



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υπολογιστική Νοημοσύνη

**Έλεγχος Γωνίας Προσανατολισμού ενός Δορυφόρου με
Ασαφείς Ελεγκτές**

Ονοματεπώνυμο: Χρήστος Πεντερίδης
ΑΕΜ: 10111
Email: chrelipen@ece.auth.gr

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός δορυφορικού συστήματος ως προς τη γωνιακή του θέση, με σκοπό την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός Ασαφούς Ελεγκτή (Fuzzy Logic Controller - FLC). Το υπό μελέτη σύστημα βασίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης όπου η έξοδος είναι η γωνία του δορυφόρου, και η είσοδος είναι η ροπή που ασκείται για τον έλεγχό του.

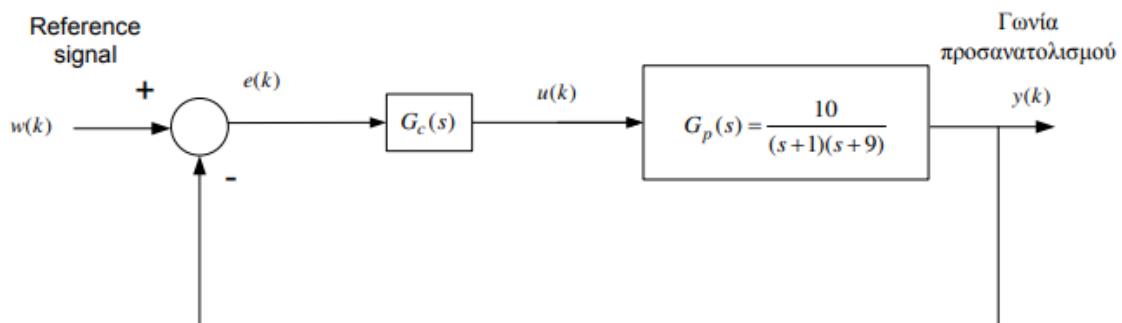
Ο στόχος της άσκησης είναι η σχεδίαση του FLC με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει επιθυμητά χαρακτηριστικά απόκρισης στο κλειστό σύστημα, όπως:

- Μικρή υπέρβαση (π.χ. μικρότερη από 7%)
- Χρόνος ανύψωσης μικρότερος από 0.6 δευτερόλεπτα
- Καλή παρακολούθηση διαφορετικών σημάτων αναφοράς

Για τον σκοπό αυτό, ο ελεγκτής σχεδιάζεται ώστε να ελέγχει τη γωνία του δορυφόρου σε δύο διαφορετικά σενάρια σήματος αναφοράς. Στη συνέχεια, αναλύεται η επίδοση του συστήματος και αξιολογείται η ικανότητα του FLC να ανταποκρίνεται σε απαιτήσεις ευστάθειας, ταχύτητας και ακρίβειας, σε σύγκριση με έναν κλασικό ελεγκτή.

Δομή του Κλειστού Συστήματος

Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα. Ο FLC υπολογίζει τη μεταβολή της ροπής ελέγχου βάσει του σφάλματος και της μεταβολής του σφάλματος. Το παραγόμενο σήμα εισόδου εφαρμόζεται στο μοντέλο του δορυφόρου, το οποίο έχει δυναμική δεύτερης τάξης.



2. Σχεδίαση του Ελεγκτή

α) Περιγραφή Συστήματος

Το υπό μελέτη δυναμικό σύστημα δευτέρου βαθμού περιγράφεται από την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_p(s) = \frac{10}{(s+1)(s+9)}$$

Το σύστημα χαρακτηρίζεται από δύο πραγματικούς και αρνητικούς πόλους στις θέσεις $s = -1$ και $s = -9$. Πρόκειται για σταθερό σύστημα δεύτερης τάξης, με σχετικά καλή φυσική απόκριση και δυνατότητα βελτιστοποίησης μέσω ελέγχου.

β) Γραμμικός Ελεγκτής (Αναφορά)

Ο γραμμικός PI ελεγκτής ορίζεται ως εξής:

$$G_c(s) = k_P + k_I / s = (k_P(s + c)) / s, \text{ όπου } c = k_I / k_P$$

Επιλέγοντας $c = 1$, το μηδενικό του PI τοποθετείται στο -1 ώστε να ακυρώσει τον πόλο του φυτού στο -1 .

Η νέα συνάρτηση μεταφοράς του ανοιχτού βρόχου γίνεται:

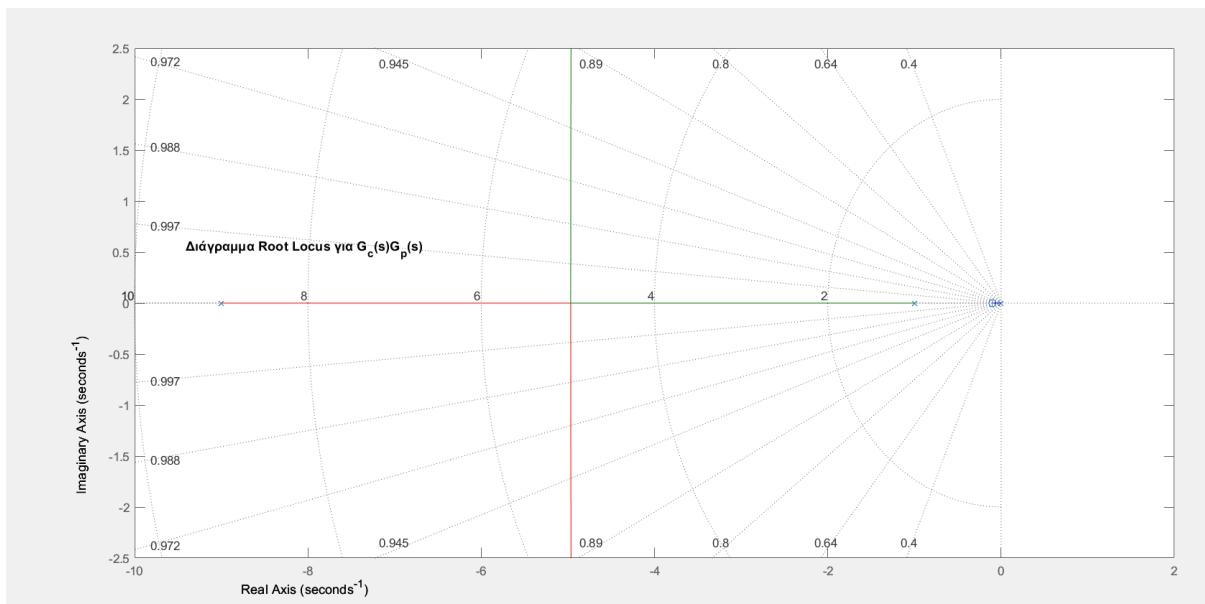
$$A(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) = (10 \cdot k_P) / (s(s + 9))$$

Με χρήση **Root Locus**, ορίζεται ενίσχυση $k_P=5$, η οποία δίνει:

- Υπέρβαση < 10%
- Χρόνος ανόδου < 1.2 sec

β) Root Locus Ανάλυση

Για την ανάλυση της επίδρασης των κερδών ανάδρασης, χρησιμοποιείται το διάγραμμα Root Locus της μεταφοράς $G_p(s)$. Η προσθήκη ενίσχυσης μέσω του FLC (π.χ. με κέρδος k) επιδρά στην τοποθέτηση των πόλων στο μιγαδικό επίπεδο.



Από το διάγραμμα παρατηρείται:

- Οι πόλοι ξεκινούν στις θέσεις -1 και -9.
- Με αύξηση του κέρδους, μετακινούνται αριστερότερα στον πραγματικό άξονα.
- Το σύστημα δεν εισέρχεται σε ταλαντωτική κατάσταση (δεν δημιουργούνται φανταστικά μέρη).
- Συνεπώς, η παρουσία ταλαντώσεων στην απόκριση εξαρτάται κυρίως από τον σχεδιασμό του FLC.

γ) Δομή Ελεγκτή FLC

γ) Ασαφής Ελεγκτής (Fuzzy Logic Controller – FLC)

Ο FLC υλοποιείται με αρχιτεκτονική **τύπου Mamdani**, και δέχεται ως είσοδο:

- Σφάλμα θέσης: $E=r(t)-y(t)$
- Παράγωγος του σφάλματος: dE

και εξάγει:

- Τη μεταβολή του ελέγχου du

Η λογική ανάλυσης και απόφασης βασίζεται σε **63 κανόνες**, συνδυάζοντας 7 λεκτικούς όρους για το σφάλμα και 9 για την παράγωγο.

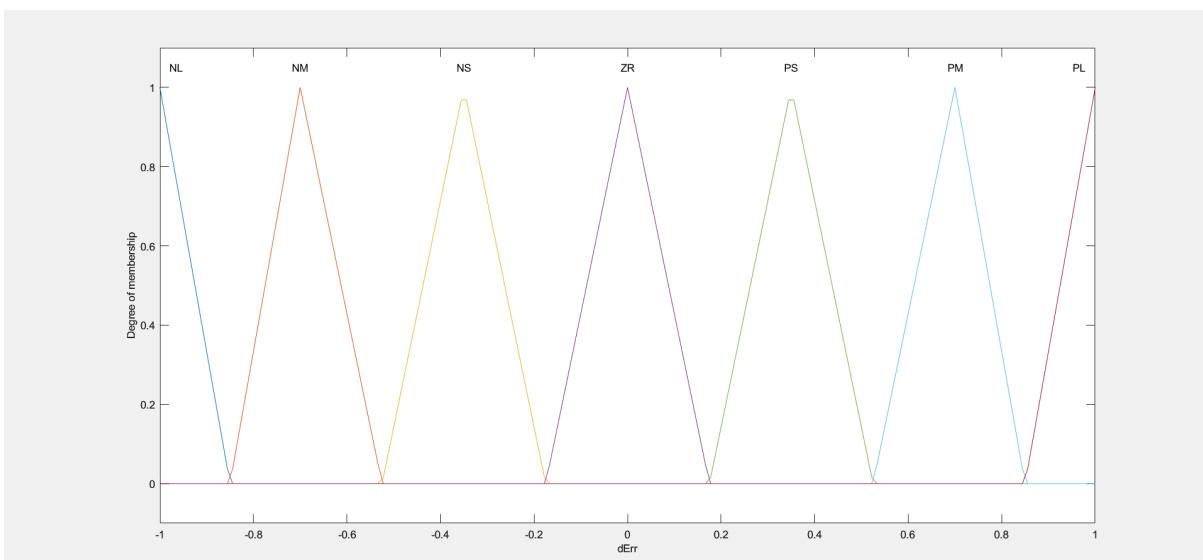
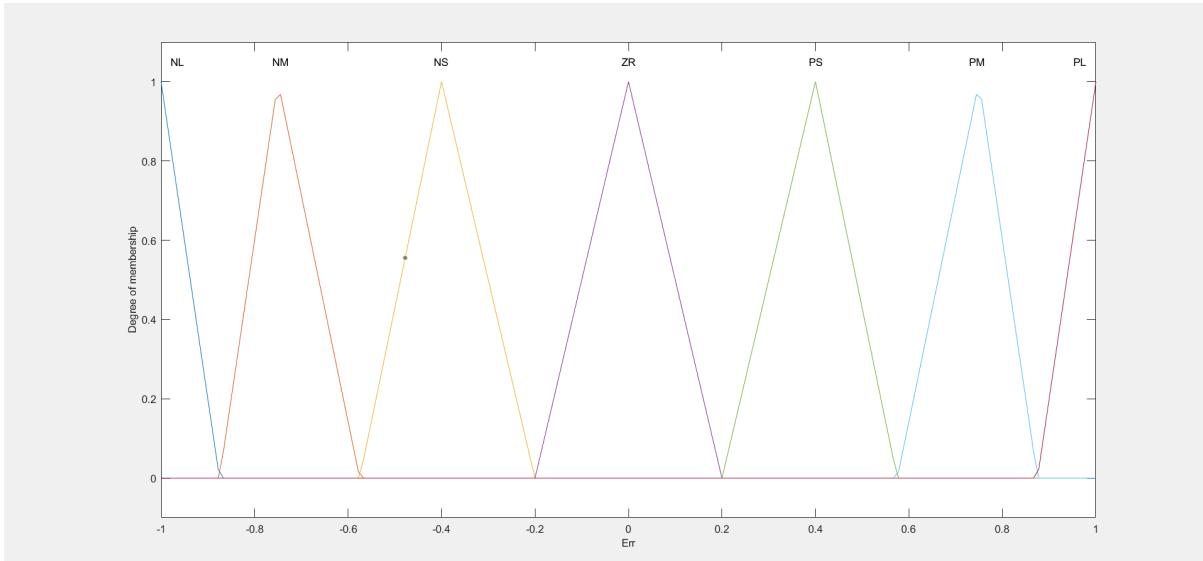
Ρύθμιση	Τιμή
Τύπος Ελεγκτή	Mamdani
Μέθοδος AND	min
Μέθοδος OR	max
Απόφαση (Defuzz)	Center of Area (centroid)
Κανόνες	63

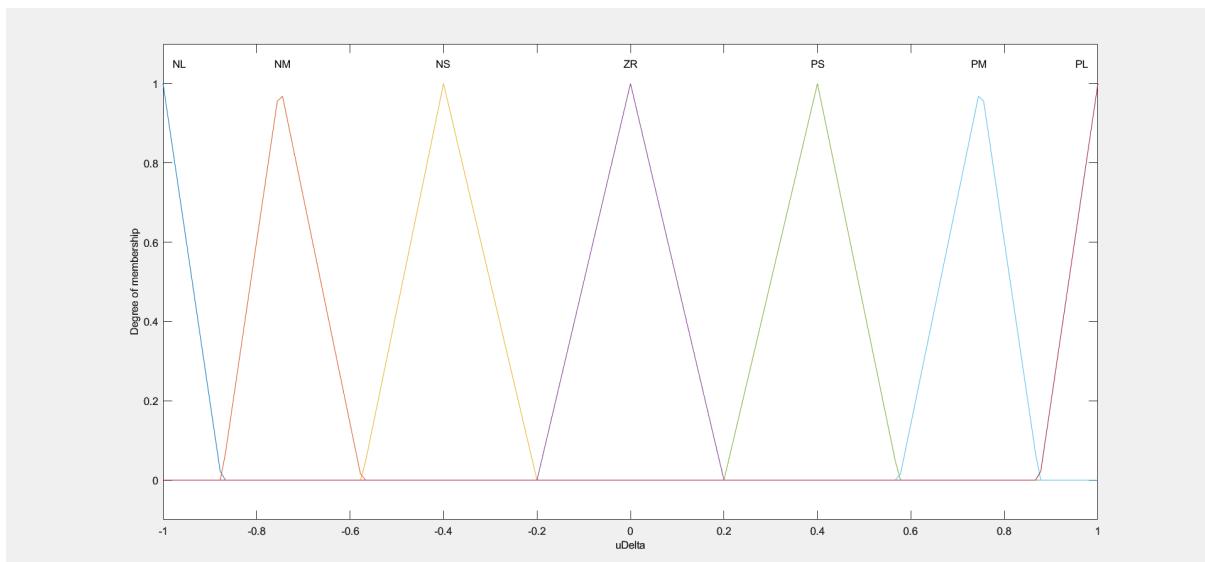
δ) Μέλη Συνόλου (Membership Functions)

Για την απεικόνιση των μεταβλητών χρησιμοποιούνται **τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής (trimf)** κανονικοποιημένες στο διάστημα [-1, 1]. Η υλοποίηση έχει ως εξής:

Μεταβλητή	Ονομασία	Αριθμός MF	Λεκτικά μέλη
Είσοδος 1	E	7	NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL
Είσοδος 2	DE	9	NV, NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL, PV
Έξοδος	DU	7	NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL

Οι συναρτήσεις έχουν σχεδιαστεί συμμετρικά, καλύπτοντας πλήρως την περιοχή [-1, 1] με επικάλυψη ώστε να επιτρέπεται ομαλή μετάβαση μεταξύ τιμών.





ε) Κανόνες Fuzzy Ελέγχου

Ο ελεγκτής περιλαμβάνει **63 λογικούς κανόνες**, ένας για κάθε συνδυασμό των 7×9 τιμών εισόδου. Οι κανόνες βασίζονται στη λογική:

- Μεγάλο θετικό σφάλμα → θετική διόρθωση
- Μικρό σφάλμα και μικρή μεταβολή → μηδενική διόρθωση
- Αρνητικό σφάλμα → αρνητική διόρθωση

στ) Κανονικοποίηση Εισοδων και Κλιμακωτές Τιμές

Για την εφαρμογή του ελεγκτή στο φυσικό σύστημα, γίνεται χρήση των εξής κερδών:

- ke=5 : ενίσχυση σφάλματος
- ki=0.5: ενίσχυση παραγώγου
- k=20: ενίσχυση εξόδου ελεγκτή

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις:

- **Χρόνος ανύψωσης < 0.6 s**
- **Υπέρβαση < 7%**

και να προσφέρουν ικανοποιητική ταχύτητα και ακρίβεια απόκρισης.

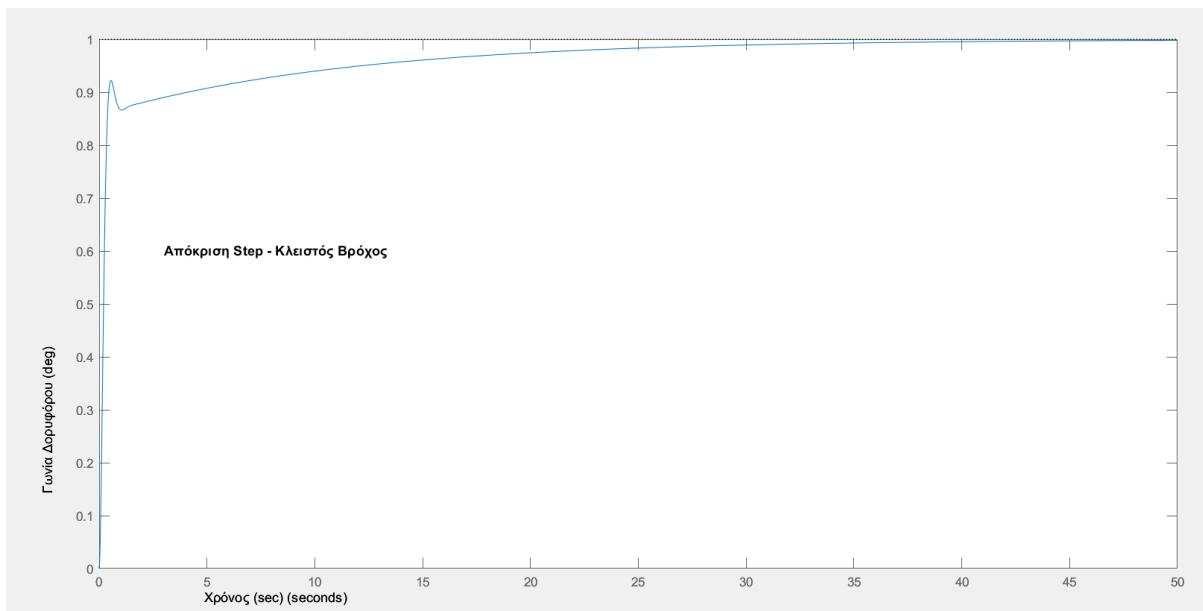
3. Απόκριση του Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος υπό την επίδραση διαφορετικών σημάτων αναφοράς, τόσο για τον Fuzzy Logic Controller (FLC) όσο και για τον γραμμικό PI ελεγκτή. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει μεταβατικών χαρακτηριστικών και της δυνατότητας παρακολούθησης της επιθυμητής τιμής.

Απόκριση με PI Ελεγκτη (γραμμική ανάλυση)

Η απόκριση του συστήματος αξιολογείται με βάση δύο διαφορετικά προφίλ αναφοράς:

- Βηματική είσοδος



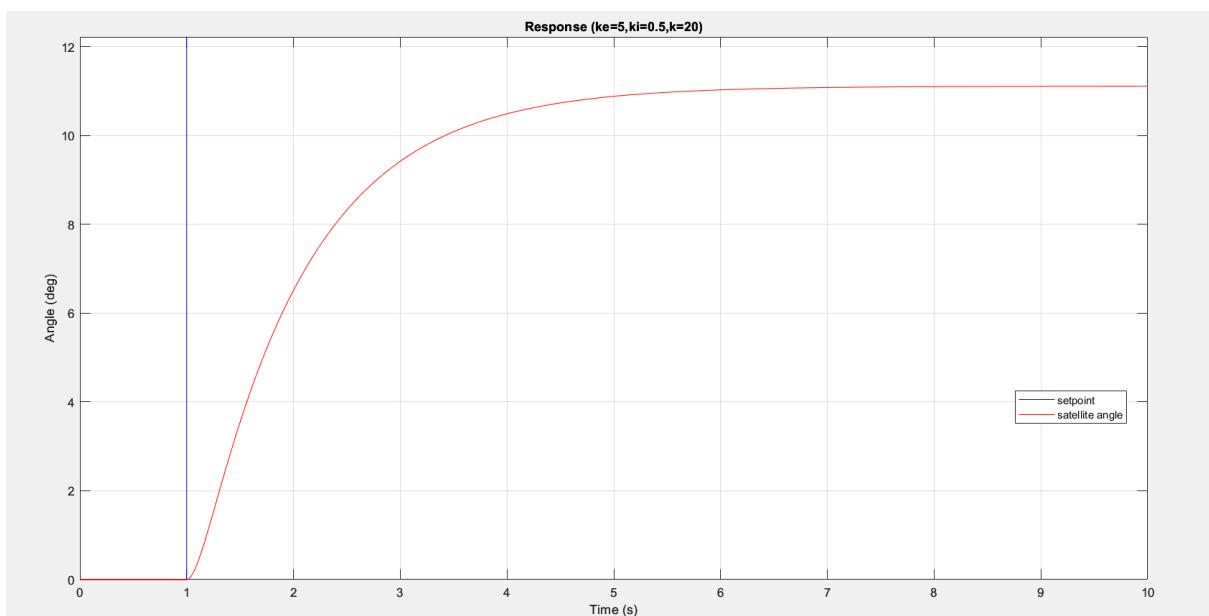
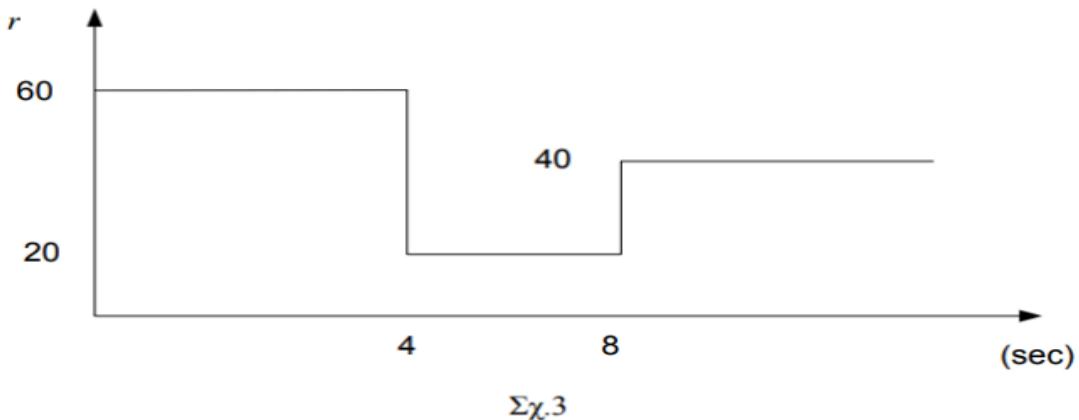
Στατιστικά της απόκρισης:

Η απόκριση του συστήματος παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά:

- **Χρόνος ανόδου:** 0.335 s
- **Υπερκορύφωση:** 0%
- **Χρόνος καθίζησης (2%):** 6.706 s
- **Μέγιστη τιμή:** 0.997

α) Απόκριση FLC σε βηματική είσοδο (Step)

Το σήμα αναφοράς αλλάζει απότομα σε διακριτές χρονικές στιγμές (π.χ. $60 \rightarrow 20 \rightarrow 40$ deg). Αυτή η απόκριση αναφέρεται σε βηματική μεταβολή της αναφοράς (setpoint) από 0° σε 10° .

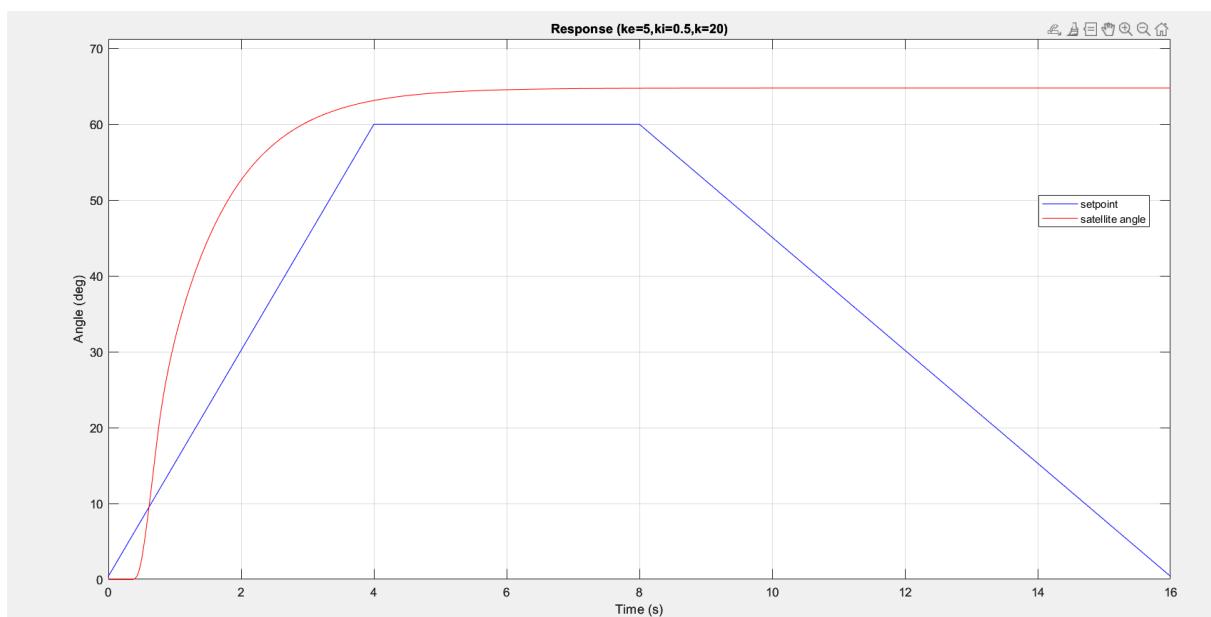
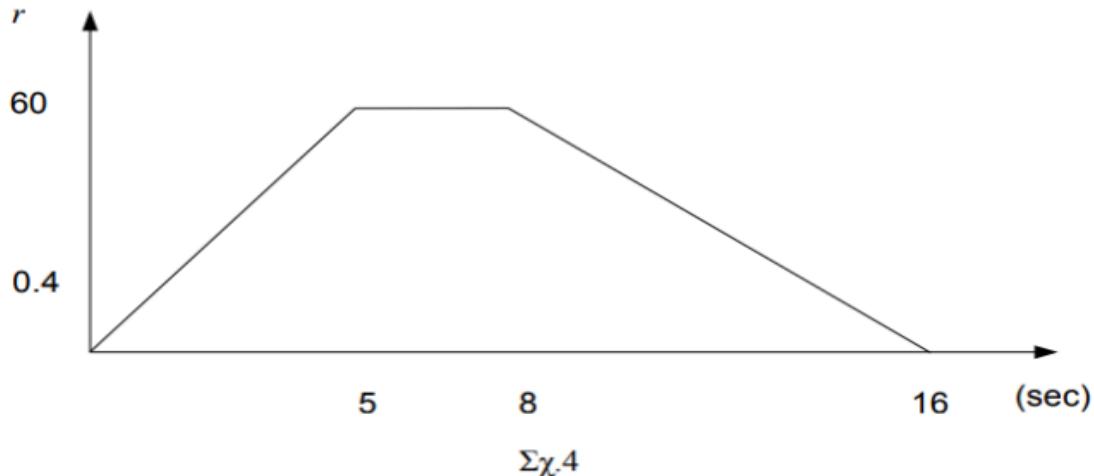


Παρατηρήσεις:

- Η έξοδος ακολουθεί την αναφορά χωρίς υπερύψωση.
- Χρόνος ανύψωσης και σταθεροποίησης είναι ικανοποιητικοί.
- Δεν εμφανίζονται ταλαντώσεις ή αστάθεια.

β) Απόκριση FLC σε ραμπική είσοδο (Ramp)

Το σήμα αναφοράς αυξάνεται και μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, χαρακτηριστικό της ράμπας. Η αναφορά αυξάνεται γραμμικά (ramp) μέχρι τις 60° , παραμένει σταθερή, και στη συνέχεια επιστρέφει στο 0° με αρνητική ράμπα.



Παρατηρήσεις:

- Η έξοδος προσεγγίζει τη ράμπα με μικρή υστέρηση.
- Η μείωση παρουσιάζει πιο αργή απόκριση λόγω χαρακτηριστικών του ελεγκτή.
- Το σύστημα δεν παρουσιάζει σημαντικές ταλαντώσεις ή overshoot.