, πριν επιστρέψει τελικά στη Γη, όπως περιγράφεται στο βιβλίο-συνέχεια «Γύρω από τη Σελήνη» [3]. Στα δύο αυτά βιβλία, που γράφτηκαν το 19^ο αιώνα, ο Βερν έκανε κάποιες πραγματικά εντυπωσιακές προβλέψεις [4]. Διείδε τη δυναμική των ΗΠΑ για ανάπτυξη και υπέδειξε ως καταλληλότερο σημείο εκτόξευσης τη Φλόριντα, το κοντινότερο σημείο των ΗΠΑ στον ισημερινό, όπου η βαρύτητα είναι μικρότερη και η ταχύτητα περιστροφής στην επιφάνεια της Γης μεγαλύτερη. Υπολόγισε με μεγάλη προσέγγιση τις διαστάσεις και το βάρος του διαστημοπλοίου, για την κατασκευή του οποίου προέκρινε τη χρήση αλουμινίου αντί του βαρύτερου χάλυβα. Ακόμη, προέβλεψε τον αριθμό των αστροναυτών στο διαστημόπλοιο (τρεις), αλλά και την επιστροφή με προσθαλάσσωση στον Ειρηνικό ωκεανό. Παρά τις εκπληκτικές προβλέψεις του μεγάλου οραματιστή, το προαιώνιο όνειρο του ανθρώπου να ταξιδέψει στο φεγγάρι δεν έμελλε να γίνει πραγματικότητα πριν το δεύτερο μισό του 20^ο αιώνα.

Το πρόγραμμα Apollo [5] της NASA (National Aeronautics and Space Administration) είχε σαν στόχο «την αποστολή ανθρώπων στη Σελήνη και την ασφαλή επιστροφή τους στη Γη» μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '60, όπως διατυπώθηκε από τον πρόεδρο Κέννεντυ στην ιστορική ομιλία του στο Αμερικανικό Κογκρέσο στις 25/5/1961. Ενάμιση μήνα πριν, οι Σοβιετικοί είχαν αποκτήσει προβάδισμα στην κούρσα του διαστήματος με την τεράστια επιτυχία της αποστολής του πρώτου κοσμοναύτη σε τροχιά γύρω από τη Γη, του Γιούρι Γκαγκάριν. Το πρόγραμμα πήρε το όνομά του από τον Έλληνα θεό του φωτός Απόλλωνα, που σύμφωνα με την Ελληνική μυθολογία οδηγούσε ένα ηλιακό άρμα στον ουρανό.

Το πρόγραμμα Apollo διήρκεσε από το 1961 μέχρι το 1972. Προηγήθηκαν κάποιες μη επανδρωμένες αποστολές, ενώ το πλήρωμα της πρώτης επανδρωμένης αποστολής αποφάσισε να δώσει στο εγχείρημα το όνομα Apollo 1. Η αποστολή αυτή σημαδεύτηκε από το θάνατο του πληρώματος από ασφυξία, λόγω πυρκαγιάς που ξέσπασε στην καμπίνα κατά τη διάρκεια δοκιμής που έγινε στο έδαφος, πριν την εκτόξευση. Η αρίθμηση των αποστολών που ακολούθησαν θα ξεκινούσε από το Apollo 4, για να καλύψει τις πρώτες μη επανδρωμένες δοκιμές, ενώ το Apollo 1 αποσύρθηκε για να τιμήσει το πλήρωμα που χάθηκε. Οι αποστολές

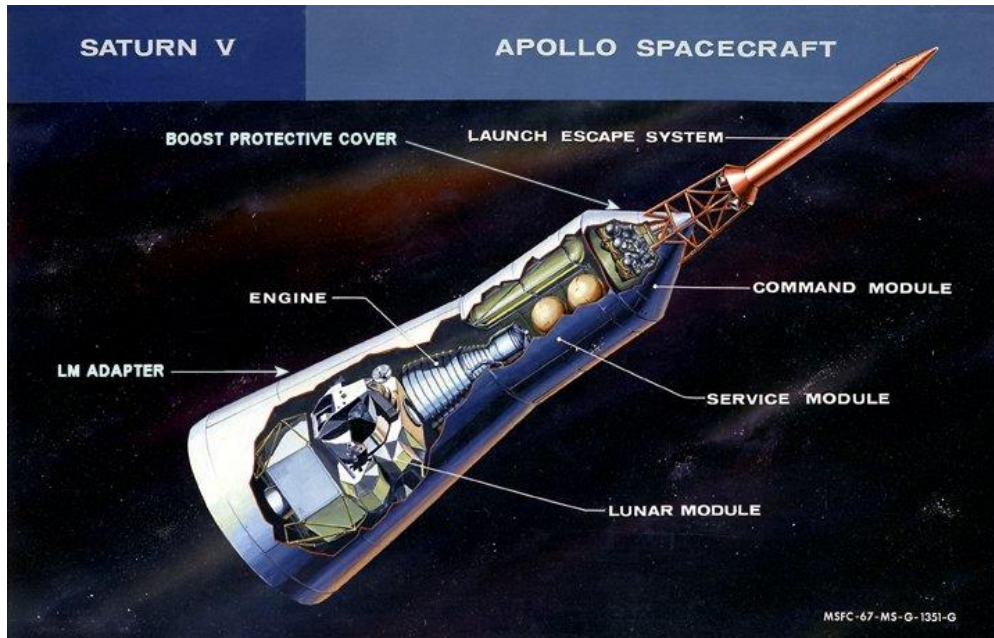
Apollo 4-6 ήταν μη επανδρωμένες δοκιμές του εξοπλισμού, ενώ η πρώτη επιτυχημένη επανδρωμένη αποστολή ήταν η Apollo 7, κατά τη διάρκεια της οποίας δοκιμάστηκε το διαστημόπλοιο σε τροχιά γύρω από τη Γη. Σημαντικός σταθμός για την πραγματοποίηση του προγράμματος ήταν η αποστολή Apollo 8, όπου για πρώτη φορά επανδρωμένο διαστημόπλοιο τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη. Κατά τη διάρκεια της αποστολής Apollo 9, δοκιμάστηκαν σε τροχιά γύρω από τη Γη η πτήση της σεληνακάτου και οι διαδικασίες αποδέσμευσης και επανασύνδεσης της με το διαστημόπλοιο, ενώ η αποστολή Apollo 10, όπου το διαστημόπλοιο τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη και η σεληνάκατος κατέβηκε σε ύψος μόλις 15 km πάνω από την επιφάνειά της, αποτέλεσε τη γενική πρόβα πριν το μεγάλο βήμα. Στις 20/07/1969 και ώρα 20:17:40 UTC (Coordinated Universal Time), οι αστροναύτες Νηλ Άρμστρονγκ και Μπαζ Όλντριν, στα πλαίσια της αποστολής Apollo 11, προσεδάφισαν τη σεληνάκατο «Αετός» στη Θάλασσα της Γαλήνης στην επιφάνεια της Σελήνης, ενώ ο τρίτος αστροναύτης Μάικλ Κόλινς έμεινε στο διαστημόπλοιο σε τροχιά γύρω από το φεγγάρι. Με την αποστολή αυτή πραγματοποιήθηκε ο βασικός στόχος του προγράμματος, όπως είχε τεθεί από τον ίδιο τον πρόεδρο Κέννεντυ στις αρχές της δεκαετίας του '60. Από τις αποστολές Apollo 12-14 που ακολούθησαν, ξεχωρίζει η Apollo 13, όπου μια έκρηξη σε δεξαμενή υγρού καυσίμου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού προς τη Σελήνη οδήγησε στη ματαίωσή της, ενώ το πλήρωμα μπόρεσε να επιστρέψει στη Γη χρησιμοποιώντας τη σεληνάκατο ως «σωσίβια λέμβο». Το πρόγραμμα ολοκληρώθηκε με τις αποστολές Apollo 15-17, όπου χρησιμοποιήθηκε στην επιφάνεια της Σελήνης το όχημα Lunar Rover Vehicle (LVR), παρέχοντας στα πλήρωμα περισσότερες δυνατότητες εξερεύνησης. Στην τελευταία αποστολή, Apollo 17, τοποθετήθηκε πλάκα στην επιφάνεια της Σελήνης, με το ακόλουθο επίγραμμα: «Εδώ ο άνθρωπος ολοκλήρωσε τις πρώτες του εξερευνήσεις στην επιφάνεια της Σελήνης, Δεκέμβριος 1972 μ.Χ. Είθε το πνεύμα της ειρήνης, με το οποίο ήρθαμε, να διαχυθεί στις ζώες όλης της ανθρωπότητας»

Για την πραγματοποίηση ενός τόσο μεγαλεπήβολου εγχειρήματος όπως το πρόγραμμα Apollo, χρειάστηκε να διατεθούν πόροι σε πρωτοφανή κλίμακα εν καιρώ ειρήνης. Υπολογίζεται ότι το συνολικό κόστος του προγράμματος ξεπέρασε τα 100 δις δολάρια σε τιμές 2010. Στα πλαίσια του προγράμματος, δώδεκα συνολικά αστροναύτες περπάτησαν στην επιφάνεια της Σελήνης, ενώ 382 kg σεληνιακών πετρωμάτων μεταφέρθηκαν στη Γη, συμβάλλοντας αποφασιστικά στην κατανόηση της γεωλογικής σύνθεσης και ιστορίας του γειτονικού μας πλανήτη. Χάρη στο πρόγραμμα Apollo, η NASA απέκτησε την τεχνογνωσία και τις επιχειρησιακές ικανότητες για επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις, καθώς και τη συνακόλουθη αίγλη του πρωτοπόρου οργανισμού στην εξερεύνηση του διαστήματος.

2. Περιγραφή του διαστημοπλοίου των αποστολών Apollo

Ο τύπος του διαστημοπλοίου που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα Apollo [6] αποτελείτο από τρία κύρια μέρη (βλέπε παρακάτω σχήμα): ένα συνδυασμένο τμήμα εντολών/λειτουργιών (CSM, Command/Service Module) και τη σεληνάκατο (Lunar Module). Η κατασκευή συμπληρωνόταν από δύο ακόμα μέρη, τον προσαρμογέα διαστημοπλοίου-σεληνακάτου (SLA, Spacecraft Lunar Module Adapter), που παρείχε προστασία στη σεληνάκατο από τις αεροδυναμικές πιέσεις κατά την εκτόξευση και συνέδεε το διαστημόπλοιο με το όχημα εκτόξευσης, και το όχημα διαφυγής κατά την εκτόξευση (LES, Launch Escape System), που

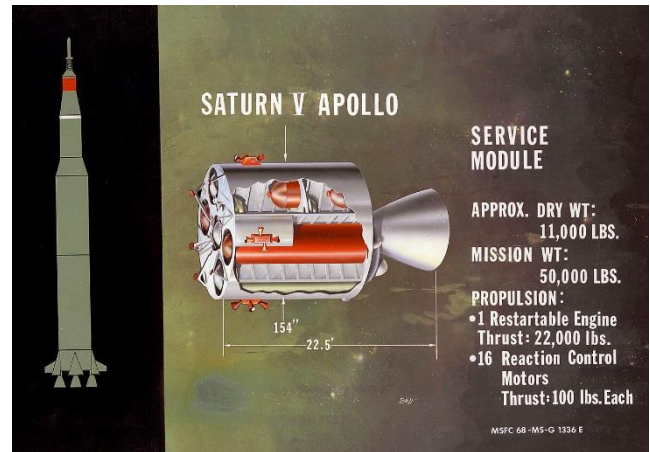
σκοπός του ήταν η άμεση απομάκρυνση από το όχημα εκτόξευσης του τμήματος εντολών μαζί με το πλήρωμα σε περίπτωση ατυχήματος.



Η δομή αυτή του διαστημοπλοίου υπαγορευόταν από τη μέθοδο που είχε επιλεγεί για την επίτευξη του στόχου του προγράμματος. Συγκεκριμένα, το όχημα εκτόξευσης, που ήταν ένας προωθητικός πύραυλος Saturn V, θα έδινε στο διαστημόπλοιο την αναγκαία ταχύτητα για να ξεφύγει από τη γήινη έλξη και να εισέλθει στη σφαίρα επιρροής της Σελήνης, όπου θα ετίθετο σε τροχιά γύρω από αυτήν. Το τμήμα εντολών/λειτουργιών θα παρέμενε σε τροχιά με έναν αστροναύτη (CMP, Command Module Pilot), ενώ η σεληνάκατος θα αποσυνδεόταν και θα κατέβαινε στη σεληνιακή επιφάνεια με τους άλλους δύο (CDR, Commander, LMP, Lunar Module Pilot). Μετά την ολοκλήρωση της προγραμματισμένης εξερεύνησης, η σεληνάκατος θα επανασυνδεόταν με το τμήμα εντολών/λειτουργιών σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη, ώστε οι δύο αστροναύτες να επανεισέλθουν στο τμήμα εντολών, και μετά θα απορριπτόταν. Το τμήμα εντολών/λειτουργιών θα αποτελούσε το όχημα επιστροφής στη Γη. Πριν την είσοδο στη γήινη ατμόσφαιρα το τμήμα λειτουργιών θα απορριπτόταν, και μόνο το τμήμα εντολών θα επέστρεφε με το πλήρωμα στη γήινη επιφάνεια. Η μέθοδος υλοποίησης των διαστημικών αποστολών Apollo που περιγράψαμε παραπάνω, πήρε το χαρακτηριστικό όνομα «ραντεβού σε σεληνιακή τροχιά» (Lunar Orbit Rendezvous). Έχοντας δώσει το γενικό περίγραμμα μιας επανδρωμένης αποστολής στο φεγγάρι, στις επόμενες παραγράφους περιγράφουμε με περισσότερες λεπτομέρειες τα διάφορα τμήματα του διαστημοπλοίου και τις λειτουργίες τους.

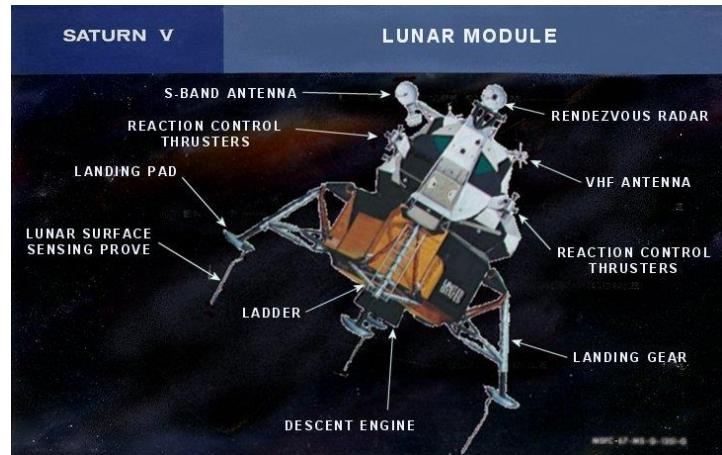
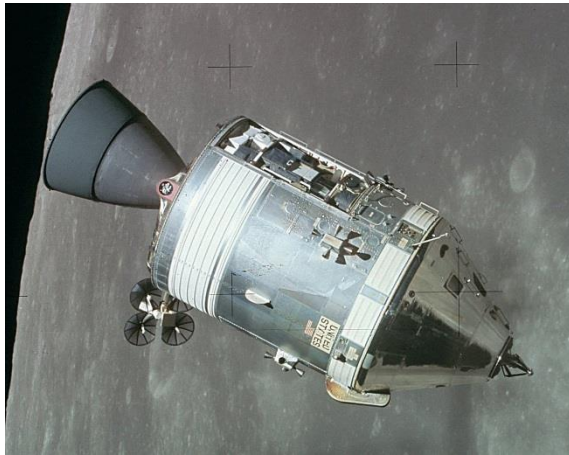
Το τμήμα εντολών (CM, Command Module, κάτω δεξιά εικόνα) ήταν μία κάψουλα κωνικού σχήματος που αποτελούσε το κέντρο ελέγχου του διαστημοπλοίου και το χώρο διαβίωσης του πληρώματος. Περιλάμβανε την καμπίνα του πληρώματος, τον πίνακα ελέγχου, το σύστημα καθοδήγησης, πλοήγησης και ελέγχου, συστήματα επικοινωνιών και μπαταρίες. Ήταν το μόνο τμήμα του διαστημοπλοίου που θα επέστρεφε στη Γη, γι' αυτό και διέθετε αυτόνομο σύστημα αλλαγής του προσανατολισμού για την πραγματοποίηση κατάλληλων ελιγμών πριν την επανείσοδο στη γήινη ατμόσφαιρα, θερμική ασπίδα για προστασία από την αναπτυσσόμενη

θερμότητα λόγω τριβής, αλλά και σύστημα αλεξιπτωτών για επιβράδυνση πριν την τελική προσθαλάσσωση. Το ύψος της κάψουλας ήταν 3.48 m, η διάμετρος βάσης 3.91 m, ενώ ζύγιζε περίπου 5560 kg.



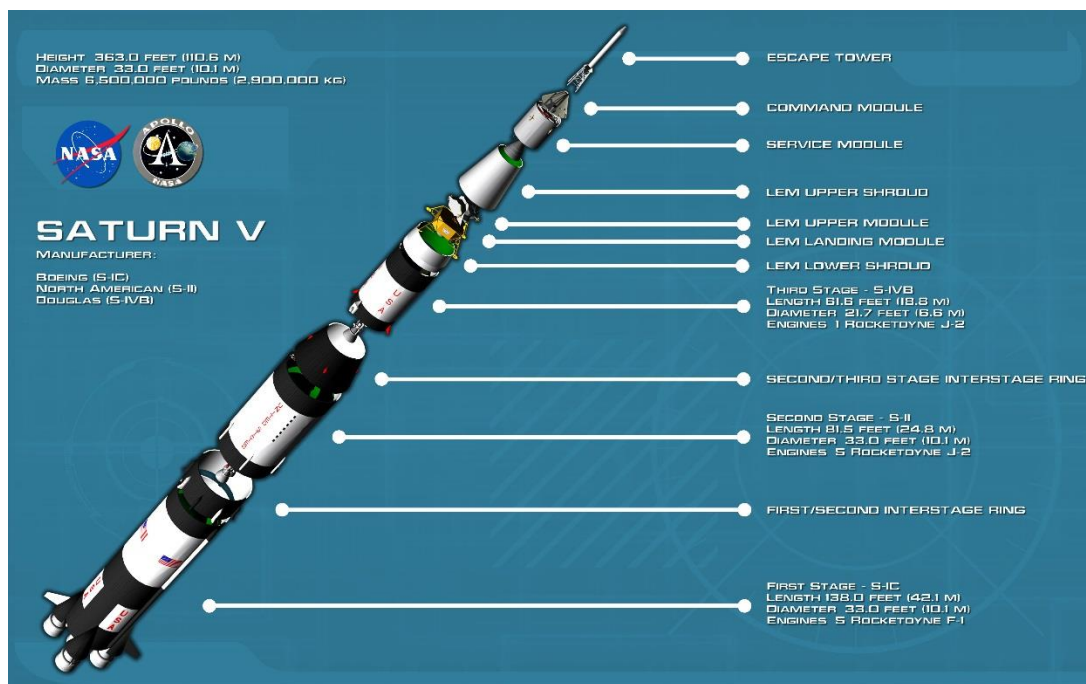
Το κυλινδρικό τμήμα λειτουργιών (Service Module, πάνω δεξιά εικόνα) παρείχε υποστήριξη στο τμήμα εντολών μέσω διαφόρων υπηρεσιών. Διέθετε αυτόνομο σύστημα προώθησης, το οποίο χρησιμοποιείτο για την είσοδο/έξοδο του διαστημοπλοίου από σεληνιακή τροχιά, καθώς και για ενδιάμεσους διορθωτικούς ελιγμούς κατά τη διάρκεια του ταξιδιού από τη Γη στη Σελήνη. Η προωθητική μηχανή και τα απαραίτητα καύσιμα καταλάμβαναν το μεγαλύτερο μέρος αυτού του τμήματος. Διέθετε ακόμη σύστημα ελέγχου του προσανατολισμού, κεραία για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, καθώς και κυψέλη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούσε υγρό υδρογόνο και οξυγόνο. Η κυψέλη παρήγαγε επίσης πόσιμο νερό, ενώ το οξυγόνο υποστήριζε και την αναπνευστική λειτουργία του πληρώματος. Στις τελευταίες αποστολές Apollo 15-17, το τμήμα λειτουργιών μετέφερε και ένα πακέτο με διάφορα επιστημονικά όργανα. Επισημαίνουμε ότι το τμήμα λειτουργιών παρέμενε προσδεδμεμένο στο τμήμα εντολών κατά το μεγαλύτερο μέρος της αποστολής, βλέπε την κάτω δεξιά εικόνα, αφού η απόρριψή του λάμβανε χώρα μόλις πριν την επανείσοδο στη γήινη ατμόσφαιρα. Είχε ύψος 7.5 m, διάμετρο βάσης 3.91 m (ίδια με του τμήματος εντολών), και βάρος περίπου 24000 kg.

Η σεληνάκατος (LM, Lunar Module, κάτω αριστερά εικόνα) ήταν ένα ξεχωριστό όχημα που σχεδιάστηκε για να μεταφέρει τους αστροναύτες από το μητρικό διαστημόπλοιο, που βρισκόταν σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη, στην επιφάνειά της, και μετά να τους γυρίσει πίσω ώστε να ξεκινήσουν το ταξίδι της επιστροφής στη Γη. Ήταν μια πολύ ελαφριά κατασκευή χωρίς αεροδυναμικές προδιαγραφές, αφού προοριζόταν για λειτουργία αποκλειστικά στο διάστημα και όχι εντός της γήινης ατμόσφαιρας. Αποτελείτο από δύο ξεχωριστά τμήματα, ανόδου και καθόδου, το καθένα με τη δική του μηχανή προώθησης. Το τμήμα καθόδου περιλάμβανε ακόμα τα απαραίτητα καύσιμα, το μηχανισμό προσσελήνωσης, αναλώσιμα για την παραμονή στη Σελήνη και τον εξοπλισμό επιφανειακής εξερεύνησης. Το τμήμα ανόδου διέθετε, πέρα από ξεχωριστή μηχανή προώθησης και καύσιμα, την καμπίνα του πληρώματος, πίνακες ελέγχου, συστήματα οπτικής και ηλεκτρονικής καθοδήγησης, σύστημα ελέγχου του προσανατολισμού, ραντάρ και κεραία επικοινωνίας, ό,τι χρειαζόταν δηλαδή για να μπορέσει να επιστρέψει σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη και να επανασυνδεθεί με το μητρικό διαστημόπλοιο.



3. Ο προωθητικός πύραυλος Saturn V

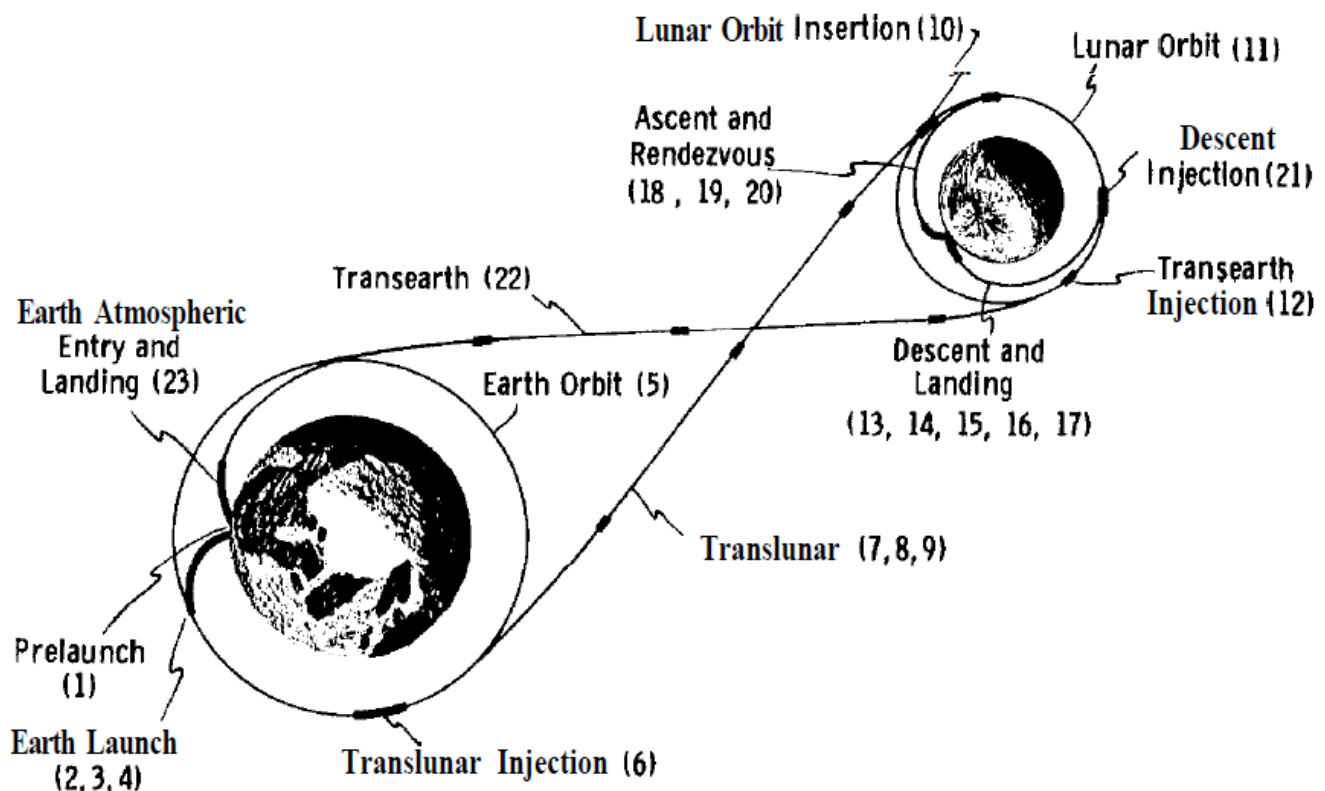
Ως όχημα εκτόξευσης (launch vehicle) στις αποστολές Apollo χρησιμοποιήθηκε ο προωθητικός πύραυλος Saturn V [7]. Αποστολή του οχήματος εκτόξευσης ήταν να προσδώσει στο διαστημόπλοιο, που ήταν τοποθετημένο στην κορυφή του πυραύλου, την απαραίτητη ταχύτητα ώστε να ξεφύγει από την έλξη της Γης και να φτάσει κοντά στη Σελήνη, όπου θα χρησιμοποιούσε τις δικές του μηχανές για να τεθεί σε τροχιά γύρω από αυτήν. Ο πύραυλος Saturn V σχεδιάστηκε υπό την καθοδήγηση των Βέρνερ φον Μπράουν και Άρθουρ Ρούντολφ, βετεράνων του Γερμανικού πυραυλικού προγράμματος κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, στο διαστημικό κέντρο Μάρσαλ της Αλαμπάμα.



Το ύψος του πυραύλου ήταν περίπου 111 m και η διάμετρός του περίπου 10 m. Το ωφέλιμο

φορτίο που μπορούσε να επιταχύνει ώστε αυτό να φτάσει στη Σελήνη ανήλθε στα 47000 kg, στις τελευταίες προχωρημένες αποστολές Apollo. Παραμένει ο υψηλότερος, βαρύτερος και ισχυρότερος πύραυλος που βρέθηκε ποτέ σε επιχειρησιακή λειτουργία. Αποτελείτο από τρία στάδια και μία μονάδα οργάνων. Το πρώτο στάδιο S-IC χρησιμοποιούσε ως καύσιμο το RP-1, μια μορφή κηροζίνης, ενώ τα υπόλοιπα δύο στάδια, S-II και S-IVB, χρησιμοποιούσαν υγρό υδρογόνο. Και στα τρία στάδια η ανάφλεξη γινόταν με τη χρήση υγρού οξυγόνου. Η μονάδα οργάνων ήταν τοποθετημένη στην κορυφή του τρίτου σταδίου και ο υπολογιστής της ήλεγχε τις λειτουργίες του πυραύλου, από πριν την εκτόξευση μέχρι την απόρριψη του τρίτου σταδίου. Περιλάμβανε συστήματα καθοδήγησης και τηλεμετρίας που, μετρώντας την επιτάχυνση και τον προσανατολισμό του οχήματος, μπορούσαν να υπολογίσουν τη θέση και την ταχύτητα του πυραύλου και να διορθώσουν τις όποιες αποκλίσεις.

4. Οι φάσεις μιας επανδρωμένης αποστολής στη Σελήνη



Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι διάφορες φάσεις μιας επανδρωμένης αποστολής στη Σελήνη [8]. Οι έντονες γραμμές αντιστοιχούν στα σύντομα διαστήματα κατά τα οποία εφαρμόζεται κάποια ώθηση στο διαστημικό όχημα, ενώ οι λεπτές γραμμές αντιστοιχούν στα μεγαλύτερης διάρκειας διαστήματα ελεύθερης πτήσης, όπου το διαστημικό όχημα κινείται υπό την επίδραση μόνο βαρυτικών δυνάμεων. Στη συνέχεια περιγράφουμε τα κύρια βήματα που λαμβάνουν χώρα σε καθεμία από τις εικονιζόμενες φάσεις της αποστολής.

4.1. Προετοιμασία-Εκτόξευση-Είσοδος σε τροχιά γύρω από τη Γη

Πριν την εκτόξευση πραγματοποιείται σχολαστικός έλεγχος και προετοιμασία του εξοπλισμού πτήσης. Ο έλεγχος συνεχίζεται και κατά τη διάρκεια της αντίστροφης μέτρησης, όπου δίνεται έμφαση στην προετοιμασία των δύο συστημάτων καθοδήγησης που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εκτόξευση. Αυτά είναι το σύστημα καθοδήγησης του προωθητικού πυραύλου Saturn, που βρίσκεται στη μονάδα οργάνων του πυραύλου και ελέγχει το όχημα εκτόξευσης, και το σύστημα καθοδήγησης του διαστημοπλοίου, που βρίσκεται στο τμήμα εντολών και δίνει στους αστροναύτες τη δυνατότητα παρακολούθησης του συστήματος καθοδήγησης του πυραύλου κατά την εκτόξευση. Η λειτουργία και των δύο συστημάτων στηρίζεται στη χρήση αδρανειακών αισθητήρων. Ο εξοπλισμός εδάφους επικοινωνεί απευθείας με τα συστήματα καθοδήγησης για να διαβάσει τις ακριβείς αρχικές συνθήκες πριν την εκτόξευση.

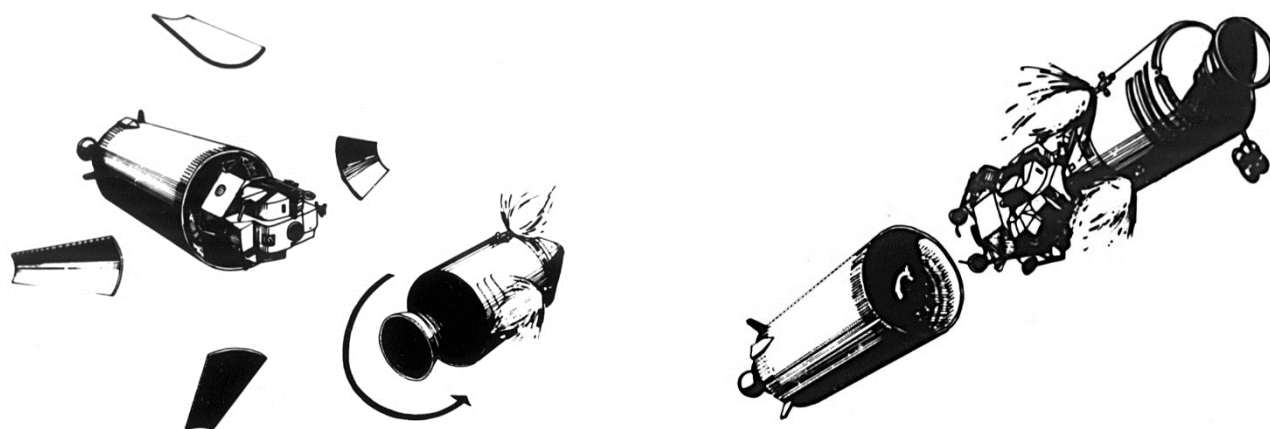
Με την ολοκλήρωση της αντίστροφης μέτρησης ξεκινά η εκτόξευση. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, το σύστημα καθοδήγησης του πυραύλου τον κατευθύνει σε μια προσχεδιασμένη τροχιά, ώστε να περάσει με ασφάλεια μέσα από την ατμόσφαιρα, όπου το αεροδυναμικό φορτίο είναι υψηλό. Και τα δύο συστήματα καθοδήγησης (του πυραύλου και του διαστημοπλοίου) μετρούν συνεχώς την κίνηση του οχήματος και υπολογίζουν τη θέση και την ταχύτητα. Οι αστροναύτες παρακολουθούν τις ενδείξεις των οργάνων και εάν κρίνουν ότι η αποστολή είναι σε κίνδυνο μπορούν να πυροδοτήσουν το σύστημα διαφυγής, έναν πύραυλο στην κορυφή του τμήματος εντολών που μπορεί να το απομακρύνει άμεσα από το υπόλοιπο όχημα, ενώ αλεξίπτωτα χρησιμοποιούνται αργότερα για την ομαλή προσγείωσή του. Μετά την εξάντληση του καυσίμου του πρώτου σταδίου και την απόρριψη της δεξαμενής, πυροδοτείται το δεύτερο στάδιο του πυραύλου. Σύντομα, το διαστημικό όχημα ξεπερνά τη γήινη ατμόσφαιρα, και σε αυτό το σημείο απορρίπτεται το σύστημα διαφυγής. Αν χρειαστεί εγκατάλειψη της αποστολής, αυτή μπορεί να γίνει με χρήση της προωθητικής μηχανής του τμήματος λειτουργιών, ώστε να επιταχύνει το διαστημόπλοιο μακριά από το υπόλοιπο όχημα. Το αεροδυναμικό φορτίο είναι αμελητέο κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου, οπότε το σύστημα καθοδήγησης του πυραύλου κατευθύνει το όχημα σε συνθήκες εισόδου σε γήινη τροχιά ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμου. Μετά την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου και την απόρριψη της αντίστοιχης δεξαμενής, ενεργοποιείται το τρίτο στάδιο, όπου συνεχίζεται η προώθηση του οχήματος μέχρι να αποκτήσει το κατάλληλο ύψος και ταχύτητα για να τεθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η μηχανή αυτού του σταδίου σταματά περίπου δώδεκα λεπτά μετά την εκτόξευση, έχοντας καταναλώσει μόνο ένα μικρό μέρος του διαθέσιμου καυσίμου.

Η ολοκλήρωση του τρίτου σταδίου εκτόξευσης βρίσκει το διαστημόπλοιο συνδεδεμένο ακόμα με το τρίτο τμήμα του πυραύλου, να εκτελεί σχεδόν κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη σε ύψος περίπου 185 km. Δεδομένα τηλεμετρίας από τους επίγειους σταθμούς παρακολούθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση της θέσης και της ταχύτητας στα συστήματα καθοδήγησης του πυραύλου και του διαστημοπλοίου. Το πλήρωμα του διαστημοπλοίου δύναται να κάνει και οπτικές μετρήσεις εν πτήσει, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλοήγηση του σκάφους αλλά και για την ευθυγράμμιση του αδρανειακού εξοπλισμού του συστήματος καθοδήγησης με κάποιο άστρο ή άλλο σημείο αναφοράς.

4.2. Εισαγωγή σε τροχιά προς τη Σελήνη

Μετά από μία με δύο περιφορές γύρω από τη Γη, η μηχανή του τρίτου τμήματος του πυραύλου Saturn επανενεργοποιείται για πέντε περίπου λεπτά, δίνοντας στο διαστημικό όχημα την απαραίτητη ώθηση για να ξεκινήσει το ταξίδι προς τη Σελήνη. Στις τρεις πρώτες επανδρωμένες αποστολές προς τη Σελήνη (Apollo 8, 10, 11), για λόγους ασφάλειας των αστροναυτών, το διαστημόπλοιο είχε τεθεί στη λεγόμενη τροχιά ελεύθερης επιστροφής (lunar free return trajectory). Η τροχιά αυτή είναι ομοεπίπεδη με την τροχιά τη Σελήνης, το διαστημόπλοιο περνάει από την πίσω μεριά του φεγγαριού και αν δεν του ασκηθεί περεταίρω ώθηση επιστρέφει στη Γη. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη για τη διάσωση του πληρώματος σε περίπτωση που δεν μπορέσει να λειτουργήσει η μηχανή του τμήματος λειτουργιών, για να θέσει το διαστημόπλοιο σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη. Στις αποστολές Apollo που ακολούθησαν, οι απαιτήσεις για καλύτερη φωτεινότητα του σημείου προσσελήνωσης υπαγόρευαν τη χρήση τροχιών σε διαφορετικό επίπεδο από αυτό της τροχιάς της Σελήνης [5]. Μοναδική εξαίρεση αποτέλεσε η αποστολή Apollo 13, όπου μετά το ατύχημα οι αστροναύτες χρησιμοποίησαν, σε αντίθεση με τον αρχικό σχεδιασμό, μια τροχιά ελεύθερης επιστροφής για να μπορέσουν να επιστρέψουν πίσω στη Γη.

Το διαστημικό όχημα που μπαίνει σε τροχιά προς τη Σελήνη πρέπει να αναδιαταχθεί για να μπορέσει να επιτελέσει τις υπόλοιπες λειτουργίες. Ο προσαρμογέας διαστημοπλοίου-σεληνακάτου ανοίγει και τα τέσσερα «πέταλα» που τον αποτελούν απομακρύνονται αφήνοντας εκτεθειμένη τη σεληνάκατο, όπως φαίνεται στην κάτω αριστερά εικόνα. Ο αστροναύτης-πιλότος απομακρύνει το τμήμα εντολών/λειτουργιών σε ασφαλή απόσταση και το περιστρέφει κατά 180°, στρέφοντας την κωνική μύτη προς τη σεληνάκατο, η οποία παραμένει εν μέρει ενθυλακωμένη στο τρίτο τμήμα του πυραύλου Saturn. Το σύστημα ελέγχου του πυραύλου διατηρεί σταθερό τον προσανατολισμό της σεληνακάτου, ώστε να μπορέσει ο πιλότος να «κουμπώσει» με επιτυχία την κωνική μύτη του διαστημοπλοίου στη σεληνάκατο. Με την ολοκλήρωση αυτής της μανούβρας, το τμήμα εντολών/λειτουργιών με προσδεσμένη τη σεληνάκατο απομακρύνονται από τα υπολείμματα του πυραύλου, όπως φαίνεται στην κάτω δεξιά εικόνα. Αυτό είναι το διαστημόπλοιο που συνεχίζει το ταξίδι προς τη Σελήνη.

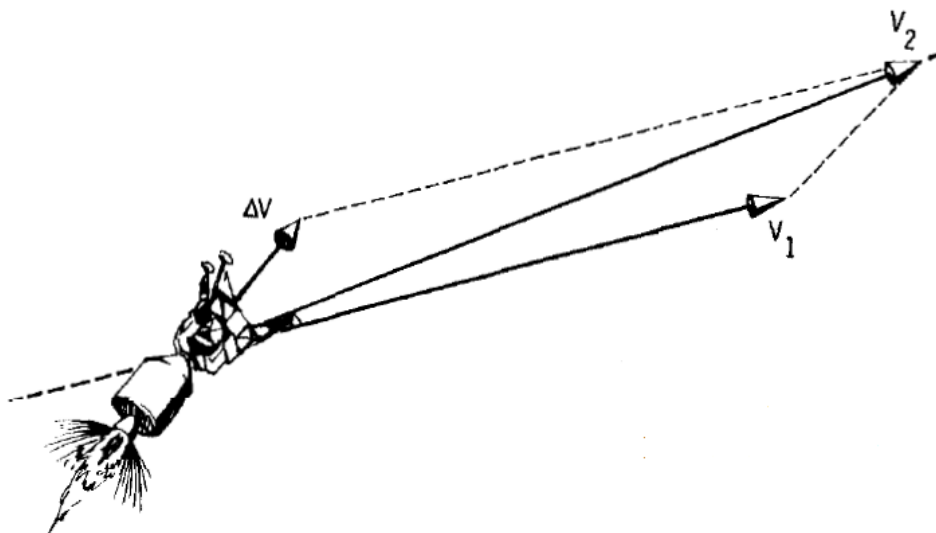


4.3. Πορεία προς τη Σελήνη-Ενδιάμεσες διορθώσεις:

Πολύ σύντομα μετά την είσοδο του διαστημοπλοίου σε τροχιά προς τη Σελήνη, πραγματοποιούνται μετρήσεις που εν συνεχεία επεξεργάζονται ώστε να εξεταστεί κατά πόσον

η τροχιά αυτή είναι αποδεκτή. Τα δεδομένα αυτά ενδέχεται να καταδείξουν την ανάγκη ενός πρώιμου διορθωτικού ελιγμού, προτού μεγαλώσει το σφάλμα στην τροχιά και χρειάζονται περισσότερα καύσιμα για τη διόρθωσή του. Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης διόρθωσης, η πλοήγηση του διαστημοπλοίου μπορεί να συνεχιστεί σε πιο χαλαρούς ρυθμούς. Δεδομένα παρακολούθησης της τροχιάς μπορούν να σταλούν από τη Γη με τηλεμετρία όποτε είναι διαθέσιμα. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα αλλά και εν πτήση μετρήσεις με τον εξάντα, π.χ. γωνίες χαρακτηριστικών σημείων (landmarks) ως προς τα άστρα, ο υπολογιστής του σκάφους μπορεί να διορθώσει το διάνυσμα κατάστασης του διαστημοπλοίου (θέση και ταχύτητα) που έχει αποθηκευμένο.

Ο αστροναύτης-πλοηγός εξετάζει περιοδικά την εκτίμηση του υπολογιστή για την αβεβαιότητα στη θέση και την ταχύτητα του διαστημοπλοίου, καθώς και την εκτίμηση της απαιτούμενης διόρθωσης στην ταχύτητα ώστε να βελτιωθεί η τρέχουσα τροχιά. Αν η αβεβαιότητα στη θέση και την ταχύτητα είναι μικρές, και η συνιστώμενη διόρθωση στην ταχύτητα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αξίζει τον κόπο, το πλήρωμα θα ετοιμαστεί για να εκτελέσει τον διορθωτικό ελιγμό. Κάθε τέτοια διόρθωση της ταχύτητας απαιτεί πρώτα τον κατάλληλο προσανατολισμό του διαστημοπλοίου, ώστε να ευθυγραμμιστεί ο άξονας ώθησης με την επιθυμητή κατεύθυνση επιτάχυνσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μόλις ολοκληρωθεί η ευθυγράμμιση, η μηχανή του τμήματος λειτουργιών πυροδοτείται, υπό τον έλεγχο και τη συνεχή μέτρηση του συστήματος καθοδήγησης. Η χρήση του συστήματος καθοδήγησης απαιτεί προηγουμένως την ευθυγράμμιση του αδρανειακού συστήματος μέτρησης, κάτι που επιτυγχάνεται οπτικά χρησιμοποιώντας τις διευθύνσεις των άστρων.



4.4. Είσοδος σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη

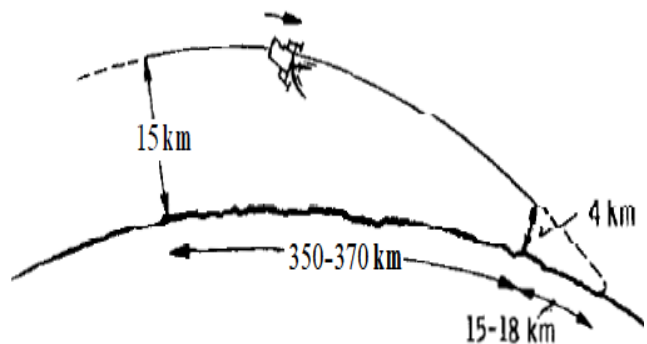
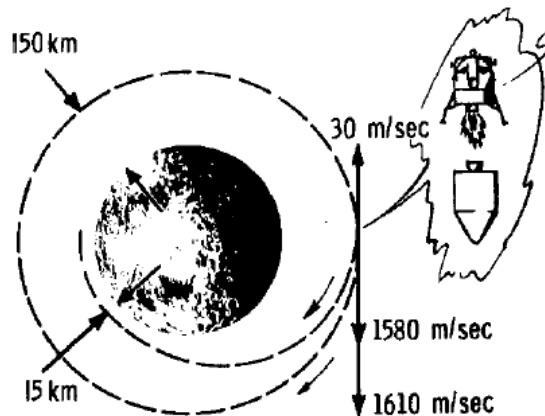
Με τις διορθωτικές μανούβρες η τροχιά του διαστημοπλοίου προσαρμόζεται ώστε αυτό τελικά προσεγγίζει τη Σελήνη στο επιθυμητό ύψος. Όταν αυτό συμβεί, η μηχανή του τμήματος λειτουργιών πυροδοτείται ώστε να μειώσει την ταχύτητα του διαστημοπλοίου, το οποίο έτσι τίθεται σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Σελήνη σε ύψος περίπου 150 km. Το επίπεδο της τροχιάς επιλέγεται έτσι ώστε να περνά πάνω από την περιοχή προσεδάφησης, στην μπροστινή πλευρά

του φεγγαριού.

Ενόςω το διαστημόπλοιο βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη, γίνονται διαρκώς μετρήσεις πλοήγησης για την ενημέρωση του συστήματος με τις ακριβείς παραμέτρους της τροχιάς. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν, εκτός των άλλων, την παρατήρηση χαρακτηριστικών σημείων στην επιφάνειά της Σελήνης καθώς και των φάσεων συγκεκριμένων αστερών, που διευκολύνεται από την έλλειψη ατμόσφαιρας. Σε αυτή τη φάση, είναι απαραίτητο να γίνουν επαρκείς μετρήσεις ώστε να δοθούν ακριβείς αρχικές συνθήκες στο σύστημα καθοδήγησης της σεληνακάτου για την ελεγχόμενη κάθοδό της στη σεληνιακή επιφάνεια. Πριν την αποκόλληση της σεληνακάτου από το υπόλοιπο διαστημόπλοιο, το πλήρωμα εξετάζει με οπτικά μεγεθυντικά όργανα την περιοχή προσεδάφισης.

4.5. Κάθοδος και προσσελήνωση

Δύο από τα μέλη του πληρώματος μεταβαίνουν στη σεληνάκατο, ενεργοποιούν τα συστήματά της και αναπτύσσουν το μηχανισμό προσεδάφισης, ενώ ο τρίτος αστροναύτης παραμένει στο κυρίως διαστημόπλοιο όπου συνεχίζει την πλοήγηση, ώστε να διατηρεί με επαρκή ακρίβεια τη θέση και την ταχύτητα του κυρίως οχήματος που παραμένει σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη. Μερικά λεπτά πριν την έναρξη της καθόδου, η σεληνάκατος αποχωρίζεται από το κυρίως σκάφος, το σύστημα καθοδήγησης της λαμβάνει την τελική ευθυγράμμιση από παρατηρήσεις αστερών, ενώ παίρνει και τον κατάλληλο προσανατολισμό για την εκτέλεση του ελιγμού. Η κάθοδος πραγματοποιείται με τη σύντομη πυροδότηση της μηχανής του τμήματος καθόδου της σεληνακάτου που μειώνει την ταχύτητά της, ώστε από την αρχική κυκλική τροχιά στα 150 km να κατέλθει σε ύψος 15 km, ακολουθώντας μια ελλειπτική τροχιά Hohmann [9], όπως φαίνεται στην κάτω αριστερά εικόνα.



Κατά τη διάρκεια της καθόδου, το μητρικό διαστημόπλοιο κάνει μετρήσεις παρακολούθησης ώστε να επιβεβαιώσει την τροχιά της σεληνακάτου ως προς αυτό. Για το μέρος της τροχιάς που περνά από τη μπροστινή πλευρά του φεγγαριού, μετρήσεις της τροχιάς από τη Γη παρέχουν έναν ακόμα ανεξάρτητο έλεγχο. Κατά τη διάρκεια της καθόδου, γίνεται έλεγχος και των διαφόρων συστημάτων ραντάρ. Το ραντάρ που θα χρησιμοποιηθεί στην άνοδο για το ραντεβού

επανασύνδεσης με το μητρικό διαστημόπλοιο ελέγχεται ως προς το ραντάρ του διαστημοπλοίου, ενώ σε χαμηλότερα ύψη ελέγχεται το ραντάρ προσεδάφησης, με τα εκπεμπόμενα ραδιοκύματα να ανακλώνται στη σεληνιακή επιφάνεια.

Όταν η σεληνάκος φτάσει σε ύψος 15 km πάνω από τη σεληνιακή επιφάνεια, η μηχανή καθόδου επανενεργοποιείται, μειώνοντας την ταχύτητα και το ύψος του οχήματος. Η φάση αυτή της ελεγχόμενης καθόδου διαρκεί μέχρι το ύψος των 4 km και κατά τη διάρκεια της η σεληνάκος διανύει μια απόσταση 350-370 km, όπως φαίνεται στην πάνω δεξιά εικόνα, προσεγγίζοντας το σημείο προσεδάφησης. Από το ύψος αυτό και κάτω, ο προσανατολισμός του οχήματος, ο ρυθμός καθόδου και η κατεύθυνση της πτήσης διατηρούνται ουσιαστικά σταθερά, ώστε το σημείο προσεδάφησης να φαίνεται σταθερό από το παράθυρο του οχήματος. Ένα απλό στόχαστρο στο παράθυρο και ένας αριθμός από τον υπολογιστή του οχήματος υποδεικνύουν το σημείο προσσελήνωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αν ο πιλότος κρίνει ότι το σημείο αυτό βρίσκεται σε περιοχή με μη ικανοποιητικά επιφανειακά χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλες γειτονικές, μπορεί να το αλλάξει στρέφοντας το όχημα μέχρι το στόχαστρο να τμήσει μια καλύτερη περιοχή. Εν συνεχεία, διαβάζει από τον υπολογιστή τον αριθμό που αντιστοιχεί στο νέο σημείο προσεδάφησης, και αφήνει το σύστημα καθοδήγησης να ανακατευθύνει το όχημα. Η έγκαιρη αλλαγή του σημείου προσσελήνωσης βοηθά στην εξοικονόμηση καυσίμου. Όταν η σεληνάκος φτάσει αρκετά κοντά στην επιφάνεια της Σελήνης, υπερίπταται για κάποιο χρονικό διάστημα (μέχρι δύο λεπτά) σε σταθερό ύψος, μέχρι να επιλέξει το πλήρωμα το ακριβές σημείο προσεδάφησης. Η προσσελήνωση γίνεται με τη σεληνάκο να προσεγγίζει το έδαφος κατακόρυφα και με μικρή ταχύτητα, καθοδηγούμενη από το αδρανειακό σύστημα, αφού η σκόνη που αναδύεται υποβαθμίζει τα δεδομένα του ραντάρ και περιορίζει το οπτικό πεδίο. Κατά τη διάρκεια της παραμονής στη Σελήνη, το πλήρωμα εκτελεί τα προγραμματισμένα πειράματα και συγκεντρώνει δείγματα από το έδαφος. Παράλληλα, τα συστήματα της σεληνακάτου προετοιμάζονται για την επιστροφή στο μητρικό διαστημόπλοιο.

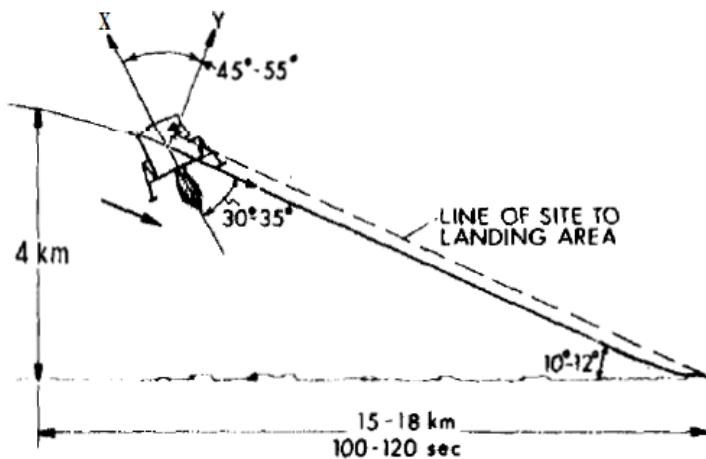


FIG. A

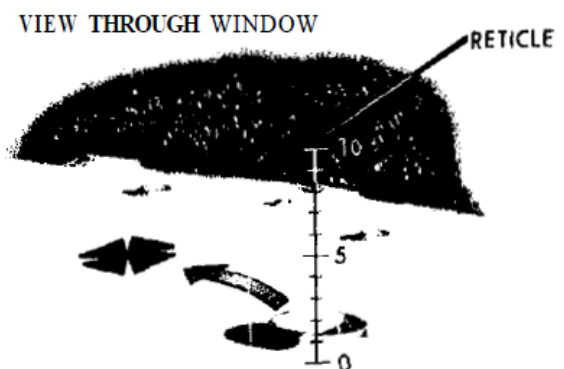


FIG. B

4.6. Άνοδος-Ραντεβού και επανασύνδεση με το μητρικό διαστημόπλοιο

Το τμήμα ανόδου της σεληνακάτου χρησιμοποιεί ως πλατφόρμα εκτόξευσης το τμήμα καθόδου, το οποίο εγκαταλείπεται στην επιφάνεια της Σελήνης. Η άνοδος του οχήματος πρέπει να ξεκινήσει την κατάλληλη χρονική στιγμή, ώστε να επιτευχθεί η συνάντηση με το μητρικό

διαστημόπλοιο. Αρχικά η σεληνάκατος απομακρύνεται από τη Σελήνη κατακόρυφα, ενώ στη συνέχεια στρέφεται, ώστε να μπει σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη. Η λειτουργία της μηχανής του οχήματος συνεχίζεται μέχρι το σύστημα καθοδήγησης να σηματοδοτήσει ότι έχει εισέλθει σε κατάλληλη τροχιά συνάντησης με το διαστημόπλοιο. Η τροχιά αυτή πρέπει να είναι αρκετά κυκλική ώστε να μη συναντά ξανά τη σεληνιακή επιφάνεια. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλείας, ώστε αν παρουσιάσει βλάβη η μηχανή του οχήματος κατά την επανεκκίνηση, αυτό να μπορεί να κινηθεί γύρω από τη Σελήνη μέχρι να εκτελέσει το μητρικό διαστημόπλοιο τους απαραίτητους ελιγμούς για την πρόσδεσή του.

Καθ' όλη τη διάρκεια της ανόδου, το ραντάρ της σεληνακάτου πραγματοποιεί μετρήσεις κατεύθυνσης και απόστασης του μητρικού διαστημοπλοίου. Με βάση τις μετρήσεις αυτές ο υπολογιστής του σκάφους κάνει την πλοήγηση, προσδιορίζοντας μικρές αλλαγές στη ταχύτητα που διορθώνουν την τροχιά προς το διαστημόπλοιο. Η προσέγγιση με κλειστή τη μηχανή συνεχίζεται μέχρι η σεληνάκατος να φτάσει σε απόσταση περίπου 10 km από το διαστημόπλοιο, έχοντας διαγράψει μια τροχιά περίπου 180° γύρω από τη Σελήνη.

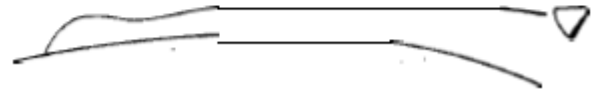
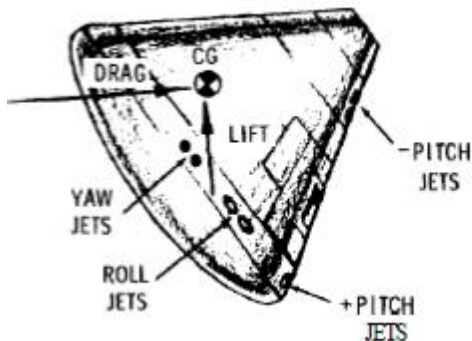
Κατά την τελική φάση της συνάντησης των δύο οχημάτων, η σεληνάκατος ελαττώνει σταδιακά την ταχύτητά της υπό τον έλεγχο του συστήματος καθοδήγησης, που χρησιμοποιεί δεδομένα από τους αδρανειακούς αισθητήρες και το ραντάρ. Στόχος είναι να μειωθεί στο μηδέν η σχετική ταχύτητα της σεληνακάτου ως προς το διαστημόπλοιο σε ένα σημείο κοντά σε αυτό, ώστε να μπορέσει ο πιλότος της να πραγματοποιήσει τους ελιγμούς πρόσδεσης. Αν για κάποιο λόγο η σεληνάκατος δεν μπορεί να εκτελέσει αυτούς τους ελιγμούς, το μητρικό διαστημόπλοιο είναι σε θέση να αναλάβει τον ενεργητικό ρόλο στη διαδικασία πρόσδεσης. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, το πλήρωμα της σεληνακάτου μεταφέρεται στο μητρικό διαστημόπλοιο μαζί με τα δείγματα που συνέλλεξε, ενώ η σεληνάκατος απορρίπτεται. Στις αποστολές Apollo 12, 14, 15 και 17, η απόρριψη της σεληνακάτου έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε να χτυπήσει σε συγκεκριμένα σημεία στην επιφάνεια της Σελήνης, προκαλώντας έτσι σεισμικά πειράματα.

4.7. Επιστροφή στη Γη-Είσοδος στη γήινη ατμόσφαιρα-Προσθαλάσωση

Όσο το διαστημόπλοιο που έχει απομείνει (τμήμα εντολών/λειτουργιών) βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη, γίνονται μετρήσεις πλοήγησης για να προσδιοριστούν οι κατάλληλες αρχικές συνθήκες για το ταξίδι της επιστροφής στη Γη. Στόχος είναι η σύντομη πυροδότηση της μηχανής να γίνει την κατάλληλη χρονική στιγμή, ώστε να θέσει το διαστημόπλοιο σε τροχιά που θα το φέρει σε αποδεκτές συνθήκες εισόδου στη γήινη ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού της επιστροφής, ο προσανατολισμός του διαστημοπλοίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε η κεραία επικοινωνιών να «βλέπει» προς τη Γη, ενώ θα πρέπει επίσης να αλλάζει τακτικά, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση της ίδιας πλευράς από τον Ήλιο. Κάποιες ενδιάμεσες μανούβρες είναι απαραίτητες για να εξασφαλιστεί ότι το διαστημόπλοιο θα προσεγγίσει τη Γη περνώντας από το κέντρο ενός ασφαλούς «διαδρόμου» εύρους 64 km. Είσοδος από μεγαλύτερο ύψος μπορεί να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη διαφυγή από την ατμόσφαιρα, ενώ είσοδος από χαμηλότερο ύψος μπορεί να οδηγήσει σε επιταχύνσεις που δεν μπορεί να αντέξει το πλήρωμα.

Όταν το σύστημα πλοήγησης επιβεβαιώσει ότι έχουν επιτευχθεί οι ασφαλείς συνθήκες εισόδου, το τμήμα λειτουργιών απορρίπτεται ενώ το κωνικό τμήμα εντολών στρέφεται 180° ώστε να φέρει

μπροστά το αμβλύ άκρο του (τη βάση) όπου βρίσκεται η θερμική ασπίδα, όπως φαίνεται στην κάτω αριστερά εικόνα. Το αμβλύ άκρο δημιουργεί γύρω του ένα στρώμα αέρα, που σπρώχνει την αναπτυσσόμενη θερμότητα λόγω ατμοσφαιρικής τριβής μακριά από την κάψουλα, ενώ ο ιονισμός του αέρα γύρω από το όχημα προκαλεί διακοπή των τηλεπικοινωνιών για αρκετά λεπτά. Αρχικά, κύρια μέριμνα του συστήματος καθοδήγησης είναι η ασφαλής μείωση της υψηλής ταχύτητας του οχήματος μέσω της απώλειας ενέργειας λόγω τριβής. Το μεγαλύτερο μέρος της τροχιάς μέσα στην ατμόσφαιρα είναι παράλληλο με κάποια από τις ακμές της κωνικής επιφάνειας, όπως φαίνεται στην κάτω δεξιά εικόνα, ενώ τυχόν διαταραχές στον προσανατολισμό του οχήματος εξουδετερώνονται από το σύστημα καθοδήγησης. Στη συνέχεια, και ενώ η ταχύτητα έχει μειωθεί, στόχος είναι να κατευθυνθεί το όχημα στην προγραμματισμένη περιοχή προσθαλάσωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση της αεροδυναμικής άνωσης, που με τον κατάλληλο προσανατολισμό του οχήματος μπορεί να έχει κατεύθυνση προς τα επάνω ή προς τα κάτω. Όταν η κάψουλα φτάσει στο κατάλληλο σημείο και η ταχύτητά της έχει μειωθεί αρκετά, ανοίγουν τρία αλεξίπτωτα και ακολουθεί η προσθαλάσωση του



οχήματος στον Ειρηνικό Ωκεανό.

5. Αριθμητικό παράδειγμα

Εδώ υπολογίζουμε κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη μιας αποστολής από τη Γη στη Σελήνη. Δίνονται η βαρυτική σταθερά $G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ Nt} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, η μάζα της Γης $M_e = 5.9726 \times 10^{24} \text{ kg}$ και η ακτίνα της $R_e = 6378.1 \text{ km}$, η μάζα της Σελήνης $M_m = 7.342 \times 10^{22} \text{ kg}$ και η ακτίνα της $R_m = 1738.1 \text{ km}$, και η μέση απόσταση Γης-Σελήνης $d = 384403 \text{ km}$.

(α) Θεωρούμε αρχικά ότι το διαστημόπλοιο έχει τεθεί σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη, σε ύψος $h_0 = 185.5 \text{ km}$ από την επιφάνειά της. Την κατάλληλη χρονική στιγμή επανενεργοποιείται ο πύραυλος του τρίτου σταδίου, που αυξάνει την ταχύτητα του διαστημοπλοίου σε $v_1 = 10952 \text{ m/s}$. Υπολογίστε την ώθηση (μεταβολή στην ταχύτητα του διαστημοπλοίου).

Η ταχύτητα του διαστημοπλοίου στην κυκλική τροχιά είναι

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM_e}{R_e + h_0}} = 7792.2 \text{ m/s}$$

Για την αύξηση της ταχύτητας σε $v_1 = 10952 \text{ m/s}$, ώστε να τεθεί το διαστημόπλοιο σε τροχιά προς τη Σελήνη, θα πρέπει να ασκηθεί ώθηση

$$\Delta v_1 = v_1 - v_0 = 3159.8 \text{ m/s}$$

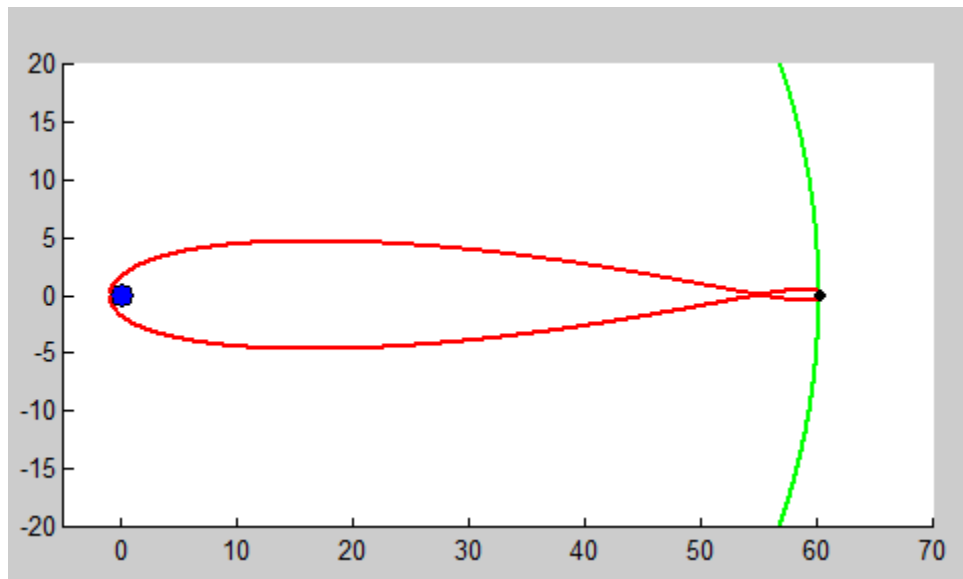
(β) Το διαστημόπλοιο φτάνει στο περικύνθιο (το κοντινότερο σημείο στη Σελήνη), σε ύψος $h_2 = 150 \text{ km}$ από την επιφάνειά της, με ταχύτητα $v_p = 1506.6 \text{ m/s}$ ως προς τη Γη. Βρείτε την ταχύτητα του διαστημοπλοίου ως προς τη Σελήνη. Θεωρείστε ότι η Σελήνη περιστρέφεται γύρω από τη Γη σε σταθερή απόσταση $d = 384403 \text{ km}$, και ότι η ταχύτητα του διαστημοπλοίου στο περικύνθιο έχει αντίθετη φορά από αυτήν της Σελήνης.

Η ταχύτητα της Σελήνης γύρω από τη Γη είναι

$$v_m = \sqrt{\frac{GM_e}{d}} = 1018.2 \text{ m/s}$$

Στο περικύνθιο, η ταχύτητα του διαστημοπλοίου έχει αντίθετη φορά από την ταχύτητα της Σελήνης, οπότε η σχετική ταχύτητα ως προς τη Σελήνη είναι

$$v = v_p - (-v_m) = v_p + v_m = 2524.8 \text{ m/s}$$



Επισημαίνουμε ότι αν στο διαστημόπλοιο δεν ασκηθεί κάποια ώθηση, αυτό επιστρέφει στη Γη, ακολουθώντας την επονομαζόμενη «τροχιά ελεύθερης επιστροφής» (free return trajectory). Η τροχιά αυτή απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στην παραπάνω εικόνα (όπου όλες οι αποστάσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς την ακτίνα της Γης) και έχει το σχήμα παραμορφωμένου οχτώ. Ο μπλε κυκλικός δίσκος αντιστοιχεί στη Γη, ενώ ο μικρότερος μαύρος δίσκος δείχνει τη θέση της Σελήνης όταν το διαστημόπλοιο βρίσκεται στο περικύνθιο, το οποίο συμπίπτει με την κορυφή του μικρού λοβού. Το διαστημόπλοιο διαγράφει αρχικά το κάτω τμήμα του μεγάλου

λοβού, και φτάνει στο περικύνθιο με ταχύτητα που έχει φορά προς τα κάτω. Η προσομοίωση δίνει ότι η διάρκεια του ταξιδιού από τη Γη στη Σελήνη είναι περίπου 69 ώρες. Με πράσινο απεικονίζεται τμήμα της κυκλικής τροχιάς της Σελήνης γύρω από τη Γη. Θεωρούμε περιστροφή αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού, οπότε όταν το διαστημόπλοιο φτάνει στο περικύνθιο, η ταχύτητα της Σελήνης έχει φορά προς τα πάνω, αντίθετη από αυτήν του διαστημοπλοίου. Αν δεν ασκηθεί κάποια ώθηση στο διαστημόπλοιο, αυτό συνεχίζει διαγράφοντας το υπόλοιπο της τροχιάς ελεύθερης επιστροφής, που είναι συμμετρικό του αρχικού τμήματος ως προς τον άξονα Γης-Σελήνης. Η τροχιά αυτή χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή Apollo 13, σε αντίθεση με τον αρχικό σχεδιασμό, ώστε να μπορέσει να επιστρέψει το πλήρωμα στη Γη μετά το ατύχημα.

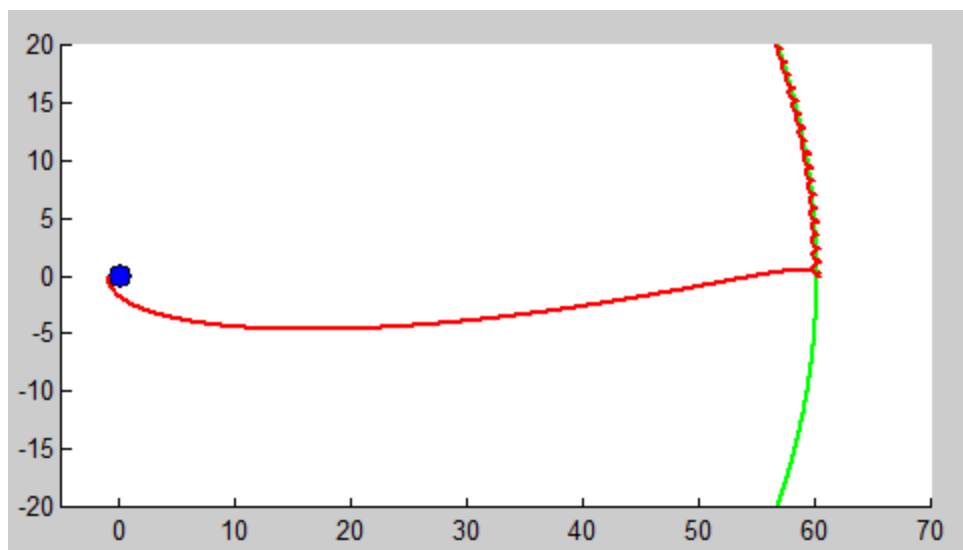
(γ) Πόση ώθηση πρέπει να εφαρμοστεί στο διαστημόπλοιο, ώστε να τεθεί σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Σελήνη σε ύψος $h_2 = 150 \text{ km}$; Αγνοήστε τη βαρυτική επίδραση της Γης.

Η ταχύτητα που έχει ένα σώμα σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Σελήνη στο συγκεκριμένο ύψος είναι

$$v_2 = \sqrt{\frac{GM_m}{R_m + h_2}} = 1610.8 \text{ m/s}$$

Για να μειωθεί η ταχύτητα του διαστημοπλοίου ως προς τη Σελήνη από v σε v_2 , θα πρέπει να του ασκηθεί ώθηση

$$\Delta v_2 = v_2 - v = -914.0 \text{ m/s}$$



Στην παραπάνω εικόνα δείχνουμε την τροχιά του διαστημοπλοίου, αφού του ασκηθεί στο περικύνθιο η ώθηση που υπολογίσαμε. Παρατηρούμε ότι διαστημόπλοιο ακολουθεί τη Σελήνη στην περιστροφή της γύρω από τη Γη.

(δ) Πόση ώθηση πρέπει να εφαρμοστεί στο διαστημόπλοιο ώστε να κατέλθει σε ύψος $h_1 = 15 \text{ km}$, ακολουθώντας μια τροχιά Hohmann;

Η τροχιά Hohmann (μισή ελλειπτική τροχιά) του διαστημοπλοίου απεικονίζεται στο δεξιό σχήμα της υποενότητας 4.5. Η αρχική θέση του διαστημοπλοίου αντιστοιχεί στο αποκύνθιο της τροχιάς (το πιο απομακρυσμένο σημείο από τη Σελήνη). Η ταχύτητα που πρέπει να έχει το διαστημόπλοιο για να εισέλθει σε αυτήν την τροχιά είναι [9]

$$v_a = \sqrt{2GM_m \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1 + r_2} \right)}$$

όπου $r_2 = R_m + h_2$, $r_1 = R_m + h_1$ είναι η αρχική και η τελική απόσταση από το κέντρο της Σελήνης. Τελικά βρίσκουμε

$$v_a = 1580.7 \text{ m/s}$$

Για να μειωθεί η ταχύτητα του διαστημοπλοίου από v_2 σε v_a , θα πρέπει να του ασκηθεί ώθηση

$$\Delta v_2 = v_a - v_2 = -30.1 \text{ m/s}$$

Παρατηρήστε ότι τα μεγέθη που υπολογίσαμε συμφωνούν με τα νούμερα που αναγράφονται στο σχήμα της υποενότητας 4.5, που προέρχεται από την αναφορά [8].

Βιβλιογραφία

- [1] Λουκιανός, *Αληθινή Ιστορία*, μετάφραση Δ. Καλοκύρης, Αίολος, Αθήνα, 2006.
- [2] Ι. Βερν, *Από τη Γη στη Σελήνη*, διασκευή Κ. Ζουμπουλίδη, Αστήρ, Αθήνα.
- [3] Ι. Βερν, *Γύρω από τη Σελήνη*, διασκευή Γ. Τσουκαλά, Αστήρ, Αθήνα, 1972.
- [4] https://el.wikipedia.org/wiki/Από_τη_Γη_στη_Σελήνη
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_program
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_(spacecraft))
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Saturn_V
- [8] D. G. Hoag, The navigation, guidance and control of a manned lunar landing, in *Space Navigation and Control I*, MIT Instrumentation Laboratory, Cambridge, MA, 1965.
- [9] Δ. Στεφανάτος, Μέθοδος Hohmann αλλαγής τροχιάς δορυφόρου και σχεδιασμός διαπλανητικών τροχιών, ροή Διαστημικές Επιστήμες, ΣΣΕ, Άνοιξη 2015.