



7. ביצוע סימולציה של הבקרה העמומה בתוכנת Matlab

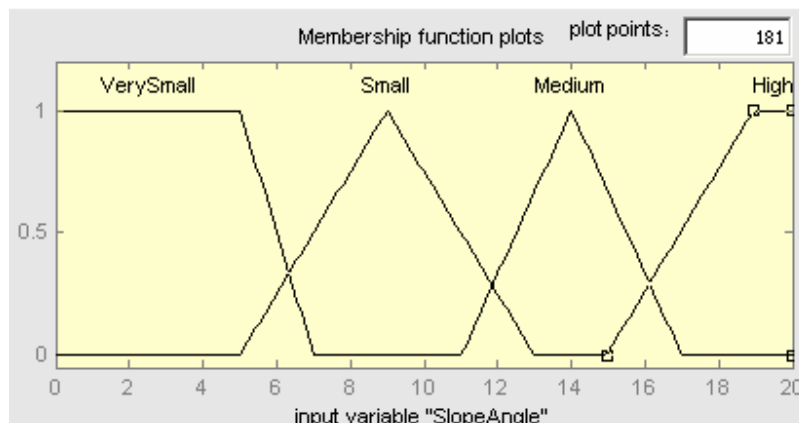
7.1. הצגת פונקציות ההשתייכות

כל מערכת עמומה מורכבת ממשתני כניסה ומשתני יציאה (כפי שהוצג ברקע התיאורטי). במערכת העמומה שנידונה בפרויקט זה ישנם שני משתני כניסה – חיישן גיירו ומדידת הזרם על המנוע ומשתנה יציאה אחד – מהירות המנוע (וביחס הפוך – המומנט). בפרק 7.2 תפורט סדרת החוקים העמומים שתתחשב בשני משתני היציאה ותייצר פלט עבור משתנה ביציאה ביחס למצב הפלטפורמה.

משתני כניסה:

משתני הכניסה של המערכת העמומה הינם הקלטים המגיעים משני החיישנים שהוצגו בפרק 6.2 – חיישן גיירו ומדידת הזרם על המנוע. לכל חיישן כזה יש את קנה המידה שלו והוא מבוטא בפונקציות ההשתייכות. פונקציות ההשתייכות מורכבות מצורות של טרפז (בקצוות) ומשולש (בתחום בין הקצוות), כמובן שניתן לבחור כל צורה אחרת, אך משיקולי פשטות במימוש נבחרו צורות אלה.

פונקציות ההשתייכות עבור זווית השיפוע:



איור 7.1 – פונקציות השתייכות – זווית שיפוע

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישרין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



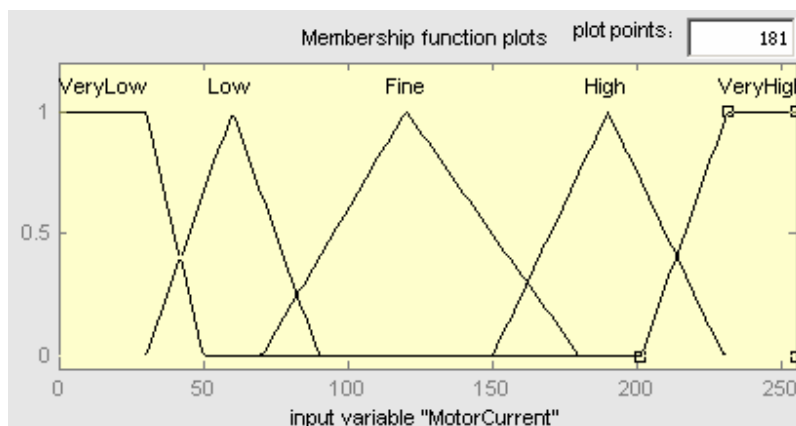
כפי שניתן לראות מאיור 7.1 תחום הזוויות חולק לארבעה חלקים:

שם	תחום
VerySmall	0-5-7
Small	5-9-13
Medium	11-14-17
High	15-19-20

טבלה 7.1 – תחומי פונקציות ההשתייכות עבור זווית השיפוע¹

יחידות ציר ה- x באיור 7.1 הן מעלות. ערכים אלו מתקבלים בעזרת אינטגרציה של המהירות הזוויתית כפי שתואר בפרק 6.2. בפונקציות ההשתייכות אלו הדגש הוא על הערכים הגבוהים של הזוויות, שכן בערכים אלה יכולת ההפרדה חשובה. לעומת זאת, ההפרדה בערכי הזוויות הנמוכים פחות חשובים משום שביצועי הפלטפורמה לא יפגעו משמעותית בתחום של עד 5-7 מעלות שיפוע. כמובן שיש לזכור שבנוסף למשתנה כניסה זה ישנו פרמטר נוסף שעלינו לקחת בחשבון אשר יפורט בהמשך והוא הזרם במנוע. יכול להיווצר מצב שאמנם השיפוע לא יהיה בתחום הגבוה אך הזרם על המנוע יהיה יחסית גדול, לכן המומנט אשר יתקבל ביציאה יהיה גדול (מהירות נמוכה).

פונקציות ההשתייכות עבור מדידת הזרם במנוע:



איור 7.2 – פונקציות ההשתייכות – מדידת הזרם במנוע

¹ הערה: התחומים המסומנים בטבלה זו מתייחסים לכל אחד מהקודקודים הגלויים של פונקציות ההשתייכות המתאימות.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישרין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



כפי שניתן לראות מאיור 7.2 תחום מדידת הזרם חולק לחמישה חלקים:

שם	תחום
VeryLow	0-30-50
Low	30-60-90
Fine	70-120-180
High	150-190-230
VeryHigh	200-230-255

טבלה 7.2 – תחומי פונקציות ההשתייכות עבור זווית השיפוע (ראה הערה עבור טבלה 7.1)

ציר ה- x הינו ציר הערכים המתקבלים מרכיב ה- A/D לתוך הבקר, בתחום של 00-FF (בבסיס הקסה-דצימאלי) או בתחום 0-255 בבסיס עשרוני. פונקציות השתייכות אלה פועלות ביחס לערך הממוצע של הזרם בפעולה רגילה של המנוע, כלומר בתנועה במישור על אספלט. כאשר ניגשים לבדוק מצבים קיצוניים עבור ערך הזרם יש שתי אפשרויות: גבוה או נמוך מערך ממוצע זה. ערך גבוה מסמן לנו שהפלטפורמה מתקשה לעבור את מכשול השטח שעליו היא נמצאת, ולכן יש צורך בהוספת מומנט נוסף (הורדת המהירות) ערך נמוך לעומת זאת מאפשר לנו להגביר מהירות, שכן הפלטפורמה נמצאת במצב שבו אין התנגדות גדולה לתנועה.

משתנה יציאה:

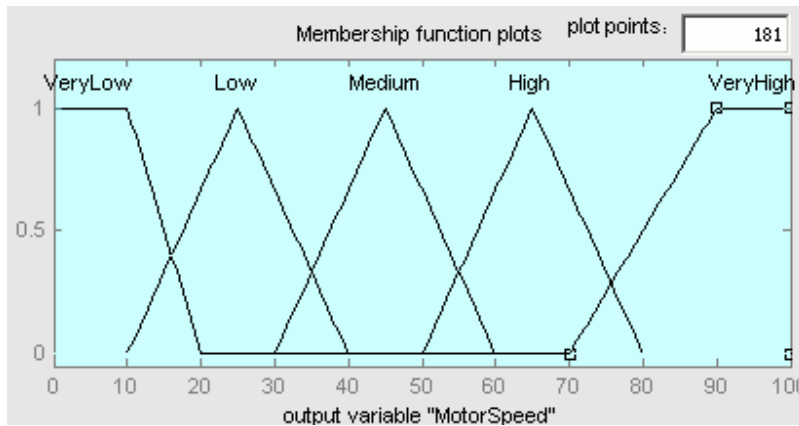
משתנה היציאה במערכת עמומה זו מיוצג באחוזי מהירות סיבוב המנוע. כאשר מהירות הסיבוב נמוכה, נקבל מומנט גבוה ולהיפך. כאשר מייצגים את משתנה היציאה באופן זה אפשר לבנות בקלות את סט החוקים שיוצג בפרק 7.2. סיבה נוספת לייצוג זה היא שבכך אנו לא מגבילים את המשתמש במהירויות המנוע שבהן הוא מעוניין לעבוד, כלומר, במידה והוא רוצה להחליף את המנוע למנוע גדול יותר לדוגמא בכדי לקבל מהירויות גדולות יותר או מומנטים גדולים יותר אין צורך בשום שינוי במודל העמום ובסט החוקים.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



פונקציות ההשתייכות עבור אחוזי המהירות:



איור 7.3 - פונקציות ההשתייכות – אחוזי המהירות המתקבלים ביציאה מהשנאי המכני

כפי שניתן לראות מאיור 7.2 תחום אחוזי המהירות חולק לחמישה חלקים:

שם	תחום
VeryLow	0-10-20
Low	10-25-40
Medium	30-45-60
High	50-65-80
VeryHigh	70-90-100

טבלה 7.3 – תחומי פונקציות ההשתייכות עבור זווית השיפוע (ראה הערה עבור טבלה 7.1)

כידוע הבקר שלנו לא שולט על מהירות סיבוב המנוע, אלא על יחס התמסורת בשנאי המכני. מכאן נובע כי חייב להיות חישוב ביניים נוסף בין הבקר לבין מנוע הצעד השולט על יחס התמסורת. חישוב זה הוא פשוט הכפלה של האחוזים שהתקבלו באורך רדיוס גלגל מספר 2 וכך לקבוע את מיקומו ביחס לגלגל מספר 1.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



7.2. הצגת סט החוקים

כל מערכת עמומה מורכבת בנוסף לפונקציות ההשתייכות גם מסט חוקים עמומים אשר יקבעו את תגובת המערכת לכניסות השונות. סט זה נבנה על פי הבנת המערכת והפעלת כללי אצבע להפעלה המערכת, ניתן לראות זאת באופן נוסף, אם יכל אדם לשלוט על המערכת בזמן אמת בכל צעד שלה – איך הוא היה מבצע זאת.

חשוב מאוד שסט החוקים עבור המערכת העמומה יסקף את המציאות בכל מצביה האפשריים (למרות שאפשר להריץ מערכת עמומה ללא סט חוקים מלא) בכדי שלא ייווצר מצב שבו המערכת לא יודעת כיצד להגיב עבור קלט נתון.

סט החוקים עבור הבעיה הנתונה:

מס'	אם	ו-	אז
1	זווית השיפוע נמוכה מאוד	זרם המנוע נמוך מאוד	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה מאוד
2	זווית השיפוע נמוכה מאוד	זרם המנוע נמוך	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
3	זווית השיפוע נמוכה מאוד	זרם המנוע בסדר	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
4	זווית השיפוע נמוכה מאוד	זרם המנוע גבוה	נפעיל את המנוע במהירות ממוצעת
5	זווית השיפוע נמוכה מאוד	זרם המנוע גבוה מאוד	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה
6	זווית השיפוע נמוכה	זרם המנוע נמוך מאוד	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה מאוד
7	זווית השיפוע נמוכה	זרם המנוע נמוך	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
8	זווית השיפוע נמוכה	זרם המנוע בסדר	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
9	זווית השיפוע נמוכה	זרם המנוע גבוה	נפעיל את המנוע במהירות בינונית
10	זווית השיפוע נמוכה	זרם המנוע גבוה מאוד	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה
11	זווית השיפוע בינונית	זרם המנוע נמוך מאוד	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
12	זווית השיפוע בינונית	זרם המנוע נמוך	נפעיל את המנוע במהירות בינונית
13	זווית השיפוע בינונית	זרם המנוע בסדר	נפעיל את המנוע במהירות בינונית
14	זווית השיפוע בינונית	זרם המנוע גבוה	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה
15	זווית השיפוע בינונית	זרם המנוע גבוה מאוד	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה
16	זווית השיפוע גבוהה	זרם המנוע נמוך מאוד	נפעיל את המנוע במהירות גבוהה
17	זווית השיפוע גבוהה	זרם המנוע נמוך	נפעיל את המנוע במהירות בינונית
18	זווית השיפוע גבוהה	זרם המנוע בסדר	נפעיל את המנוע במהירות בינונית
19	זווית השיפוע גבוהה	זרם המנוע גבוה	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה
20	זווית השיפוע גבוהה	זרם המנוע גבוה מאוד	נפעיל את המנוע במהירות נמוכה מאוד

טבלה 7.4 – סט החוקים עבור הבעיה המוצגת.

הצבעים כחול, ירוק וכתום מתייחסים לאיורים 7.1, 7.2 ו- 7.3 בהתאמה

עשרים חוקים אלה קובעים למעשה את כל המצבים האפשריים ולכל מצב כזה יש מענה חד משמעי שעבור ערכים נתונים יפיק תוצאה אחת ויחידה.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



7.3. הרצת המודל בתוכנת Matlab

בניית המערכת העמומה:

בתוכנת ה-Matlab ישנה מערך כלי עזר² לתכנון מערכת עמומה משלב בניית פונקציות החברות ועד הרצת סימולציה ביחס לערכי קלט מסויימים. באיורים 7.1, 7.2, ו- 7.3 אפשר לראות את פונקציות ההשתייכות כפי שניבנו בכלי עזר זה. כאשר ניגשים לבנות פונקציית השתייכות צריך לקבוע תחילה את תחום ערכי הפונקציה ואת כמות פונקציות ההשתייכות. לאחר מכן יש למקם כל פונקציה במקום המתאים ולקרא להן בשמות משמעותיים, ראה איורים 7.1 – 7.3.

השלב הבא הוא הכנסת סט החוקים העמומים לתוך המערכת העמומה:

```
1. If (SlopeAngle is VerySmall) and (MotorCurrent is VeryLow) then (MotorSpeed is VeryHigh) (1)
2. If (SlopeAngle is VerySmall) and (MotorCurrent is Low) then (MotorSpeed is High) (1)
3. If (SlopeAngle is VerySmall) and (MotorCurrent is Fine) then (MotorSpeed is High) (1)
4. If (SlopeAngle is VerySmall) and (MotorCurrent is High) then (MotorSpeed is Medium) (1)
5. If (SlopeAngle is VerySmall) and (MotorCurrent is VeryHigh) then (MotorSpeed is Low) (1)
6. If (SlopeAngle is Small) and (MotorCurrent is VeryLow) then (MotorSpeed is VeryHigh) (1)
7. If (SlopeAngle is Small) and (MotorCurrent is Low) then (MotorSpeed is High) (1)
8. If (SlopeAngle is Small) and (MotorCurrent is Fine) then (MotorSpeed is High) (1)
9. If (SlopeAngle is Small) and (MotorCurrent is High) then (MotorSpeed is Medium) (1)
10. If (SlopeAngle is Small) and (MotorCurrent is VeryHigh) then (MotorSpeed is Low) (1)
11. If (SlopeAngle is Medium) and (MotorCurrent is VeryLow) then (MotorSpeed is High) (1)
12. If (SlopeAngle is Medium) and (MotorCurrent is Low) then (MotorSpeed is Medium) (1)
13. If (SlopeAngle is Medium) and (MotorCurrent is Fine) then (MotorSpeed is Medium) (1)
14. If (SlopeAngle is Medium) and (MotorCurrent is High) then (MotorSpeed is Low) (1)
15. If (SlopeAngle is Medium) and (MotorCurrent is VeryHigh) then (MotorSpeed is Low) (1)
16. If (SlopeAngle is High) and (MotorCurrent is VeryLow) then (MotorSpeed is High) (1)
17. If (SlopeAngle is High) and (MotorCurrent is Low) then (MotorSpeed is Medium) (1)
18. If (SlopeAngle is High) and (MotorCurrent is Fine) then (MotorSpeed is Medium) (1)
19. If (SlopeAngle is High) and (MotorCurrent is High) then (MotorSpeed is Low) (1)
20. If (SlopeAngle is High) and (MotorCurrent is VeryHigh) then (MotorSpeed is VeryLow) (1)
```

איור 7.4 – סט החוקים כפי שהוקלד לכלי העזר בתוכנת Matlab

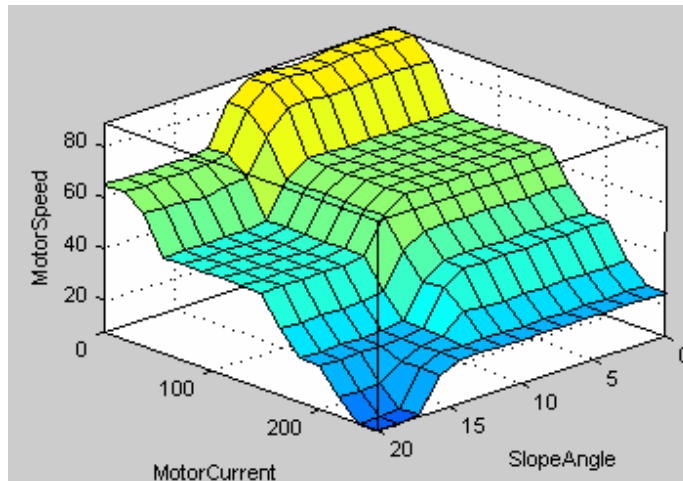
בשלב זה קיימים במערכת כל העזר כל הפרטים הדרושים להרצת הסימולציה, חשוב לציין ששיטת החישוב היא שיטת Mamdani וביצוע ההמרה מערך עמום לערך קריספי³ מבוצע ע"י חישוב מרכז השטח של חיתוך הערך המינימלי מבין משתני הכניסה. הרצת הסימולציה תתבצע בעזרת הפקודה `ruleview(fis)`.

² Fuzzy toolbox
³ Defuzzification



הרצת המערכת העמומה:

לפני ביצוע הסימולציה נשתמש באפשרות נוספת של כלי העזר שבה ניתן לקבל תצוגה של סט החוקים באופן גרפי. בגרף זה ניתן לראות את חוסר הלינאריות של המערכת באופן ברור וחד משמעי. תצוגה זו משתמשת בעיקר לבדיקה שאכן כל תחום האפשרויות נבדק והוגדר כראוי.



איור 7.5 – משטח החוקים

סימולציית המערכת העמומה תתבצע עבור כמה ערכים אופייניים של המערכת וניתוח הפלט המתקבל:

- שיפוע גדול עם זרם בינוני.
- שיפוע נמוך עם זרם גבוה.
- שיפוע אפס עם זרם נמוך.

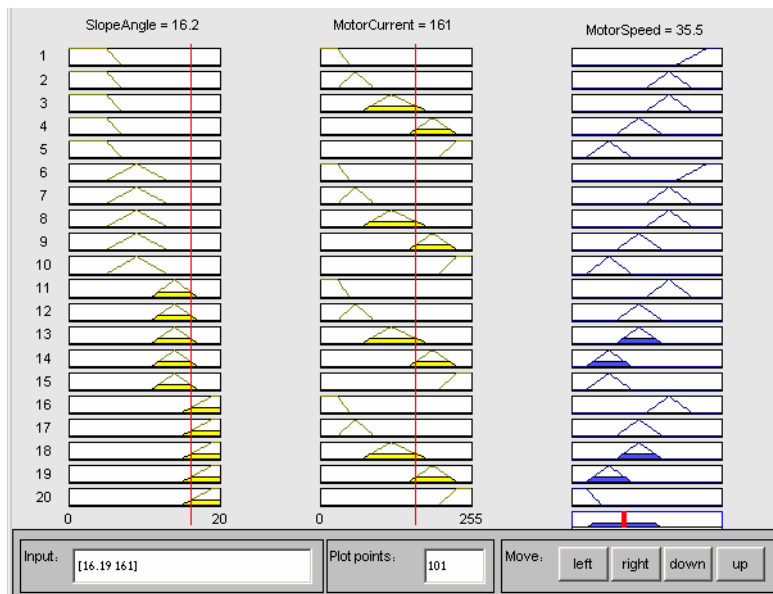
בכל דיאגרמה שנקבל יופיעו שלוש עמודות, אחת עבור כל משתנה (שני משתני כניסה ומשתנה יציאה אחד). בכותרת של כל אחת מהעמודות של משתני הכניסה (שני העמודות השמאליות) ניתן לראות את הערך המדויק שנקלט, ומעל העמודה של משתנה היציאה (העמודה הימנית) מתקבל הפלט של המערכת. שלושת העמודות מחולקות לעשרים שורות – אחת עבור כל חוק שהוגדר בעוד שלעמודת משתנה היציאה ישנה שורה נוספת שמייצגת את איחוד השורות בעמודה זו. על מנת לקבל את הפתרון הקריספי הסופי, המערכת תחשב את מרכז השטח של איחוד זה (מופיע בתור קו אדום כהה) וערך זה יהיה הפלט של המערכת.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישרין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



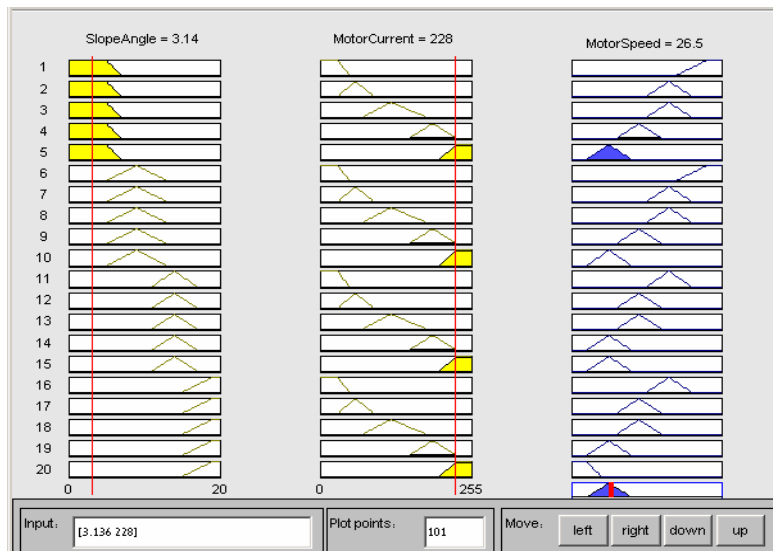
שיפוע גדול עם זרם בינוני:



איור 7.6 – דיאגרמת הסימולציה עבור שיפוע גדול עם זרם בינוני

עבור זווית של 16.2° וזרם מנוע של 161 נקבל מהירות מנוע של 35.5%. הדבר הגיוני, משום שבמצב כזה אנו מצפים לקבל מומנט גדול בכדי להתגבר על המכשול שמתבטא בשיפוע גדול והתנגדות קרקע בינונית, ועבור אחוז מהירות נמוך נקבל מומנט גבוה. אפשר לראות בשורה ה- 21 של עמודת הפלט את איחוד השטחים של פונקציות ההשתייכות ואת מרכז השטח – באדום.

שיפוע נמוך עם זרם גבוה:



איור 7.7 – דיאגרמת הסימולציה עבור שיפוע נמוך עם זרם גבוה

עבור זווית של 3.1° וזרם מנוע של 228 נקבל מהירות מנוע של 26.5%. הדבר הגיוני, משום שבמצב כזה אנו מצפים לקבל מומנט גדול בכדי להתגבר על המכשול שמתבטא

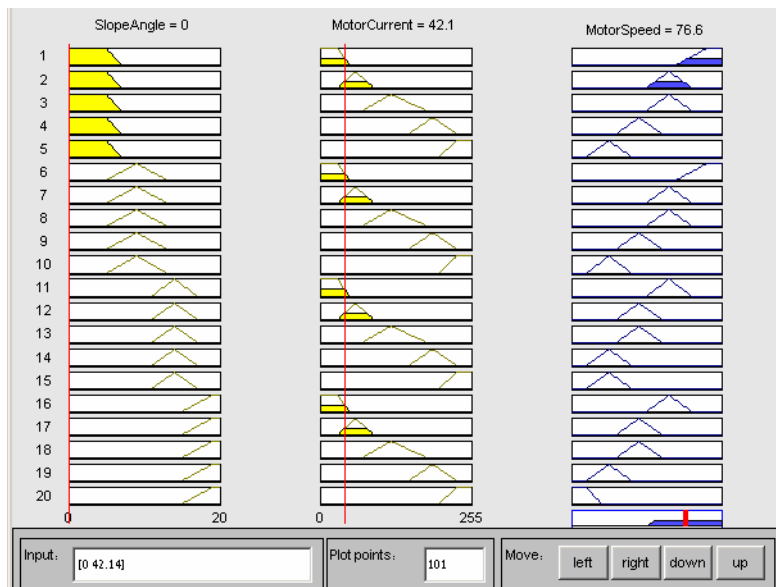
בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף מוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



בהתנגדות קרקע גדולה, ועבור אחוז מהירות נמוך נקבל מומנט גבוה. אפשר לראות בשורה ה- 21 של עמודת הפלט את איחוד השטחים של פונקציות ההשתייכות ואת מרכז השטח – באדום.

שיפוע אפס עם זרם נמוך:



איור 7.8 – דיאגרמת הסימולציה עבור שיפוע אפס עם זרם נמוך

עבור זווית של 0° וזרם מנוע של 41.1 נקבל מהירות מנוע של 76.6%. הדבר הגיוני, משום שבמצב כזה אנו מצפים לקבל מומנט יחסית נמוך מכיוון שהמערכת לא מזהה מכשולים שיש להתגבר עליהם, התוצאה כמובן תהיה מהירות גבוהה. אפשר לראות בשורה ה- 21 של עמודת הפלט את איחוד השטחים של פונקציות ההשתייכות ואת מרכז השטח – באדום.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר