

11 / 6 / 2025

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

ΑΣΚΗΣΗ 1

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
ΣΕ ΕΞΥΠΝΟ ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΟ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

2024-2025

Ηλίας Ξανθόπουλος 58545

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων.....	2
1. Εισαγωγή	3
2. Air-conditioning Fuzzy System.....	4
2.α. Περιγραφή παραμέτρων συστήματος.....	4
2.β. Ασαφή σύνολα και Συναρτήσεις Συμμετοχής	4
2.γ Ασαφείς Κανόνες.....	6
3. Αξιολόγηση του μοντέλου	8
3.α. Αξιολόγηση με Fuzzy Toolbox GUI	8
3.β. Αξιολόγηση με το fuzzy_evaluation.m	9
4. Κώδικες.....	12
4.α. fuzzy_evaluation.m	12
4.β. findMaxMF.m	16
4.γ. airCondition.fis.....	16

Το παρόν report όπως και οι κώδικες της υλοποίησης είναι ανεβασμένα στο GitHub στο repository: <https://github.com/iliaxant/Fuzzy-Logic-air-conditioning>

1. Εισαγωγή

Η άσκηση που επιλύεται με την χρήση Ασαφούς Λογικής (ΑΛ) είναι η “*Άσκηση 1 – Σύστημα Ελέγχου Θερμοκρασίας σε Έξυπνο Κλιματιστικό*”. Η υλοποίηση αποτελείται από το αρχείο *airCondition.fis* που περιέχει την δομή του Ασαφούς Συστήματος και 2 *.m* αρχεία MATLAB, εκ των οποίων το *fuzzy_evaluation.m* αποτελεί το κύριο (evaluation) script, ενώ στο *findMaxMF.m* ορίζεται μία βοηθητική συνάρτηση. Στα επόμενα κεφάλαια πρώτα αναλύεται η διαδικασία σχεδίασης της Fuzzy Λογικής και μετά περιγράφεται η αξιολόγηση μέσω των προαναφερθέντων αρχείων MATLAB.

2. Air-conditioning Fuzzy System

2.α. Περιγραφή παραμέτρων συστήματος

Το προς-σχεδίαση σύστημα κλιματισμού λαμβάνει υπόψη δύο μεγέθη για να ρυθμίσει την λειτουργία του·

1) Την απόσταση σε $^{\circ}\text{C}$ της τρέχουσας θερμοκρασίας από την επιθυμητή. Η θερμοκρασία μπορεί να είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση της ιδανικής και ταυτόχρονα μπορεί να χωριστεί σε επίπεδα (π.χ. λίγο μεγαλύτερη, αρκετά μεγαλύτερη, πολύ μεγαλύτερη, κ.ο.κ.) για να εκφράσει διαφορετικές σχέσεις.

2) Τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Η θερμοκρασία μπορεί να αυξάνεται, να μειώνεται ή να παραμένει σταθερή, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί χαρακτηρισμοί των ταχυτήτων μεταβολής, όπως είναι π.χ. “αργή αύξηση”, “ταχεία αύξηση” κ.τ.λ.

Ανάλογα με τις τιμές των παραπάνω μεγεθών, το σύστημα προσπαθεί να πετύχει την ιδανική θερμοκρασία ρυθμίζοντας την ένταση της εξόδου του, δηλαδή επιλέγει ανάμεσα σε heating mode (τιμές από 0 έως και 1), σε cooling mode (τιμές από -1 έως και 0, συμπεριλαμβάνοντας και το -1) ή σε stand-by mode (μηδενική τιμή). Ανάλογα με το μέγεθος της απόκλιση της εξόδου από την μηδενική τιμή ορίζονται διαφορετικές εντάσεις θέρμανσης και ψύξης.

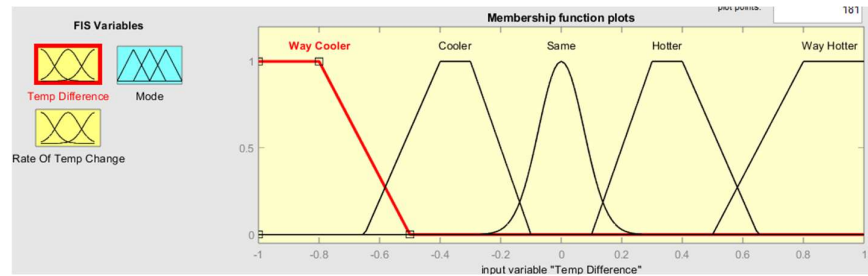
2.β. Ασαφή σύνολα και Συναρτήσεις Συμμετοχής

Λαμβάνοντας υπόψη το προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέγεται για καθεμία από τις εισόδους και έξοδο, 5 συναρτήσεις συμμετοχής (Membership Functions-MFs)· 1 για κάθε επίπεδο / ασαφές σύνολο. Πιο συγκεκριμένα, τα ασαφή σύνολα που έχουν οριστεί είναι:

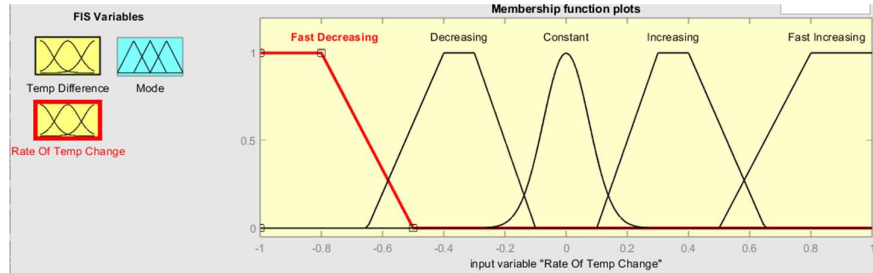
Πίνακας 1: Οι ονομασίες των Ασαφών Συνόλων όλων των παραμέτρων

Είσοδοι	Temp Difference	Way Cooler	Cooler	Same	Hotter	Way Hotter
	Rate of Temp Change	Fast Decreasing	Decreasing	Constant	Increasing	Fast Increasing
Έξοδος	Mode	Max Cooling	Normal Cooling	Stand-by	Normal Heating	Max Heating

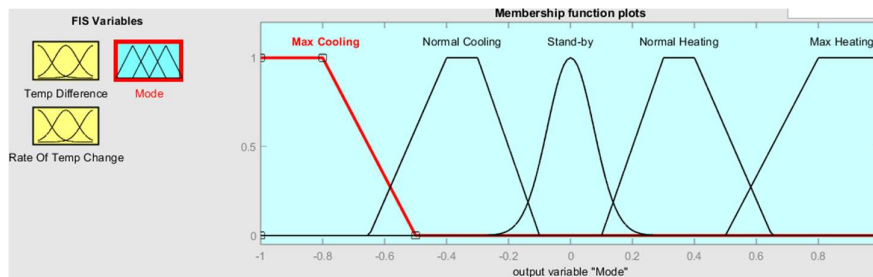
Στις παρακάτω εικόνες 1.α, 1.β, 1.γ και 2, φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των Συναρτήσεων Συμμετοχής όλων των ασαφών συνόλων, όπως και οι τύποι και οι αντίστοιχες παράμετροί τους.



Εικόνα 1.α: Οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμμετοχής των Ασαφών Συνόλων της εισόδου "Temp Difference"



Εικόνα 1.β: Οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμμετοχής των Ασαφών Συνόλων της εισόδου "Rate of Temp Change"



Εικόνα 1.γ: Οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων συμμετοχής των Ασαφών Συνόλων της εξόδου "mode"

```

----- Fuzzy System: airCondition -----

Input 1: Temp Difference      (Range: [-1.00 1.00])
MF 1: Way Cooler            Type: trapmf      Params: [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF 2: Cooler                Type: trapmf      Params: [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF 3: Same                  Type: gaussmf     Params: [0.075 0]
MF 4: Hotter                Type: trapmf      Params: [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF 5: Way Hotter           Type: trapmf      Params: [0.5 0.8 1 1]

Input 2: Rate Of Temp Change (Range: [-1.00 1.00])
MF 1: Fast Decreasing       Type: trapmf      Params: [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF 2: Decreasing            Type: trapmf      Params: [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF 3: Constant              Type: gaussmf     Params: [0.075 0]
MF 4: Increasing            Type: trapmf      Params: [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF 5: Fast Increasing        Type: trapmf      Params: [0.5 0.8 1 1]

Output: Mode                 (Range: [-1.00 1.00])
MF 1: Max Cooling           Type: trapmf      Params: [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF 2: Normal Cooling        Type: trapmf      Params: [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF 3: Stand-by              Type: gaussmf     Params: [0.075 0]
MF 4: Normal Heating        Type: trapmf      Params: [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF 5: Max Heating           Type: trapmf      Params: [0.5 0.8 1 1]

-----

Press a button to initiate testing...
    
```

Εικόνα 2: Χαρακτηριστικά του Fuzzy Συστήματος airCondition (Εξόδος του fuzzy_evaluation.m)

Όπως φαίνεται στην *εικόνα 2*, όλες οι είσοδοι/έξοδοι, έχουν ακριβώς τις ίδιες Membership συναρτήσεις. Οι τύποι είναι οι ίδιοι επειδή και τα τρία μεγέθη έχουν/θέλουμε να έχουν την ίδια συμπεριφορά (αναλύεται παρακάτω), ενώ οι παράμετροι είναι πανομοιότυποι καθαρά για λόγους διευκόλυνσης. Οι τιμές των παραμέτρων εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να προσδώσουμε στο έξυπνο Κλιματιστικό (π.χ. μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση από την ιδανική θερμοκρασία για το stand-by mode), οπότε θέτονται όλες ίσες καθώς δεν έχουν δοθεί περεταίρω λεπτομέρειες.

Για μεγαλύτερη ευκολία έχουν επίσης οριστεί ίδια και τα εύρη των εισόδων/εξόδων και μάλιστα ίσα με το $[-1,1]$. Για την έξοδο το διάστημα αυτό είναι αναμενόμενο, αλλά για τις εισόδους υπονοείται ότι πριν την εισαγωγή τους στο Fuzzy σύστημα έχει προηγηθεί μια κανονικοποίηση στο $[-1,1]$. Για παράδειγμα, εάν η απόκλιση από την επιθυμητή θερμοκρασία είναι $+5^{\circ}\text{C}$ και η μέγιστη δυνατή απόκλιση θεωρείται ίση με 20°C , τότε στο σύστημα εισάγεται η τιμή $\frac{5}{20} = 0.25$ αντί των $+5^{\circ}\text{C}$.

Ως προς την επιλογή των MFs, φαίνεται στις *εικόνες 1* ότι για όλα τα ασαφή σύνολα πλην των “κεντρικών” έχουν χρησιμοποιηθεί τραπεζοειδείς συναρτήσεις. Αυτό επιλέγεται διότι είναι καλό να υπάρχουν κάποιες περιοχές τιμών στις οποίες είναι πλήρως σαφές π.χ. σε ποιο στάδιο λειτουργίας αντιστοιχούν οι είσοδοι. Από την άλλη, για τα “κεντρικά” ασαφή σύνολα αξιοποιούνται σχετικά απότομες Gaussian συναρτήσεις. Τα “κεντρικά” ασαφή σύνολα αντιστοιχούν στις ιδανικές συνθήκες / στον στόχο κατά την λειτουργία του συστήματος, οπότε αυτό που επιτυγχάνουν οι απότομες κανονικές συναρτήσεις είναι να μεγιστοποιούνται απότομα οι αντίστοιχες MF και έτσι το Air-Conditioner να αντιδρά ταχύτατα με στην άφιξη των επιθυμητών καταστάσεων.

2.γ Ασαφείς Κανόνες

Με τους ασαφείς κανόνες καθορίζεται πλήρως η λογική του έξυπνου κλιματιστικού. Το κλιματιστικό σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να προσπαθεί συνεχώς να πετύχει την επιθυμητή θερμοκρασία επιλέγοντας ανάμεσα στην ψύξη και θέρμανση ανάλογα με το αν η διαφορά θερμοκρασίας είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα και ρυθμίζοντας την ένταση της λειτουργίας ανάλογα με τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας. Παρακάτω, παρατίθενται πλήρως και οι 13 ασαφείς κανόνες που διέπουν την λογική του συστήματος.

- 1) If (Temp Difference is **Way Cooler**) and (Rate of Temp Change is **NOT Fast Increasing**) then (Mode is **Max Heating**).
- 2) If (Temp Difference is **Way Cooler**) and (Rate of Temp Change is **Fast Increasing**) then (Mode is **Normal Heating**).
- 3) If (Temp Difference is **Cooler**) and (Rate of Temp Change is **NOT Fast Decreasing**) then (Mode is **Normal Heating**).
- 4) If (Temp Difference is **Cooler**) and (Rate of Temp Change is **Fast Decreasing**) then (Mode is **Max Heating**).

- 5) If (Temp Difference is **Same**) and (Rate of Temp Change is **Fast Decreasing**) then (Mode is **Normal Heating**).
- 6) If (Temp Difference is **Same**) and (Rate of Temp Change is **Decreasing**) then (Mode is **Stand-by**).
- 7) If (Temp Difference is **Same**) and (Rate of Temp Change is **Constant**) then (Mode is **Stand-by**).
- 8) If (Temp Difference is **Same**) and (Rate of Temp Change is **Increasing**) then (Mode is **Stand-by**).
- 9) If (Temp Difference is **Same**) and (Rate of Temp Change is **Fast Increasing**) then (Mode is **Normal Cooling**).
- 10) If (Temp Difference is **Hotter**) and (Rate of Temp Change is **Fast Increasing**) then (Mode is **Max Cooling**).
- 11) If (Temp Difference is **Hotter**) and (Rate of Temp Change is *NOT Fast Increasing*) then (Mode is **Normal Cooling**).
- 12) If (Temp Difference is **Way Hotter**) and (Rate of Temp Change is **Fast Increasing**) then (Mode is **Normal Cooling**).
- 13) If (Temp Difference is **Way Hotter**) and (Rate of Temp Change is *NOT Fast Increasing*) then (Mode is **Max Cooling**).

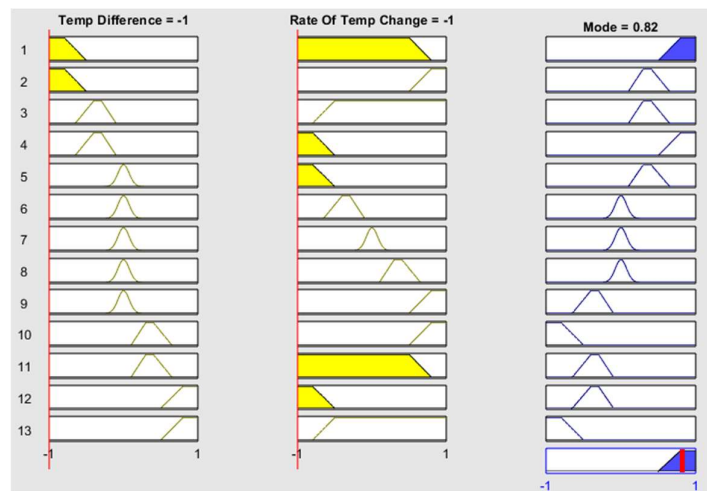
Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν η θερμοκρασία του χώρου είναι στα επιθυμητά πλαίσια και αυξάνεται/μειώνεται με όχι γρήγορο ρυθμό, τότε το κλιματιστικό παραμένει σε Stand-by mode. Αυτό επιλέχθηκε ώστε το κλιματιστικό να μην ενεργοποιείται συνεχώς με την κάθε μικρή απόκλιση του ρυθμού μεταβολής. Εάν κάποιος επιθυμεί να αντιδρά το Air-Conditioner στους παραμικρούς ρυθμούς, τότε μπορεί να αλλάξει κατάλληλα τους αντίστοιχους κανόνες.

3. Αξιολόγηση του μοντέλου

Το testing του Ασαφούς συστήματος γίνεται με δύο τρόπους: μέσω του GUI του Fuzzy Toolbox και μέσω του script *fuzzy_evaluation.m*.

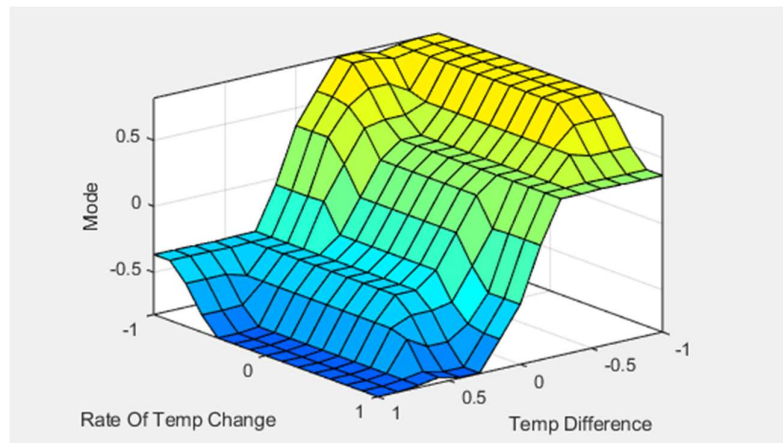
3.α. Αξιολόγηση με Fuzzy Toolbox GUI

Το γραφικό περιβάλλον του Fuzzy Toolbox έχει δύο διαγράμματα που βοηθάνε στην αξιολόγηση του μοντέλου. Το πρώτο από αυτά είναι του Rule Viewer (εικόνα 3) και δείχνει τις τιμές όλων των MFs βάση των ασαφών κανόνων, όπως και την έξοδο της αποσαφήνισης. Όλα λειτουργούν όπως αναμένεται με μία μόνο εξαίρεση: ενώ θα περίμενε κανείς οι ακραίες τιμές εισόδου να δίνουν και τις ακραίες τιμές εξόδου 1 και -1, οι τιμές αυτές δεν αποκτούνται ποτέ. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 3, στην οποία για είσοδο -1 και -1, η έξοδος της αποσαφήνισης δεν είναι 1, όπως θα έπρεπε, αλλά 0.82. Αυτό οφείλεται στην μέθοδο Cendroid που χρησιμοποιείται για την Defuzzification, η έξοδος της οποίας είναι το κέντρο βάρους της τελικής συνάρτησης συμμετοχής, οπότε και λογικό να μην παίρνει ποτέ την ακραία τιμή. Παρόλο που είναι ζητούμενο η έξοδος να παίρνει τις τιμές από -1 έως το 1 και παρόλο που υπάρχουν άλλες μέθοδοι, όπως η Largest of Maximum, που οδηγούν στις ακραίες τιμές, επιλέγεται η Centroid καθώς επιτυγχάνει την πιο ομαλή μετάβαση από το ένα στάδιο/MF στο άλλο, το οποίο είναι επιθυμητό σε εφαρμογές όπως την συγκεκριμένη.



Εικόνα 3: Διάγραμμα του Rule Viewer του Fuzzy Toolbox GUI

Η ομαλότητα της Centroid φαίνεται και από το δεύτερο διάγραμμα αξιολόγησης του GUI που είναι εκείνο του Surface Viewer (εικόνα 4). Η γραφική παράσταση αυτή δεν είναι τίποτα άλλο από ένα 3D διάγραμμα της εξόδου του συστήματος συναρτήσει των 2 εισόδων και μέσω αυτής παρατηρούμε την παραγόμενη επιφάνεια. Όπως, φαίνεται και στην εικόνα 4 η επιφάνεια αυτή για την Centroid δεν έχει απότομες “ανηφόρες” και επομένως μεταβαίνει ομαλά από την μία MF στην άλλη. Για άλλες μεθόδους όπως την Largest of Maximum, οι “ανηφόρες” είναι σχεδόν κατακόρυφες και άρα υπάρχουν μεγάλα “άλματα” στον χώρο των λύσεων.



Εικόνα 4: 3D διάγραμμα του Surface Viewer του Fuzzy Toolbox GUI για την μέθοδο αποσαφήνισης Centroid

3.β. Αξιολόγηση με το fuzzy_evaluation.m

Με την εκτέλεση αυτού του script πραγματοποιείται ένα λεπτομερές testing του ασαφούς συστήματος. Αφού τυπωθούν πρώτα οι χρήσιμες πληροφορίες της εικόνας 2 για το σύστημα, παράγεται ένας προκαθορισμένος αριθμός ζευγαριών τυχαίων εισόδων και για το καθένα από αυτά προβάλλεται η αντίστοιχη έξοδος και οι κυρίαρχες MFs (εικόνα 5). Το ποιος είναι οι MFs με τις μέγιστες τιμές υπολογίζεται μέσω της βοηθητικής συνάρτησης του *findMaxMF.m*.

```
----- Testing of Air-Condition Fuzzy System -----

Sample #1
Input Temp Difference = -0.166 => MF: Cooler
Input Rate Of Temp Change = -0.348 => MF: Decreasing
Output = 0.312 => MF: Normal Heating

Sample #2
Input Temp Difference = 0.441 => MF: Hotter
Input Rate Of Temp Change = 0.780 => MF: Fast Increasing
Output = -0.772 => MF: Max Cooling

Sample #3
Input Temp Difference = -1.000 => MF: Way Cooler
Input Rate Of Temp Change = 0.503 => MF: Increasing
Output = 0.813 => MF: Max Heating

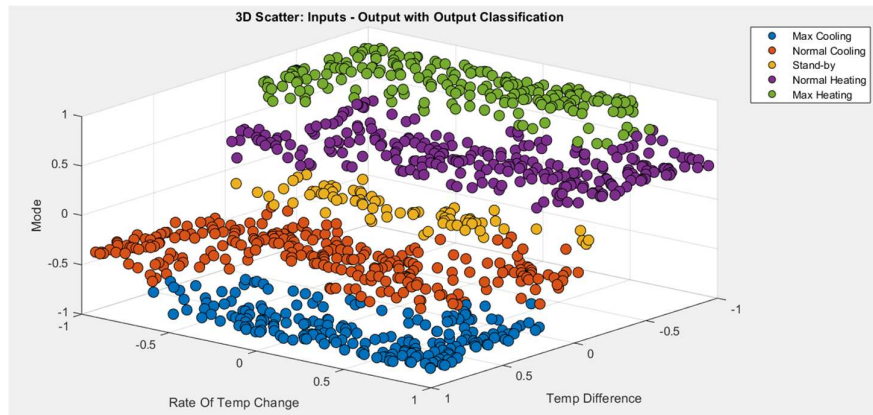
Sample #4
Input Temp Difference = -0.395 => MF: Cooler
Input Rate Of Temp Change = 0.525 => MF: Increasing
Output = 0.366 => MF: Normal Heating

Sample #5
Input Temp Difference = -0.706 => MF: Way Cooler
Input Rate Of Temp Change = -0.061 => MF: Constant
Output = 0.802 => MF: Max Heating
```

Εικόνα 5: Παράδειγμα της εξόδου του fuzzy_evaluation.m στο Command Window για 5 σετ δειγμάτων

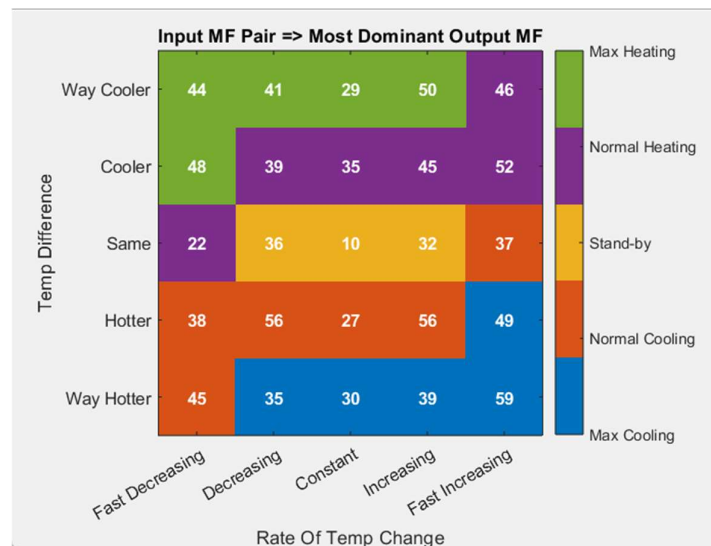
Στην συνέχεια, σχεδιάζονται δύο χρήσιμα διαγράμματα. Το πρώτο είναι μια 3D γραφική παράσταση των υπολογισμένων εξόδων συναρτήσει των αντίστοιχων εξόδων με ταυτόχρονη προβολή της κυρίαρχης MF μέσω ανάθεσης χρώματος (εικόνα 6). Αποτελεί το ίδιο διάγραμμα με εκείνο της εικόνας 4 μόνο που αυτό προβάλλει μόνο τα

σημεία που εξετάστηκαν, αντί για όλη την επιφάνεια, και επιπλέον κάνει ξεκάθαρη την κατανομή των MFs εξόδου στον τριδιάστατο χώρο.



Εικόνα 6: 3D αναπαράσταση για όλα το σύνολο της αξιολόγησης της εξόδου του συστήματος συναρτήσει των εισόδων, με ταυτόχρονη ταξινόμηση όλων των σημείων.

Το δεύτερο σχεδιάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 7 και είναι ένα heatmap που προβάλλει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς MFs εισόδου, ποια MF εξόδου είναι μέγιστη σε κάθε περίπτωση και πόσοι από αυτούς τους συνδυασμούς εμφανίζονται στην συγκεκριμένη αξιολόγηση. Αυτό το heatmap διευκολύνει την κατανόηση της ασαφούς λογικής προβάλλοντας συμπυκνωμένα όλους τους ασαφείς κανόνες και ταυτόχρονα προσφέρει μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

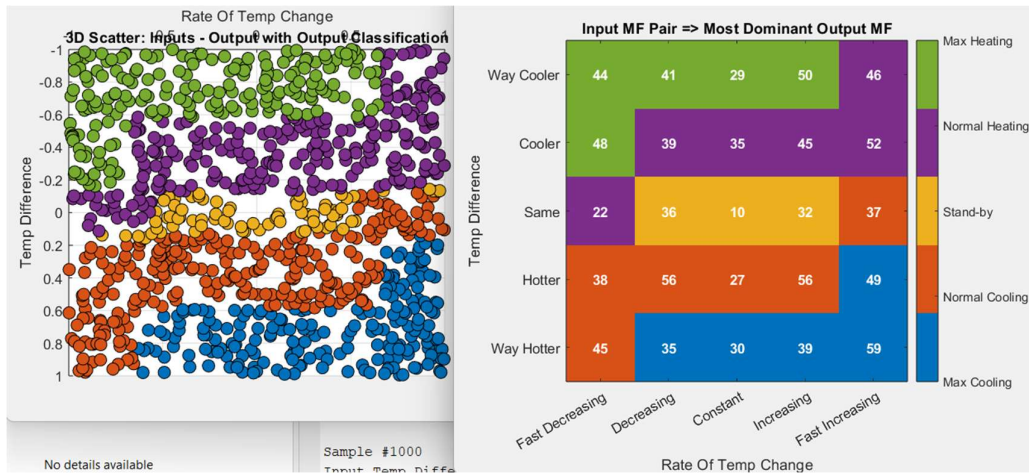


Εικόνα 7: Heatmap όλων των συνδυασμών MF εξόδου-εισόδων με φανερή την συχνότητα εμφάνισης τους στην αξιολόγηση

Σχόλιο:

Μία λογική και ίσως αυτονόητη συνέπεια, αλλά ενδιαφέρουσα όπως και να έχει, είναι η σύνδεση που υπάρχει ανάμεσα στο 3D διάγραμμα της εικόνας 6 και το heatmap της εικόνας 7. Εάν κάποιος περιστρέψει το πρώτο έτσι ώστε να προβάλλεται η “κάτοψη” του διαγράμματος (δηλαδή να προβάλλεται όλο xy επίπεδο) θα παρατηρήσει ότι είναι

όμοιο του heatmap. Αυτή η ομοιότητα φαίνεται ξεκάθαρα στην *εικόνα 8* και είναι λογικό επακόλουθο, αφού οι άξονες x και y χωρίζονται σε διαστήματα που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες συναρτήσεις συμμετοχής, ακριβώς όπως συμβαίνει στο heatmap. Μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι στο (πλέον 2D) διάγραμμα υπάρχουν κάποια σημεία (outliers) που είναι λίγο απομακρυσμένα σε σχέση με τα όμοια τους. Αυτό οφείλεται στην μέθοδο αποσαφήνισης Centroid και αν επιλεγεί μία άλλη, όπως είναι η Smallest of Maximum, δεν υπάρχουν πλέον outliers και η ομοιότητα είναι ακόμη μεγαλύτερη.



Εικόνα 8: Η ομοιότητα μεταξύ του 3D scatter plot και του heatmap

4. Κώδικες

Παρακάτω παρατίθενται οι κώδικες των δύο αρχείων MATLAB και του *.fis* αρχείου που αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια.

4.α. fuzzy_evaluation.m

```
%% Testing of Fuzzy System
% After printing useful info about the Fuzzy SystemGenerate random normalized (between -1 and
1) inputs and calculate the
% output using the airCondition.fis Fuzzy system. Plot the results in a 3D
% space and create a heatmap showing input MF combinations, dominant output
% MF and their count.

close all;
clear;
clc;

% ----- User Input -----
rng(); % Leave blank for random inputs or set seed to reproduce results.

numSamples = 1000; % Number of sets of random inputs.
% -----

fismat = readfis('airCondition');

fprintf('\n----- Fuzzy System: %s -----\\n', fismat.Name);

for i = 1:numel(fismat.Inputs)
    inputVar = fismat.Inputs(i);
    fprintf('\nInput %d: %-21s (Range: [%.2f %.2f])\\n', i, inputVar.Name, ...
        inputVar.Range(1), inputVar.Range(2));

    for j = 1:numel(inputVar.MembershipFunctions)
        mf = inputVar.MembershipFunctions(j);
        fprintf('  MF %d: %-15s  Type: %-8s  Params: %s\\n', j, mf.Name, ...
            mf.Type, mat2str(mf.Params, 4));
    end
end

outputVar = fismat.Outputs;
fprintf('\nOutput: %-21s (Range: [%.2f %.2f])\\n', outputVar.Name, ...
```

```
outputVar.Range(1), outputVar.Range(2));

for j = 1:numel(outputVar.MembershipFunctions)
    mf = outputVar.MembershipFunctions(j);
    fprintf(' MF %d: %-15s   Type: %-8s   Params: %s\n', j, mf.Name, ...
        mf.Type, mat2str(mf.Params, 4));
end

fprintf('\n-----\n');

fprintf('\nPress a button to initiate testing...\n');
pause;

inputNames = {fismat.Inputs.Name};
outputNames = {fismat.Outputs.Name};

inputData = 2 * rand(numSamples, numel(fismat.Inputs)) - 1;
outputData = evalfis(fismat, inputData);

outputMFIndices = zeros(numSamples, 1);
input1MFIndices = zeros(numSamples, 1);
input2MFIndices = zeros(numSamples, 1);

fprintf('\n\n----- Testing of Air-Condition Fuzzy System -----\n');

for i = 1:numSamples
    fprintf('\nSample #%d\n', i);
    inputVals = inputData(i, :);

    for j = 1:numel(fismat.Inputs)
        var = fismat.Inputs(j);
        value = inputVals(j);
        mfIndex = findMaxMF(value, var.MembershipFunctions);

        if j == 1
            input1MFIndices(i) = mfIndex;
        else
            input2MFIndices(i) = mfIndex;
        end
        fprintf('Input %s = %.3f => MF: %s\n', var.Name, value, ...
            var.MembershipFunctions(mfIndex).Name);
    end
end
```

```

        outVal = outputData(i);
        var = fismat.Outputs;
        mfIndex = findMaxMF(outVal, var.MembershipFunctions);
        outputMFIndices(i) = mfIndex;
        fprintf('Output = %.3f => MF: %s\n', outVal, ...
            var.MembershipFunctions(mfIndex).Name);
    end

    fprintf('\n-----\n\n');

    outputMFs = fismat.Outputs.MembershipFunctions;
    numOutputMFs = numel(outputMFs);
    colors = lines(numOutputMFs);

    % ----- 3D Scatter Plot -----

    figure(1);
    set(gcf, 'Position', [250, 150, 1100, 500]);

    hold on;

    for k = 1:numOutputMFs
        idx = (outputMFIndices == k);
        scatter3(inputData(idx,1), inputData(idx,2), outputData(idx), 80, ...
            'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor', colors(k,:), ...
            'DisplayName', outputMFs(k).Name);
    end
    xlabel(inputNames{1});
    ylabel(inputNames{2});
    zlabel(outputNames{1});
    title('3D Scatter: Inputs - Output with Output Classification');
    grid on;
    legend('Location', 'bestoutside');
    view(45,30);

    hold off;

    % -----

    % ----- Heatmap -----

    input1MFs = fismat.Inputs(1).MembershipFunctions;

```

```
input2MFs = fismat.Inputs(2).MembershipFunctions;
numInput1MFs = numel(input1MFs);
numInput2MFs = numel(input2MFs);

countMatrix = zeros(numInput1MFs, numInput2MFs);

for i = 1:numInput1MFs
    for j = 1:numInput2MFs
        idx = (input1MFIndices == i) & (input2MFIndices == j);
        countMatrix(i,j) = sum(idx);
    end
end

input1Centers = zeros(numInput1MFs,1);
for i = 1:numInput1MFs
    mf = input1MFs(i);
    if ismember(mf.Type, {'trapmf', 'trimf'})
        input1Centers(i) = mean(mf.Params);
    elseif strcmp(mf.Type, 'gaussmf')
        input1Centers(i) = mf.Params(2);
    else
        input1Centers(i) = mean(mf.Params);
    end
end

input2Centers = zeros(numInput2MFs,1);
for j = 1:numInput2MFs
    mf = input2MFs(j);
    if ismember(mf.Type, {'trapmf', 'trimf'})
        input2Centers(j) = mean(mf.Params);
    elseif strcmp(mf.Type, 'gaussmf')
        input2Centers(j) = mf.Params(2);
    else
        input2Centers(j) = mean(mf.Params);
    end
end

outputMFMap = zeros(numInput1MFs, numInput2MFs);

for i = 1:numInput1MFs
    for j = 1:numInput2MFs
        inputVec = [input1Centers(i), input2Centers(j)];
        outVal = evalfis(fismat, inputVec);
        outputMFMap(i,j) = findMaxMF(outVal, fismat.Outputs.MembershipFunctions);
    end
end
```

```

end

figure(2);
set(gcf, 'Position', [488, 200, 560, 420]);

imagesc(outputMFMap);
colormap(colors);
colorbar('Ticks', 1:numOutputMFs, 'TickLabels', {outputMFs.Name});
title('Input MF Pair => Most Dominant Output MF');
xlabel(fismat.Inputs(2).Name);
ylabel(fismat.Inputs(1).Name);
xticks(1:numInput2MFs);
xticklabels({input2MFs.Name});
yticks(1:numInput1MFs);
yticklabels({input1MFs.Name});
axis square;

for i = 1:numInput1MFs
    for j = 1:numInput2MFs
        text(j, i, num2str(countMatrix(i,j)), ...
            'Color', 'w', 'FontWeight', 'bold', ...
            'HorizontalAlignment', 'center');
    end
end

% -----

```

4.β. findMaxMF.m

```

function mfIdx = findMaxMF(x, mfs)
    degrees = arrayfun(@(mf) evalmf(mf, x), mfs);
    [~, mfIdx] = max(degrees);
end

```

4.γ. airCondition.fis

```

[System]
Name='airCondition'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=13
AndMethod='min'
OrMethod='max'

```



```
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='Temp Difference'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='Way Cooler': 'trapmf', [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF2='Cooler': 'trapmf', [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF3='Same': 'gaussmf', [0.075 0]
MF4='Hotter': 'trapmf', [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF5='Way Hotter': 'trapmf', [0.5 0.8 1 1]
```

```
[Input2]
Name='Rate Of Temp Change'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='Fast Decreasing': 'trapmf', [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF2='Decreasing': 'trapmf', [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF3='Constant': 'gaussmf', [0.075 0]
MF4='Increasing': 'trapmf', [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF5='Fast Increasing': 'trapmf', [0.5 0.8 1 1]
```

```
[Output1]
Name='Mode'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='Max Cooling': 'trapmf', [-1 -1 -0.8 -0.5]
MF2='Normal Cooling': 'trapmf', [-0.65 -0.4 -0.3 -0.1]
MF3='Stand-by': 'gaussmf', [0.075 0]
MF4='Normal Heating': 'trapmf', [0.1 0.3 0.4 0.65]
MF5='Max Heating': 'trapmf', [0.5 0.8 1 1]
```

```
[Rules]
1 -5, 5 (1) : 1
1 5, 4 (1) : 1
2 -1, 4 (1) : 1
2 1, 5 (1) : 1
3 1, 4 (1) : 1
3 2, 3 (1) : 1
3 3, 3 (1) : 1
3 4, 3 (1) : 1
3 5, 2 (1) : 1
4 5, 1 (1) : 1
```

4 -5, 2 (1) : 1

5 1, 2 (1) : 1

5 -1, 1 (1) : 1