



الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية
ماجستير التحكم والروبوتيك

تطوير متحكم الشبكات العصبونية العائمة للتحكم بعربة Steering of a Passenger Car using Fuzzy-Neural Controller

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في نظم التحكم والروبوتيك-اختصاص تحكم
إعداد:

م. هدى رسلان

إشراف

د. ميشيل السبع

د. لؤي صالح

العام

٢٠١٦

الملخص

أشارت الإحصاءات إلى أن الملايين من الناس يفقدون حياتهم سنوياً بسبب حوادث السير، وغالباً يكون المسبب الرئيسي لها هو الأخطاء البشرية، لذلك باتت المواضيع التي تهتم بزيادة درجة أمن القيادة هي أحد أهم المواضيع التي يعمل عليها الباحثون.

وأهم الأبحاث التي طرحت في هذا المجال هي التي تهتم بتخفيف الخطر الذي يحدث عند ارتكاب السائق خطأ في القيادة، وذلك إما من خلال نظم تحمل جزءاً من مهام القيادة كما في النظم المساعدة، أو من خلال النظم التي تتولى القيادة بشكل كامل كما في نظم القيادة الذاتية.

يهدف هذا المشروع إلى تطوير الجزء الخاص بالتحكم العرضي للعربة الذي يهتم بمنع العربة من الخروج عن المسار عند المنعطفات وسيتم ذلك من خلال بناء متحكم يعتمد في بنيته على نظرية الشبكات العصبونية العائمة التي تدمج ما بين التحكم العائم والشبكات العصبونية، وستكون مهمته بشكل أساسي تعديل حركة المقود بحيث تتوافق مع المنعطفات على الطريق الذي تجتازه العربة.

سيتم تدريب هذا المتحكم من خلال بيانات يتم تحصيلها من نموذج السائق على أحد الطرق حيث تعتبر مرحلة التعليم لهذا المتحكم هي المرحلة الأساسية للحصول على تحكم مستقر.

أعطت نتائج المحاكاة أن المتحكم الذي تم بناؤه قادر على تعديل حركة المقود بشكل متوافق مع المنعطفات بشكل مماثل لنموذج السائق.

الشكر والتقدير

الحمد والشكر لله عز وجل الذي بحمده تتم النعم أن يسر أمري كي أقدم هذا العمل المتواضع.

والشكر والعرفان والتقدير العظيم إلى كل من ساعدني في إنجاز هذا العمل وأخص بالذكر:

الدكتور المشرف ميشيل السبع

الذي لم يدخر جهداً في مساعدتي وإرشادي ولم يبخل عليّ بتوجيهاته القيّمة التي لولاها لم يتم هذا البحث.

الدكتور المشرف لؤي صالح

الذي كان لي عوناً في تسهيل الصعوبات من خلال توجيهاته القيّمة. ولا يفوتني أن أشكر السيد الدكتور ابراهيم شعيب رئيس قسم النظم الالكترونية لاهتمامه ورعايته الكبيرين.

إهداء

إلى الذي أشعر أمامه بعجز الكلمات فكيف أصف من رباني وأكرمني وأعطاني دون مقابل
كيف أصف من لا أجد الراحة الا بين ذراعيه ولا أرى المحبة إلا في عينيه أبي يا منارتي في
الظلمات و يا قدوتي في الحياة إليك أهدي عملي وهو إن حق القول ليس عملي وحدي هو ثمرة
صبرك وعطائك ومحبتك

أبي الحبيب المهندس محمد طلال رسلان

إلى التي لا أرجو من الحياة بعد رضا الله الا رضاها وما نجاحي في الحياة الا بدعاها الى التي
كلما غبت عنها بات كل حلمي لقاءها فان سعادتي هي ملك يداها أمي يا حبيبة عشقتها كلماتي
تعجز عن شكرك فكيف الشكر لمن لولاها لم أكن. كيف الشكر لمن حملتني في جوفها جنينة
وحيثما كبرت حملتني في قلبها لكن بعد هذا البعد سأهديك عملي لعله يعوض عن تقصيري
بالبعد عنك

أمي الحبيبة وسام الأخرس

إلى الذين شاركوني كل لحظات حياتي وكانوا لي سنداً بأصعب ظروف في أعطوني دون مقابل ولم
أستطع يوماً أن أوفيهم حقهم فمنذ صغري أمسكوا بيدي ومنذ ولدت رأيتهم بقربي رزقت حبهم
وكبر ذلك الحب يوماً بعد يوم حتى استوطن عشقهم في قلبي فهم وحدهم من أتمنى لو أن روعي
تهدي لأهديهم روعي لعلي أوفيهم حقهم وأرد الجميل

إخوتي: سمر – زينة – م. عزه – د. فراس

إلى من رزقني الله حبهم وكانوا لي إخوة في العطاء إلى الذين أمضيت معهم أجمل الأيام إلى
الذين أشكر الله في كل يوم أن جمعني بهم إلى الذين تعجز كلماتي عن شكرهم

أصدقائي

فهرس الأشكال

الصفحة

الشكل

- الشكل ١:١ المراحل التي يتبعها الانسان أثناء قيادة العربة ٣
- الشكل ١:٢ الدافع لاستخدام التحكم العائم والشبكات العصبونية ٣
- الشكل ٢:١ تحديد متغيرات الطريق باستخدام قاعدة بيانات ومستقبل ال GPS ٥
- الشكل ٢:٢ المعلومات المرئية التي يتم تحصيلها عن الطريق من قبل السائق أثناء قيادته للعربة ٦
- الشكل ٢:٣ البنية العامة لنموذج تحكم السائق بالمقود ٧
- الشكل ٢:٤ المخطط الصندوقي لنموذج السائق - البيئة المحيطة - نموذج العربة ١٠
- الشكل ٢:٥ القوة النابذة وانزلاق العجلات الذي يطبق على العربة أثناء الانعطاف ١١
- الشكل ٢:٦ تغير السرعة الآمنة مع الانعطاف بناء على قيمة الزاوية البعيدة والتسارع الجانبي ١٢
- الشكل ٢:٧ استراتيجية الكبح لتعديل السرعة والوصول إلى السرعة الآمنة في الوقت المحدد ١٣
- الشكل ٢:٨ نموذج تحكم بالمقود مؤلف من حلقتي تحكم عائم ١٤
- الشكل ٢:٩ دورة تدريب متحكم الشبكات العصبونية ١٥
- الشكل ٣:١ تمثيل درجة الانتماء ١٨
- الشكل ٣:٢ تابع الانتماء المثلثي ١٩
- الشكل ٣:٣ تابع الانتماء ذو الشكل شبه المنحرف ١٩
- الشكل ٣:٤ تابع الانتماء ذو القيمة الوحيدة ٢٠
- الشكل ٣:٥ تابع الانتماء الغاوصي ٢٠
- الشكل ٣:٦ تابع انتماء السيغمويد ٢١
- الشكل ٣:٧ مجموعتان عائمتان ٢١
- الشكل ٣:٨ التقاطع العائم ٢٢
- الشكل ٣:٩ الاجتماع العائم ٢٢
- الشكل ٣:١٠ المتتم العائم ٢٣
- الشكل ٣:١١ مكونات نظام الاستدلال العائم ٢٤
- الشكل ٣:١٢ مجموعة من القواعد المجمعمة للحصول على الخرج النهائي ٢٥
- الشكل ٣:١٣ طريقة مركز الثقل لفك التعويم ٢٦
- الشكل ٣:١٤ طريقة المركز الوسطي ٢٧
- الشكل ٣:١٥ طريقة القيمة العظمى ٢٧
- الشكل ٣:١٦ نموذج ممداني للاستدلال العائم ٢٨
- الشكل ٣:١٧ نموذج تاكاجي سوجينو للاستدلال العائم ٢٩
- الشكل ٣:١٨ البنية العامة لنظام الاستدلال العائم المتكيف عصونيا ٣٠
- الشكل ٣:١٩ مكافئة بنية نظام الاستدلال العائم ببنية ANFIS ٣١
- الشكل ٣:٢٠ نتيجة الإسقاط الشكلي لمجموعة نقاط على تابع من الدرجة الثانية ٣٣
- الشكل ٤:١ بنية نموذج السائق في المحاكي PARTAGE ٣٦
- الشكل ٤:٢ طبقتين من المتحكم العائم لأجل تحقيق عملية التحكم بالمقود ٣٧
- الشكل ٤:٣ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة وزاوية دوران المقود المرغوبة ٣٨

- الشكل ٤:٤ العلاقة ما بين زاوية الدوران المرغوبة والعزم الواجب تطبيقه على المقود لتحقيق هذه الزاوية ... ٣٨
- الشكل ٤:٥ العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية دوران المقود المرغوبة عندما تكون الزاوية البعيدة مساوية للصفر ٤٠
- الشكل ٤:٦ تابع انتماء ال cluster الأول للزاوية القريبة ٤٠
- الشكل ٤:٧ العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية الدوران المرغوبة عندما تكون الزاوية القريبة قيمتها أصغر من [0.015] ٤١
- الشكل ٤:٨ تابعي انتماء ال cluster الثاني والثالث للزاوية القريبة ٤١
- الشكل ٤:٩ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة ضمن مجال ال cluster الأول للزاوية القريبة - [0.01,0.01] ٤٢
- الشكل ٤:١٠ تابع انتماء ال cluster الأول للزاوية البعيدة ٤٢
- الشكل ٤:١١ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة ضمن مجال ال cluster الثالث للزاوية القريبة - [0.07,-0.13] ٤٣
- الشكل ٤:١٢ تابعي انتماء ال cluster الثاني والثالث للزاوية البعيدة ٤٣
- الشكل ٤:١٣ مخطط صندوقي لتدريب متحكم الشبكات العصبونية العائمة ANFIS لمتحكم العزم ٤٧
- الشكل ٤:١٤ بيانات تدريب متحكم الموضع ٤٧
- الشكل ٤:١٥ بنية ANFIS لمتحكم العزم ٤٩
- الشكل ٤:١٦ الطريق test الذي تم الاعتماد عليه في اختبار المتحكم العائم ٥٠
- الشكل ٤:١٧ توابع انتماء متحكم الموضع ٥١
- الشكل ٤:١٨ تابع انتماء متحكم العزم ٥١

فهرس الجداول

الصفحة

الجدول

جدول ٣,١ توضيح مرحلتي التدريب ضمن الخوارزمية الهجينة	٣٢
جدول ٤,١ الاحتمالات الممكنة لبناء القواعد	٤٤
جدول ٤,٢ قواعد متحكم الموضع	٤٦
جدول ٤,٣ قواعد متحكم العزم	٤٨
جدول ٤,٤ مقارنة ما بين نموذج التحكم العائم الذي بناؤه ونموذج السائق في المحاكى PARTAGE	٥٢

جدول المصطلحات

ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
DIC	Discrete Incremental Clustering
FIS	Fuzzy Inference System
FLC	Fuzzy Logic Controller
GENSOF	Generic Self Organizing Fuzzy Neural Network
GPS	Global Positioning System
IAV	Intelligent Autonomous Vehicle
NMS	Neuromuscular system
TP	Tangent Point

الفهرس

الصفحة

العنوان

I.....	الملخص.....
II.....	الشكر والتقدير.....
III.....	إهداء.....
IV.....	فهرس الأشكال.....
VI.....	فهرس الجداول.....
VI.....	جدول المصطلحات.....
VII.....	الفهرس.....
١.....	١. الفصل الأول: مقدمة.....
١.....	١,١. مقدمة تمهيدية.....
١.....	٢,١. تعريف نظم القيادة الذاتية Autonomous driving systems.....
١.....	٣,١. تعريف نظم القيادة المساعدة assistance-driving systems.....
٢.....	١,٣,١ Lane keeping system.....
٢.....	٢,٣,١ Lane departure Warning system.....
٢.....	٤,١. التقسيم الوظيفي لنظم التحكم بالعربة.....
٢.....	١,٤,١. التحكم التعويضي compensatory module.....
٢.....	٢,٤,١. التحكم التنبؤي anticipatory module.....
٢.....	٥,١. الهدف من البحث.....
٣.....	٦,١. تحليل المشكلة.....
٣.....	٦,١. أدوات البحث.....
٣.....	٧,١. محتويات الرسالة.....
٥.....	٢. الفصل الثاني: نظم القيادة الذاتية.....
٥.....	١,٢. مقدمة.....
٥.....	٢,٢. ديناميكية تتبع الطريق بالاعتماد على القيم المقاسة من نظام تحديد المواقع العالمي (Global Positioning System).....
٧.....	٣,٢. نمذجة السائق في قيادة العربة.....
٧.....	١,٣,٢. التحكم التعويضي compensatory module.....
٨.....	٢,٣,٢. التحكم التنبؤي anticipatory module.....
٨.....	٣,٣,٢. نقطة التماس Tangent point.....
٩.....	٤,٢. النموذج الديناميكي للعربة.....
١٠.....	٥,٢. التحكم العرضي بالعربة.....
١١.....	٦,٢. التحكم الطولي بالعربة.....
١٢.....	٧,٢. استراتيجيات الكبح.....
١٣.....	٨,٢. تطبيق التحكم العائم على أنظمة القيادة.....
١٣.....	١,٨,٢. مقدمة عن التحكم العائم Fuzzy controller.....

١٣	.....	٢,٨,٢	بناء متحكم عائم للتحكم بحركة المقود Fuzzy steering controller
١٤	.....	٣,٨,٢	تطبيق المتحكم العصبي العائم على نظم القيادة الذاتية
١٤	.....	١,٣,٨,٢	التحكم الذكي في تعديل سرعة عربة باستخدام نمط التحكم العصبي العائم
١٥	.....	٩,٢	الخاتمة
١٦	.....	٣	الفصل الثالث: المنطق العائم ونظام الاستدلال العائم المتكيف عصبونياً ANFIS
١٦	.....	١,٣	مقدمة
١٦	.....	٢,٣	المميزات الأساسية للمنطق العائم
١٧	.....	٣,٣	المفاهيم الأساسية في المنطق العائم
١٧	.....	١,٣,٣	المجموعة التقليدية
١٧	.....	٣,٣,٢	المجموعة العائمة
١٧	.....	٣,٣,٣	المتغيرات اللغوية Linguistic variables
١٧	.....	٤,٣,٣	توابع الانتماء Membership Function
١٨	.....	١,٤,٣,٣	تابع الانتماء المثلثي Triangular Membership Function
١٩	.....	٢,٤,٣,٣	تابع انتماء شبه المنحرف Trapezoidal Membership Function
١٩	.....	٣,٤,٣,٣	تابع الانتماء ذو القيمة الوحيدة Singleton Membership Function
٢٠	.....	٤,٤,٣,٣	تابع الانتماء الغاوسي Gaussian Membership Function
٢٠	.....	٥,٤,٣,٣	تابع الانتماء السيغمويد Sigmoidal Membership Function
٢١	.....	٥,٣,٣	العمليات على المجموعات العائمة Operations on fuzzy sets
٢١	.....	١,٥,٣,٣	عملية التقاطع Intersection Operation
٢٢	.....	٢,٥,٣,٣	عملية الاجتماع Union Operation
٢٢	.....	٣,٥,٣,٣	متمم المجموعة العائمة fuzzy set Complement
٢٣	.....	٤,٥,٣,٣	التساوي Equality
٢٣	.....	٥,٥,٣,٣	الاحتواء Subsets
٢٣	.....	٦,٣,٣	القواعد العائمة Fuzzy rule
٢٣	.....	٧,٣,٣	بنية نظام الاستدلال العائم Fuzzy inference system structure
٢٤	.....	١,٧,٣,٣	عملية التعويم Fuzzification
٢٤	.....	٢,٧,٣,٣	مجموعة القواعد Rule Base
٢٤	.....	٣,٧,٣,٣	محرك الاستدلال inference engine
٢٥	.....	٤,٧,٣,٣	فك التعويم defuzzification
٢٨	.....	٨,٣,٣	أنواع أنظمة الاستدلال العائمة
٢٨	.....	١,٨,٣,٣	نموذج ممداني Mamdani
٢٨	.....	٢,٨,٣,٣	نموذج تاكاجي سوجينو Takagi-Sugeno
٣٠	.....	٤,٣	نظام الاستدلال العائم المتكيف عصبونياً Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
٣٠	.....	١,٤,٣	بنية نظام الاستدلال العائم المتكيف عصبونياً ANFIS structure
٣٢	.....	٢,٤,٣	خوارزميات التعلم الآلي المستخدمة في تدريب ANFIS
٣٢	.....	١,٢,٤,٣	طريقة المربعات الأصغرية (Least Squares Method)
٣٣	.....	٢,٢,٤,٣	خوارزمية الانتشار الخلفي Back propagation Algorithm
٣٤	.....	٥,٣	الخاتمة

٣٥	١,٤	٤. الفصل الرابع حل مسألة التحكم بالمقود باستخدام المنطق العائم والشبكات العصبونية
٣٥	١,٤	١,٤ مقدمة:
٣٥	١,١,٤	١,١,٤ توصيف لبنية المحاكي:
٣٦	٢,١,٤	٢,١,٤ توصيف نموذج السائق في المحاكي
٣٦	٣,١,٤	٣,١,٤ الميزات المتاحة في هذا المحاكي:
٣٧	٢,٤	٢,٤ استخدام المنطق العائم في التحكم بمقود العربية:
٣٩	١,٢,٤	١,٢,٤ تصميم المتحكم الأول: متحكم الموضع
٣٩	١,١,٢,٤	١,١,٢,٤ تحصيل البيانات (الخطوة الأولى):
٣٩	٢,١,١,٥	٢,١,١,٥ العنقدة Clustering (الخطوة الثانية):
٤٣	٣,١,١,٥	٣,١,١,٥ بناء القواعد (الخطوة الثالثة):
٤٦	٢,٢,٤	٢,٢,٤ المتحكم الثاني: متحكم العزم:
٤٧	١,٢,٢,٤	١,٢,٢,٤ تحصيل بيانات التدريب (الخطوة الأولى):
٤٨	٢,٢,٢,٤	٢,٢,٢,٤ بناء النموذج الأولي لمتحكم Sugeno (الخطوة الثانية):
٤٨	٣,٢,٢,٤	٣,٢,٢,٤ بناء نموذج ANFIS (الخطوة الثالثة):
٤٩	٢,٥	٢,٥ الاختبار التجريبي:
٥٢	٣,٥	٣,٥ الخاتمة:
٥٣	٥	٥. الفصل الخامس خلاصة البحث والتوصيات المستقبلية
٥٣	١,٥	١,٥ خلاصة البحث:
٥٣	٢,٥	٢,٥ التوصيات المستقبلية:
٥٤	٦	٦. المراجع

١. الفصل الأول: مقدمة

يركز هذا الفصل على التعرف على نظم قيادة العربات، كما يعرض ملخص سريع لبعض الدراسات التي أجريت في مجال التحكم بها. ويوضح الهدف الأساسي من البحث.

١,١. مقدمة تمهيدية:

يفقد الملايين من الناس حياتهم بشكل سنوي بسبب حوادث السير، لذلك باتت المواضيع التي تهتم بزيادة درجة أمان الطرق هي أحد المواضيع الأساسية التي يركز الباحثون على تطويرها. نشرت منظمة الصحة العالمية World Health Organization تقريراً تتحدث فيه عن حوادث السير قدرت فيه أنه في كل عام يفقد 1.2 مليون إنسان حياته ويجرح 50 مليون آخرين بسبب حوادث السير. وتشير التوقعات إلى أن هذه النسبة ستزداد بمقدار 65% خلال العشرين عاماً القادمين [1]. تعود أسباب هذه الحوادث إلى: الأخطاء بشرية - الطقس السيء - الازدحام وغيرها. من الممكن تفادي بعض الحوادث الناجمة عن الأخطاء الملموسة والتي يمكن قياسها ولكن يبقى المسبب الرئيسي وهو خطأ الإنسان غير قابل للقياس فهو يحدث بشكل غير متوقع، بالتالي فإن زيادة أمن الطرق من خلال تحسين الطرق لن يساعد في حل هذه المشكلة، وقد توصل الباحثون إلى أن أفضل حل لتخفيف خطر أخطاء الإنسان هو استخدام نظم القيادة الذاتية أو نظم القيادة المساعدة [2,3].

١,٢. تعريف نظم القيادة الذاتية Autonomous driving systems:

تركز هذه النظم على نمذجة القيادة البشرية في شكل قادر على إدراك البيئة والتعلم والتفكير المنطقي، ونذكر منها العربات الذكية ذاتية الحركة Intelligent Autonomous Vehicle (IAV) والتي أثبتت جدواها على الطرق السريعة في الحالات البسيطة (طريق محدد - منعطفات غير شديدة - لا يوجد عوائق أو تجاوز على الطريق....)، ولكن في البيئة الواقعية الأكثر تعقيداً لا تزال بعيدة عن التطبيق. وحتى في النظم الذكية لتعديل السرعة Intelligent Speed Adaptation (ISA) التي تستخدم لتنظيم سرعة العربة على الطرق السريعة والتي اثبتت فعاليتها في العديد من الدول، فإن هذه النظم تستجيب فقط للسرعات المحددة على الطريق، وفي الحالة الأكثر تعقيداً فإنها تستطيع تعديل سرعتها لأجل التجاوز عند وجود عوائق أمامها، ولكن الموضوع الأكثر تعقيداً وهو التنبؤ بوجود انعطاف وتعديل سرعة العربة وفقاً له لا يزال قيد البحث، وهو موضوع في غاية الأهمية لأجل تحقيق درجة أمان أعلى للسائق [3,4].

١,٣. تعريف نظم القيادة المساعدة assistance-driving systems:

تمثل هذه النظم محور البحث الحالي في مجال قيادة العربات وتهدف إلى تخفيف عبء القيادة عن السائق من خلال القيام بجزء من المهام، كما أنها تعمل على تطوير الأداء عندما يرتكب السائق خطأ ما. بالتالي هي لا تلغي القيادة البشرية كما في العربات ذاتية الحركة، إنما هي نظم تساعد الإنسان في القيادة لتحقيق درجة أمان أعلى وأداء أمثل.

ومن بين أهم نظم القيادة المساعدة نستطيع أن نذكر نظم التحكم بالمقود المساعدة وتقسم هذه النظم تبعاً لطريقة التحكم إلى قسمين:

١,٣,١ Lane keeping system

في هذا النظام يتم التحكم بالمقود بشكل مستمر وذلك لتخفيف عبء القيادة عن السائق وتحسين ملاحقة الطريق. وذلك عن طريق إضافة عزم تصحيح ضعيف على المقود لا يتجاوز 10 % من العزم الذي يطبقه السائق، بحيث يمكن للسائق معاكسة هذا العزم حيث يشاء دون أن يشعر بأن عزمًا آخر على المقود يحاول إقحام نفسه. يكون النظام فعالاً في تجنب الخروج عن المسار الذي يحدث نتيجة سهو السائق أو عدم انتباهه، إذ يساعد العزم التصحيحي المضاف في تأخير خروج العربة عن المسار لبضعة ثواني يفترض أنها كافية لتنبه السائق وإعادته إلى وضعية القيادة الطبيعية [4]. انتشر هذا النظام تجارياً في العديد من الشركات المصنعة للسيارات حول العالم، ونذكر هنا النماذج الأولى المباعة في سيارات Nissan Cima 2001 و Honda Accord 2004.

٢,٣,١ Lane departure Warning system

يتم التحكم في المقود فقط عندما يتوقع وجود انحراف على الطريق (انعطاف)، أي أن التدخل على المقود لا يكون مستمراً وإنما فقط في حالات توقع الخطر، حيث يقوم النظام باستلام القيادة بشكل كامل وإنقاذ الموقف ثم إعادة التحكم للسائق بعد تجنب الخطر. تم تقييم هذه الأنظمة سلبياً من ناحية التفاعل مع السائق، إذ تم النظر للعزم التصحيحي كعزم اقحامي غير مرغوب في بعض الحالات لذلك لم تنتشر هذه الأنظمة بشكل واسع تجارياً [5,6].

٤,١,١ التقسيم الوظيفي لنظم التحكم بالعربة:

تقسم جميع نظم التحكم بالعربة وظيفياً إلى مستويين:

١,٤,١ التحكم التعويضي compensatory module:

يعمل هذا المستوى على تحقيق التحكم العرضي للعربة lateral control وذلك لضمان تحقيق تموضع صحيح للعربة على المسار ويتم ذلك بالاعتماد على متغيرات قريبة المدى بالنسبة لنظر السائق [5,6].

٢,٤,١ التحكم التنبؤي anticipatory module:

يعمل هذا المستوى على تحقيق التحكم بالسرعة الطولية للعربة longitudinal control ويتكامل مع التحكم التعويضي عند وجود منعطفات وذلك من خلال الاعتماد على متغيرات بعيدة المدى بالنسبة لنظر السائق مما يساعد في عملية التنبؤ بوجود منعطف قبل الوصول إليه مما يحقق استقرار في عملية التحكم بالمقود [5,6].

٥,١ الهدف من البحث:

نحاول من خلال هذا العمل بناء خوارزمية تحكم ذاتي بمقود العربة تهدف إلى منع خروج العربة عن مسارها المحدد ولا سيما عند وجود المنعطفات.

تستند فكرة البحث على الدمج ما بين مستويي التحكم بالعربة (التحكم التعويضي والتحكم التنبؤي) لتحقيق نموذج تحكم بالمقود يحاكي نموذج السائق ويعتمد هذا النموذج في بنائه على التعلم من خبرة الانسان بشكل رئيسي وذلك باستخدام مفهوم التحكم العائم والشبكات العصبونية.

٦,١ تحليل المشكلة:

يمكن نمذجة القيادة على أنها عبارة عن اتخاذ قرارات متتابعة تتضمن مجموعة من القواعد تربط ما بين الإدراك الحسي والحركي للسائق الشكل ١:١.



الشكل ١:١ المراحل التي يتبعها الإنسان أثناء قيادة العربة

إن عملية محاكاة التفكير المنطقي للإنسان تعني البحث في القواعد المنطقية التي يفكر بها الإنسان لاتخاذ القرارات المناسبة لإنجاز تحكم صحيح، وأفضل طريقة لاستنتاج هذه القواعد هي التعلم من خبرة الإنسان وتعتبر الشبكات العصبونية والمنطق العائم من أكثر النظم التي تحاكي المنطق البشري في التفكير الشكل ٢:١، وهذا ما دفعنا في هذا البحث إلى الاعتماد على نمط تحكم هجين يدمج ما بين من التحكم العائم والشبكات العصبونية وهو نظام الاستدلال العائم العصبوني المتكيف ANFIS.



الشكل ٢:١ الدافع لاستخدام التحكم العائم والشبكات العصبونية

٦,١ أدوات البحث:

سيتم الاعتماد في هذا البحث على محاكي simulator تم بناؤه على برنامج MATLAB وقد تم إثبات وثوقيته في عدة مقالات علمية [3,4,5].

يحتوي هذا المحاكى على نموذج ديناميكي لعربة ونموذج تحكم يحاكي السائق البشري بالإضافة إلى عدة نماذج لطرق مختلفة.

من خلال هذا المحاكى سيتم تحصيل البيانات التي سيتم الاعتماد عليها في بناء نموذج التحكم المطلوب وتجربته، بالإضافة إلى إمكانية مقارنة النتائج التي تم الوصول إليها مع نتائج نماذج التحكم الأخرى الموجودة مسبقاً على هذا المحاكى.

٧,١ محتويات الرسالة:

سنرى في هذا البحث دراسة مرجعية للأبحاث التي تتحدث عن نظم التحكم بالمقود بصنفيه التعويضي والتنبؤي بالإضافة للأبحاث التي تتحدث عن التحكم العائم والشبكات العصبونية ونظريات الدمج الهجين بينهما وهذا سيكون محور الفصلين الثاني والثالث.

في الفصل الرابع سنتحدث عن المحاكى PARTAGE وإمكانية اضافة نمط تحكم جديد سيتم بناؤه بالاعتماد على المنطق العائم والشبكات العصبونية ومن ثم سنوضح كيفية بناء نموذج التحكم المطلوب وتجربته ومقارنة نتائجه مع نماذج التحكم الموجودة مسبقا على المحاكى PARTAGE. والفصل الخامس سيناقتش الافاق المستقبلية للبحث وامكانية التطوير.

٢. الفصل الثاني: نظم القيادة الذاتية

يركز هذا الفصل على الأبحاث التي قُدمت في مجال القيادة الذاتية والتي توضح الديناميكية التي يسلكها السائق في تفاعله مع العربة ومع البيئة المحيطة به لتحقيق تتبع صحيح للطريق. ويوضح هذا الفصل أيضاً النموذج الديناميكي لعربة القيادة.

١,٢ مقدمة:

تعتبر اليوم القيادة الذاتية هي أحد فروع الذكاء الصناعي الواعدة، وبشكل عام يمكن تصنيفها إلى ثلاثة مجالات أساسية:

نظم تنبيه الاصطدام Collision warning systems.

نظم القيادة المساعدة Driver assisting systems.

أتمته العربة Vehicle automation.

ومن خلال هذا البحث سنقوم بالتركيز على كل من نظم القيادة المساعدة وأتمته العربة.

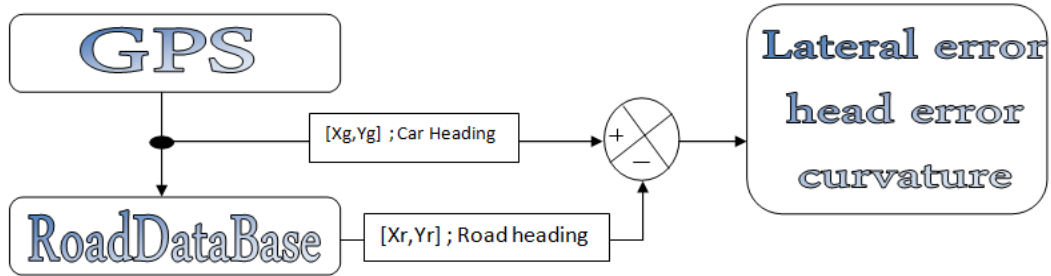
٢,٢ ديناميكية تتبع الطريق بالاعتماد على القيم المقاسة من نظام تحديد المواقع العالمي GPS

:(Global Positioning System)

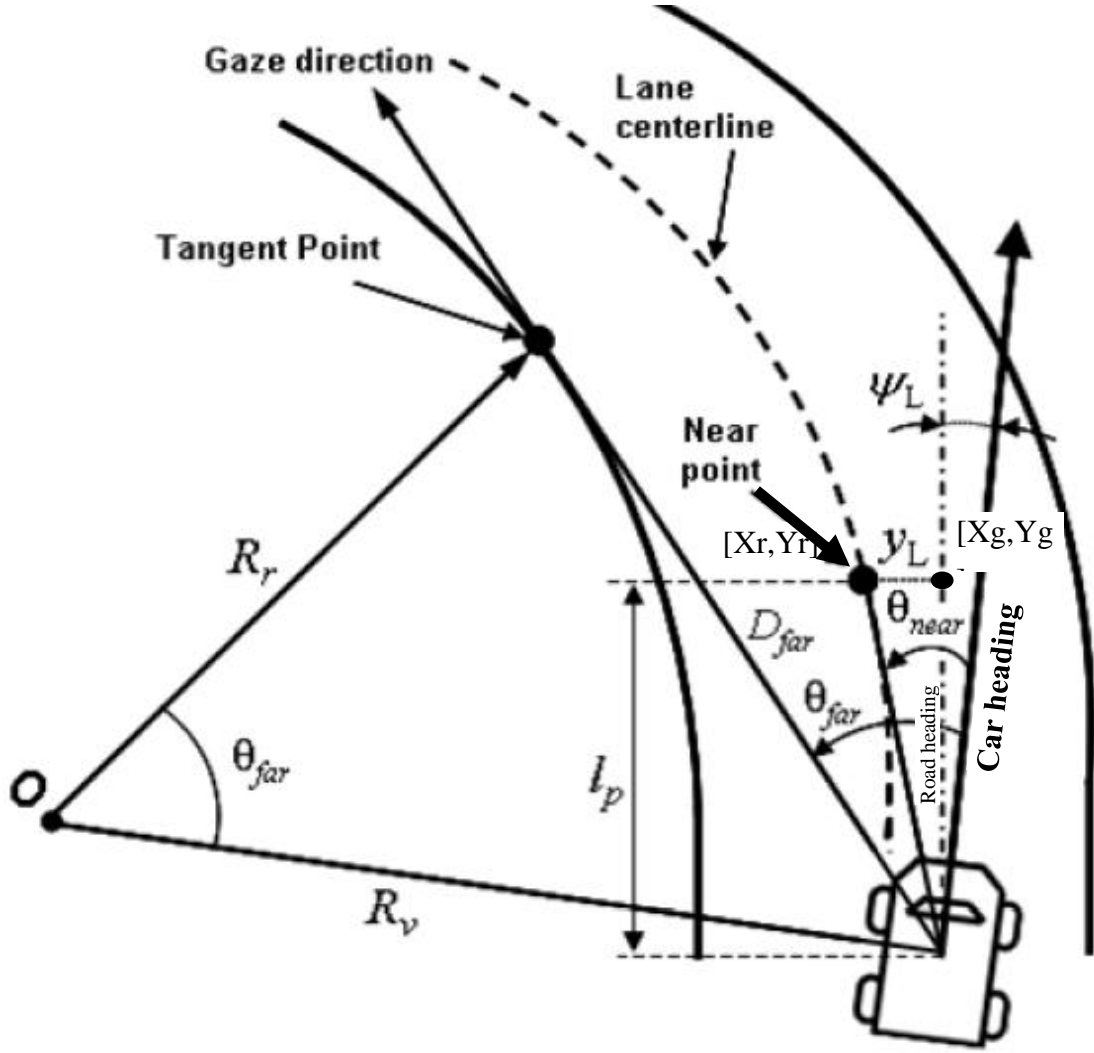
يقوم السائق بتحصيل البيانات من البيئة التي تحيط به بالنظر إليها ومعالجتها واستخلاص المعلومات التي سيحتاجها، وهي موقعه بالنسبة للطريق، ودرجة انحراف العربة عن مسارها وهو ما يعرف بزاوية الرأس، بالإضافة الى تحديد درجة انعطاف الطريق. وبناءً على هذه القيم يقوم بتحديد الزاوية التي يجب تحريك المقود بها لتحقيق تتبع صحيح للمسار وتحديد السرعة الآمنة على المسار.

وبالشكل العملي لتحقيق نظام تحكم مساعد يحاكي العملية التي يقوم بها السائق في تحصيل هذه المعلومات فإنه يمكننا وعلى معلومات مخزنة بشكل مسبق عن الطريق كما هو موضح في الشكل ١:٢ و GPS الاعتماد على مستقبل

الشكل ٢:٢ [6,8].



الشكل ١:٢ تحديد متغيرات الطريق باستخدام قاعدة بيانات ومستقبل ال GPS



الشكل ٢:٢ المعلومات المرئية التي يتم تحصيلها عن الطريق من قبل السائق أثناء قيادته للعربة

نعرف زاوية الخطأ الرأسية، ψ_l (head error) بأنها عبارة عن الخطأ بين اتجاه مقدمة العربة (ψ car heading) وبين اتجاه محور الطريق (ψ_d road heading) عند مركز العربة

$$(١.٢) \quad \psi_l = \psi - \psi_d$$

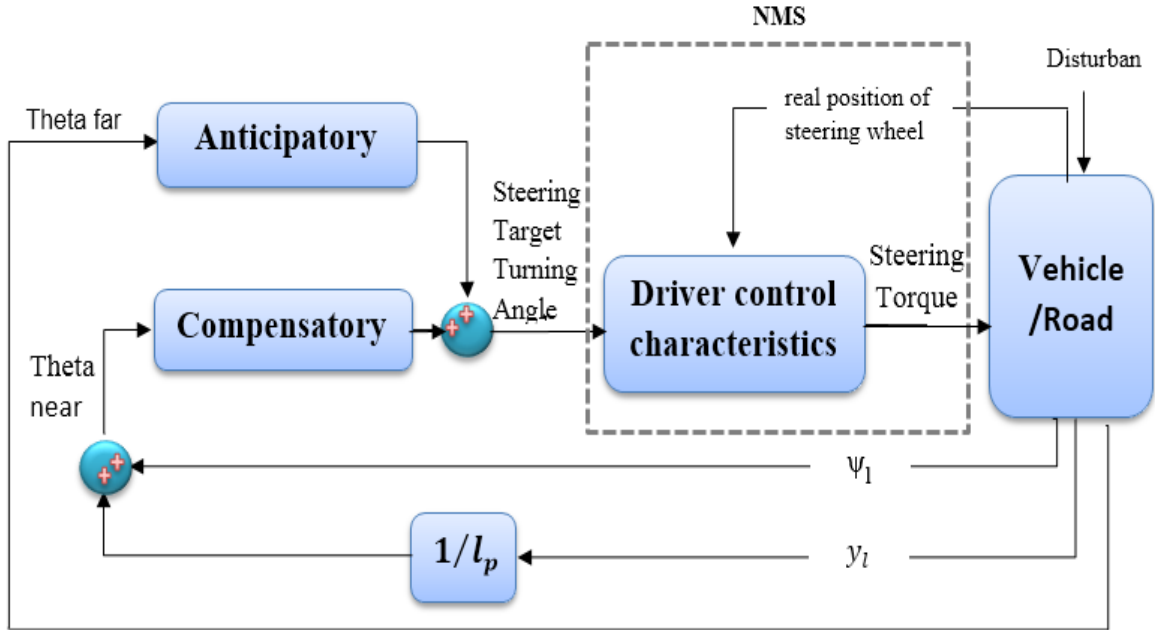
ونعرف الانزياح الجانبي للعربة عن المسار بأنه الفرق ما بين احداثيات موضع العربة الحالي $[x_g, y_g]$ التي يتم تحصيلها باستخدام مستقبل GPS وبين احداثيات النقطة التي من المفترض أن تتموضع عليها العربة في حال كان تتبعها للمسار صحيح $[x_r, y_r]$ ويجب الإشارة هنا أن هذه الاحداثيات لا تؤخذ عند مركز العربة الحالي إنما تؤخذ على بعد معين من العربة كما هو موضح في الشكل السابق وتعطي معادلة حساب خطأ الانزياح الجانبي وفق العلاقة:

$$(٢.٢) \quad \text{lateral error} : y_l = \begin{bmatrix} x_g - x_r \\ y_g - y_r \end{bmatrix}$$

أما درجة انعطاف الطريق curvature فإنها تعتمد على حساب الزاوية المحصورة بين خط تماس نظر السائق (الخط الممتد من العربة والذي يمس دائرة الانعطاف) وخط اتجاه مقدمة العربة وهذه الزاوية تكافئ تماماً زاوية تقوس الطريق θ_{far} .

٣,٢ نمذجة السائق في قيادة العربة:

أحد أهم النماذج التي وضعت في مجال التحكم بمقود العربة وضع من قبل Dnoes، يصف لنا هذا النموذج بأن عملية التحكم بالمقود تتم وفقاً لمستويين يعملان بشكل تفرعي يغذى كل منهما بإشارة رؤية مختلفة كما هو موضح في الشكل ٣:٢ الذي يوضح البنية العامة لنموذج التحكم بالمقود [5].



الشكل ٣:٢ البنية العامة لنموذج تحكم السائق بالمقود

المستوى الأول يعتمد على معلومات مرئية، تكون لمسافة قصيرة أمام العربة، تساعد بشكل جوهري في التصحيح السريع للتموضع الجانبي للعربة بالنسبة للطريق ويطلق على هذا المستوى التحكم التعويضي.
المستوى الثاني يتم تزويده بمعلومات بصرية، ولكن لمسافة بعيدة نوعاً ما عن العربة، وهذه المعلومات تتغير تبعاً لتوقع وجود تغيرات في انعطاف الطريق ويطلق على هذا المستوى التحكم التنبؤي.

١,٣,٢ التحكم التعويضي *compensatory module*:

يعمل هذا الجزء على المدى القريب، ويكون الهدف منه هو التحكم العرضي بالعربة وذلك للحفاظ عليها في المسار المحدد، حيث يقوم السائق بالنظر أمام العربة مباشرة وضمن مسافة صغيرة وذلك لتحديد ما يسمى الزاوية القريبة *near angle* وهي عبارة عن الزاوية التي يجب على السائق تحريك المقود بها للانتقال من الوضع الحالي للمقود إلى الوضع المرغوب به لأجل تحقيق تتبع صحيح للمسار بناءً على القيم المرئية القريبة ويكون هدف السائق دوماً جعل هذا الزاوية أصغر ما يمكن.

يتم حساب الزاوية القريبة الشكل ٢:٢ كتابع لكل من الانحراف الجانبي للعربة y_l عن المسار الذي تتبعه العربة، و زاوية الخطأ الرأسية ψ_1 ، وفق العلاقة الرياضية التالية:

$$(٣,٢) \quad \theta_{\text{near}} = \frac{y_l}{l_p} + \psi_1$$

حيث أن l_p يعبر عن بعد النقطة القريبة عن العربة والتي يقوم السائق بالنظر إليها لتحقيق تتبع صحيح للمسار بحيث تحقق هذه النقطة البعد الكافي ليستطيع السائق رؤية الطريق أمامه بشكل واضح [5,6,10].

وبناءً على هذه المعادلة يمكننا التوصل إلى أن التحكم التعويضي يحتاج إلى حلقتي تغذية خلفية كما هو موضح في الشكل ٣:٢:

الأولى للحصول على قيمة خطأ زاوية الرأس ψ_1 heading error angle. الثانية للحصول على الخطأ في البعد الجانبي y_1 lateral deviation.

٢, ٣, ٢ التحكم التنبؤي *anticipatory module*:

يقوم فيه السائق بتحريك المقود ليكافئ انعطاف الطريق، في بعض النماذج تعتبر احداثيات الطريق (من زوايا ونقاط وخطوط) عبارة عن إشارة دخل وهذا يجعل السائق يدرك الانعطاف الذي سيراه بشكل صحيح، أو بإمكانه ملاحقة نقطة محدّدة في البيئة وهذه النقطة تسمى TP (Tangent Point) الشكل ٢:٢، يستطيع من خلال هذه النقطة التنبؤ بوجود انعطاف [5,6,10].

في هذا النمط من التحكم نهتم بما يسمى الزاوية البعيدة، التي من خلالها نستطيع تحقيق التحكم بالسرعة ومعرفة درجة انعطاف الطريق، وهذه الزاوية هي المحصورة بين الخط الممتد من نظر السائق والذي يمس دائرة الانعطاف بالنقطة TP وخط امتداد مركز العربة من خلال هذه الزاوية نستطيع تحديد تقوس الطريق θ_{far} الشكل ٢:٢، وتعطى وفق المعادلة التالية [10]:

$$\theta_{far} \approx \frac{D_{far}}{R_v} \quad (٤,٢)$$

حيث أن:

D_{far} هو البعد بين مركز العربة ونقطة TP.

R_v هو البعد بين مركز العربة ومركز دائرة انعطاف الطريق.

بالاعتماد على البنية الموضحة في الشكل ٣:٢ فإن الخرج الناتج عن مستويي التحكم السابقين التعويضي والتنبؤي يحدد قيمة زاوية دوران المقود المرغوبة ومن ثم يتم تحويل هذه الزاوية إلى عزم يتناسب معها خلال نظام تحكم عصبي عضلي (neuromuscular system) NMS، ويكمن الفرق في اختيار إشارة التحكم المطبقة على المقود بكونها زاوية أو عزم بأن اختيار الزاوية كإشارة تحكم للمقود تجعل عملية مقاومة السائق لها أكثر صعوبة وهذا لا يتناسب مع نظم القيادة المساعدة [5,10].

نتيجة لأبحاث عرضت في هذا المجال وجد أنه عندما يكون جزء بعيد من الطريق مرئي والجزء القريب غير مرئي أي أن النقطة المميزة للانعطاف (TP) تم ادراكها فإن القيادة كانت سلسة وكان هناك استقرار في عملية التحكم ولكن بعض من الانحرافات الكبيرة عن مركز الطريق تم رصدها، وعلى العكس من ذلك فإنه عندما يكون فقط الجزء القريب من العربة هو الذي يمكن رؤيته فإن تتبع الطريق كان فيه اضطراب وعدم استقرار في عملية التحكم ولكن السائق استطاع المحافظة على العربة في مركز الطريق، أما عندما كان كل من الجزئين البعيد والقريب واضحا فإن الأداء كان مكافئاً لشروط التحكم والاستقرار، ومن هنا يتضح لنا أهمية كل مستويي التحكم التعويضي والتنبؤي في استقرار عملية التحكم بالمقود وتحقيق التتبع الصحيح للمسار [10].

٢, ٣, ٣ نقطة التماس *Tangent point*:

أجريت العديد من الأبحاث التي بينت العلاقة ما بين النقطة التي ينظر إليها السائق وحركة المقود على المنعطفات، حيث وجد أن المتابعة لنقطته تتحرك على مسار الطريق بجعل التحكم بالمقود أكثر نعومة، وبناءً على أبحاث قدمت في هذا المجال فقد توصل أن نقطة Tangent point هي أفضل نقطة تحقق استقرار في التحكم بالمقود.

وتعرّف هذه النقطة بأنها نقطة تماس خط نظر السائق مع انحناء الطريق فعند الاقتراب من منعطف فإن السائق يقضي وقتاً يؤخذ بعين الاعتبار وهو ينظر إلى نقطة TP أو بجوارها.

ويمكن تعريفها بطريقة أخرى بأنها النقطة التي يكون عندها اتجاه خط الحافة الداخلية وكأنه ينعكس عن نظر السائق، وهذا يعني أن هذه النقطة غير ثابتة ولكنها تنتقل على طول حافة الطريق بشكل متناسب مع عبور السائق للانعطاف.

بناءً على ما توصل إليه Land & Lee [5]، فإن اتجاه TP يمكن استخدامه للتنبؤ بانعطاف الطريق دون الحاجة إلى معرفة المسافة بشكل مسبق أي بعد هذه النقطة عن العربة، وهذا بسبب وجود علاقات رياضية بسيطة تربط ما بين انعطاف

الطريق والزاوية المحصورة بين TP وخط امتداد العربة وهي تعطى بالاعتماد على الشكل ٢:٢ وفق العلاقة التالية [10,13]:

$$(٥,٢) \quad \frac{1}{R_v} \approx \frac{\theta_{far}^2}{2y_l}$$

ومن هنا تكمن أهمية المكان الذي ينظر إليه السائق ودوره في إدراك الانعطاف، مع الأخذ بعين الاعتبار أن عملية النظر إلى الهدف المرئي تتم بشكل متتابع، وقد يكون هذا الهدف متطابق تماماً مع TP أو قريباً منها ضمن انزياح بمجال محدد. حيث أثبت Leo& land بأن الملاحقة المستمرة للنقطة TP يحسن عملية التحكم بالمقود أما في حال قام السائق بتحويل نظره لاتجاه آخر فإن ذلك سيؤدي إما إلى over_steering أو under_steering. وفي دراسات تلت ما توصل إليه Leo& land وجد أن ملاحقة نقطه مرئية تتحرك مع مسار الطريق هي استراتيجية فعّالة للسائق عندما يلاحظ وجود انعطاف، وإن أبرز وأسهل نقطة من الممكن أن تميز حافة الطريق هي TP وإضافة انزياح جانبي لها يعطي حرية أكبر للسائق بالنظر مع عدم فرض قيود عليه أي أن إضافة ما يسمى خاصية ديناميكية لنقطة TP أعطت نتائج أفضل في استقرار حركة المقود [10,13].

٤,٢ النموذج الديناميكي للعربة:

إن معرفة الطريقة التي يتفاعل فيها السائق مع عربته أثناء القيادة وفهم متغيرات الحالة الخاصة بالعربة تعتبر الجوهر الأساسي في تصميم وتطوير نظم التحكم الذاتي التي تهتم بزيادة درجة أمن القيادة. الشكل ٤:٢ يوضّح النظام الأساسي لجملة سائق-عربة [6].

أهم المحددات التي تؤخذ بعين الاعتبار لتعريف نموذج العربة هي [6,11]:

β (sideslip angle) زاوية الانزلاق ويتم أخذها عند مركز ثقل العربة وهي تعبر عن الزاوية التي يجب على العربة التوجه لها بالنسبة لموقعها الحالي.

r (yaw rate) تعبر عن معدّل الانحراف وهي عبارة عن مشتق زاوية الانحراف (انحراف العربة عن مركز الطريق).
 v السرعة الطولية للعربة.

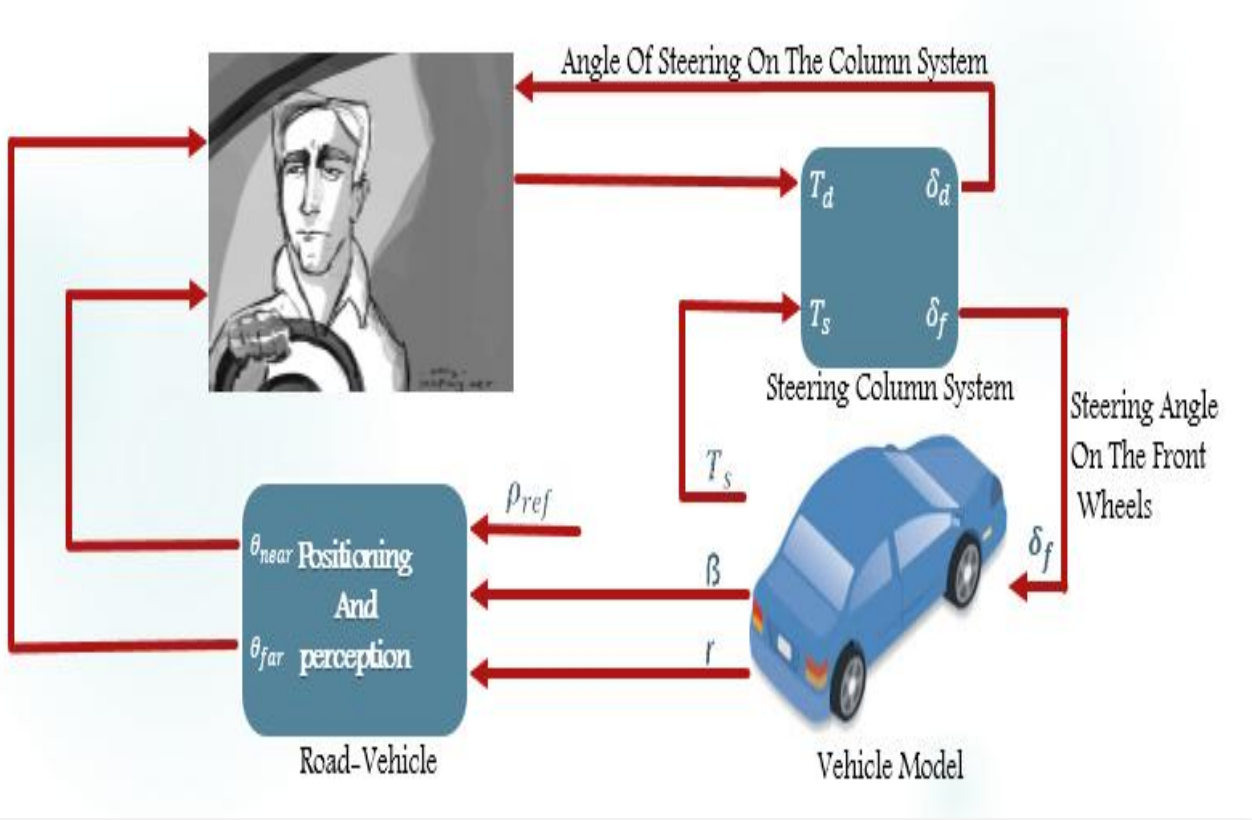
δ_f عبارة عن زاوية الانزلاق بالنسبة للعجلة الأمامية وهي تعبر عن الفرق بين اتجاه العجلة الحالي وبين الاتجاه الذي يجب على العربة تحريك العجلة إليه (هذا البارامتر يخص فقط للعجلة الأمامية لأنها هي التي ترتبط مع المقود على عكس الخلفية التي يكون اتجاهها هو نفس اتجاه محور العربة).

δ_d تمثّل زاوية دوران المقود المطلوبة.

T_s تمثّل ردّ فعل العربة عن العزم المطبق على محور عجلة القيادة أثناء تحريك العجلة وهذه القيمة يستفاد منها لتكامل التعويض الذي يعتمد على المشاهدة البصرية وذلك في حال التغيرات السريعة في السلوك الديناميكي المطلوب من العربة على سبيل المثال حدوث اضطراب مفاجئ أو اضطرابات غير متوقعة في الطريق.

حيث يتم ربط حساس العزم مع عمود الدوران ويقوم بقياس العزم المطبق عندما يتم تحريك عجلة القيادة (قد تنحرف العجلات نتيجة حدوث اضطراب ينتج عنه تحريك للمقود) [10].

بالتالي فإن عملية التفاعل ما بين السائق والعربة تتم من خلال مقود القيادة سواء قام السائق بتطبيق عزم عليه لتحريكه أو من خلال شعوره بالعزم التعويضي الناتج عن العربة ذاتها والذي يسبب حركة المقود.



الشكل ٤:٢ المخطط الصندوقي لنموذج السائق - البيئة المحيطة - نموذج العربة

٥, ٢ التحكم العرضي بالعربة:

هذا المقطع يصف لنا استراتيجية التحكم العرضي بالعربة ويعتبر التحكم بالمقود جوهرها الأساسي. يتخذ السائق قرار التحكم بالمقود بالاعتماد على معلومات مرئية يقوم بترجمتها إلى قرارات على شكل إشارات تحكم ترسل لكل من محرك مقود العربة وصمام الوقود لتحقيق مستويي التحكم التعويضي والتنبؤي.

في الجزء التنبؤي يتم الاعتماد فقط على معلومات مرئية ويكون الهدف منها الحصول على معلومات عن المنعطف الذي قد يتواجد على الطريق وبالتالي التنبؤ بأوامر التحكم الواجب تطبيقها على مقود العربة لاجتياز هذا المنعطف قبل الدخول إليه وبالتالي اجتياز هذا المنعطف بشكل ناعم ودون اضطرابات.

أما بالنسبة للجزء التعويضي فإن السائق يستخدم المشاهدة الحالية بالإضافة لمعلومات عن حركة العربة T_s يتم اضافتها الى حركة المقود المتوقعة، وذلك لتحقيق ملاحقه فورييه لتغيير المسار، ففي حال وجود تغيير سريع في السلوك الديناميكي للعربة (حدوث ضجيج كبير أو حدوث عملية كبح أو زيادة سرعة أو أي تغيير مفاجئ آخر) فإن معلومات حركة العربة تستخدم لمواجهة هذه الاضطرابات حتى لو كان الطريق مستقيماً وذلك موضح في الشكل ٤:٢.

بالتالي فإن الاختلاف بين التحكم التعويضي والتنبؤي أنه في الجزء التنبؤي نهتم فقط بالمعلومات المرئية بغض النظر عن المعلومات الحركية، وما يهم فقط هو معرفة الزاوية التي يجب ان تطبق على المقود لعبور المنعطف وذلك قبل الوصول إليه من اجل تحقيق دخول آمن، بينما بالجزء التعويضي فإن معلومات حركية ستؤخذ بعين الاعتبار بالإضافة الى المعلومات المرئية.

وبناء على ما سبق نستطيع تحقيق التحكم التنبؤي باستخدام معامل تنبؤ ثابت K حيث أن العلاقة ما بين الزاوية θ_{far} والعزم المولد T عبارة عن علاقة خطية تعطى بالمعادلة التالية:

$$(٦,٢) \quad \theta_{far} = KT$$

أما التحكم التعويضي فيمكن تقسيمه الى خطوتين أساسيتين:

الخطوة الاولى لتحسين تصحيح حركة المقود ونعتمد في هذه الخطوة على إدراك نقطة النظر القريبة التي تتوضع على بعد l_p من العربة، والهدف من هذه الخطوة هو تصحيح موضع العربة الحالي بالنسبة لموضعها في الطريق.

الخطوة الثانية هي التغذية الرجعية الحركية للسائق من خلال الاحساس بالعزم الرجعي (حيث ينتج عن حركة المقود عزم مرتجع) وهي توظف لمحاكاة رد فعل حركة ذراع السائق، وهذه التغذية الرجعية الحركية تعتبر على أنها عزم ضروري مطلوب لتكامل التعويض الذي يعتمد على المشاهدة البصرية وذلك في حال التغيرات السريعة في السلوك الديناميكي المطلوب من العربة [3,4,8,9].

٦,٢ التحكم الطولي بالعربة:

يكمن الهدف من التحكم الطولي هو تقديم اجرائية تقوم بتحديد السرعة الطولانية للعربة عندما يتم المرور بمنعطف أو حتى السير على طريق مستقيم، عن طريقة اختيار السرعة المناسبة من قبل السائق مبنية بشكل أساسي على معيار الأمان والسلامة وتقدر تبعاً للبعد الجانبي للطريق الذي يجتازه السائق أو بشكل أدق تبعاً للتسارع الجانبي المسموح على الطريق فعند الالتفاف حول منعطف يحدث تغير في الموضع الجانبي للعربة بتسارع جانبي محدد وذلك نتيجة الانزلاق والقوة النابذة وهذا يتضح في الشكل ٥:٢. و بإهمال أي متغيرات ماعدا نصف قطر المنعطف R_r فإن السرعة القصوى التي يجب على العربة الحفاظ عليها أثناء عبور المنعطف تحدد بعد الأخذ بعين الاعتبار قيمة التسارع الجانبي γ_1 [6].

$$(٧,٢) \quad V_{\max} = \sqrt{\gamma_1 R_r}$$

■ Because centrifugal force increases in direct proportion to square velocity, it is important to sufficiently reduce speed before entering a curve.



الشكل ٥:٢ القوة النابذة وانزلاق العجلات الذي يطبق على العربة أثناء الانعطاف

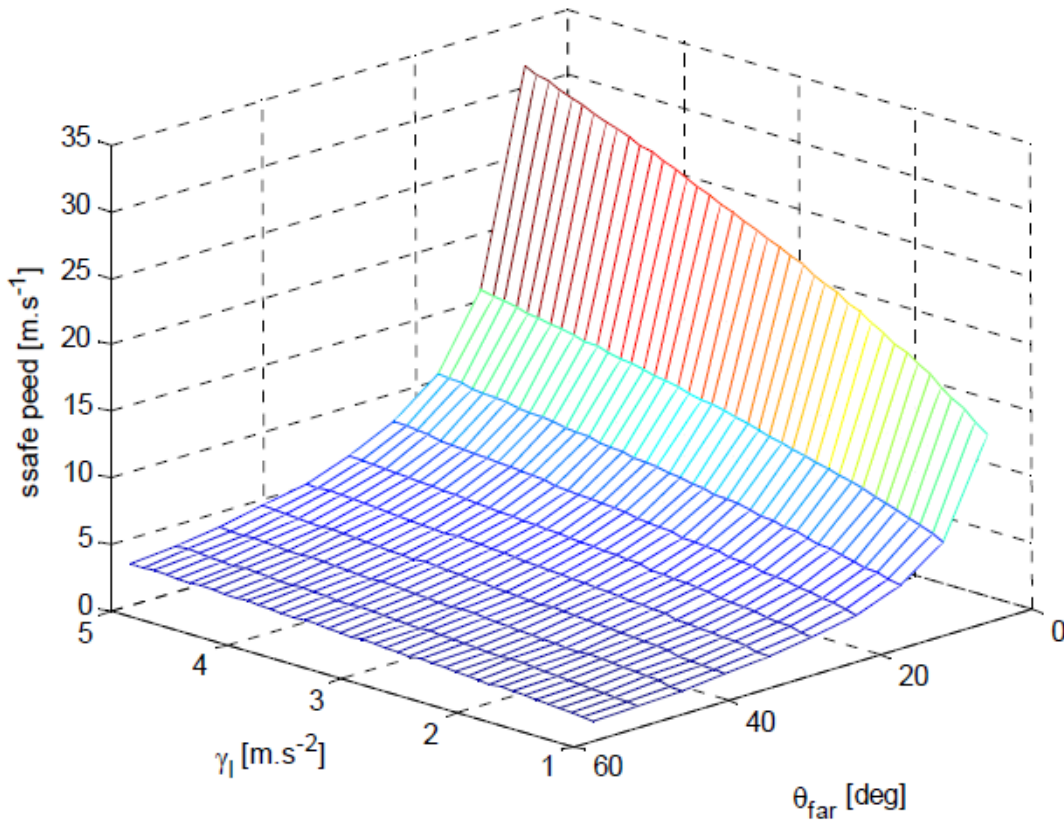
إن العلاقة السابقة تحدد لنا السرعة القصوى التي تستطيع العربة الوصول إليها أثناء مرورها بالانعطاف ولهذه القيمة علاقة مباشرة بالتسارع الجانبي أي أن مقدار هذه السرعة القصوى تتأثر بشكل غير مباشر بمقدار البعد الجانبي للعربة عن المسار. بناء على ذلك فإنه لحساب السرعة الحدية من أجل كل نقطة في المسار فإن البعد الجانبي للعربة y_1 عن المسار يتم أخذه بعين الاعتماد ولأجل ذلك سنقوم بتحديد القيمة الحدية للبعد الجانبي الذي لا يسمح للعربة أن تتجاوزه ويتم ذلك وفق العلاقة الاتية [6]:

$$(٨,٢) \quad \frac{1}{2} \gamma_1 \left(\frac{D_{\text{far}}}{v} \right)^2 \geq y_1$$

حيث ان $\left(\frac{D_{far}}{v}\right)$ تعبر عن زمن الوصول من مركز العربة الحالي الى نقطة TP. وبناءً على هذه القيمة الحدية وبالاعتماد على العلاقة (٥.٢) يمكن تحديد مقدار السرعة الحدية على العربة وفق العلاقة التالية:

$$(٩,٢) \quad v_{lim} = \frac{\sqrt{2\gamma_1 \gamma_l}}{\theta_{far}}$$

تبين هذه المعادلة العلاقة العكسية ما بين الزاوية البعيدة والسرعة الحدية فكلما زادت θ_{far} (والتي تزداد ايضاً بشكل عكسي مع نصف قطر المسار بالتالي كلما كان المسار اصغر كانت θ_{far} اكبر) ستتناقص السرعة وهو ايضاً ما يحدث مع بداية المنعطف حيث تزداد θ_{far} ثم تبدأ بالتناقص الشكل ٦:٢ [9][4].



الشكل ٦:٢ تغير السرعة الآمنة مع الانعطاف بناء على قيمة الزاوية البعيدة والتسارع الجانبي

٧,٢ استراتيجية الكبح:

بعد تحديد السرعة الآمنة التي يجب على السائق ألا يتجاوزها أثناء القيادة في المنعطف فمن الضروري تحديد طور الكبح حيث تتطلب هذه المرحلة تحديد البعد الذي سنبداً عنده بالفرملة لذلك يجب تحديد النقطة التي يجب عندها البدء بتخفيض السرعة للوصول للمنعطف بالسرعة اللازمة والآمنة.

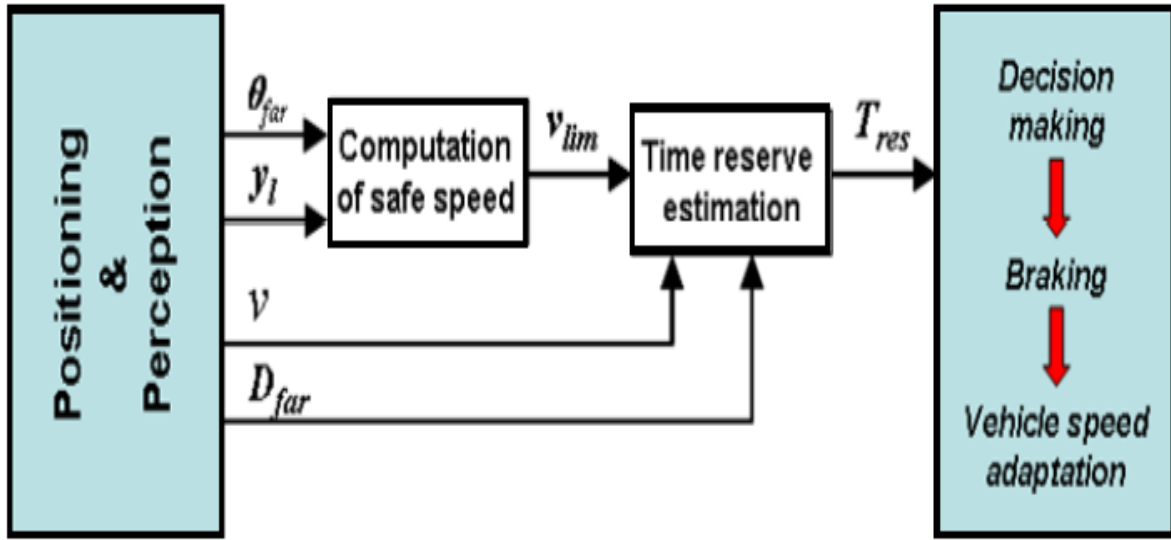
إن قرار تعديل سرعة العربة يجب أن يبدأ عند مشاهدة الانعطاف، وبالتالي فان الخطوة الأولى هي حساب السرعة المطلوبة أثناء الانعطاف v_{lim} وذلك بالاعتماد على معلومات المرئية كما ذكرنا سابقاً مثل البعد D_{far} والذي نستطيع اعتباره البعد عن TP.

الخطوة الثانية هي تحديد الزمن اللازم للبدء بعملية الكبح للوصول الى السرعة الآمنة يتم تحديده وفق العلاقة الآتية:

$$(١٠,٢) \quad T_{res} = \frac{1}{v} \left(D_{far} - \frac{v_{lim}^2 - v^2}{2\gamma_b} \right)$$

حيث أن:

v هو سرعة العربة الحالية .
 v_{lim} هي السرعة الآمنة التي يجب الوصول لها عند الدخول بالمنعطف.
 γ_b وهي تعبر عن قيمة التسارع الذي يستطيع به السائق تخفيض سرعته (وهي عبارة عن قيمة ثابتة).
 يفترض أن السائق سيتحرك هامش زمني مقداره ١ ثانية للدخول للانعطاف بدقة ويضاف إلى هذا الزمن مقدار ٢ ثانية وهو الزمن الذي يستغرقه السائق لتحريك قدمه من كبسة الوقود إلى كبسة الفرامل بالتالي يصبح امام السائق فترة زمنية مقداره ٣ ثنائية ($T_h = 3.0 S$) يجب أن تكون له هامشاً يبدأ بتغيير سرعته عندها . الشكل ٧:٢ يوضح كيفية اتخاذ السائق لقرار تعديل سرعة العربة، فعند مشاهدة انعطاف ومعرفة قيمة السرعة المحدودة فيه يتم حساب T_{res} فاذا كانت قيمته أصغر من T_h فان عملية الكبح سوف تبدأ [6].



الشكل ٧:٢ استراتيجية الكبح لتعديل السرعة والوصول إلى السرعة الآمنة في الوقت المحدد

٨,٢ تطبيق التحكم العائم على أنظمة القيادة:

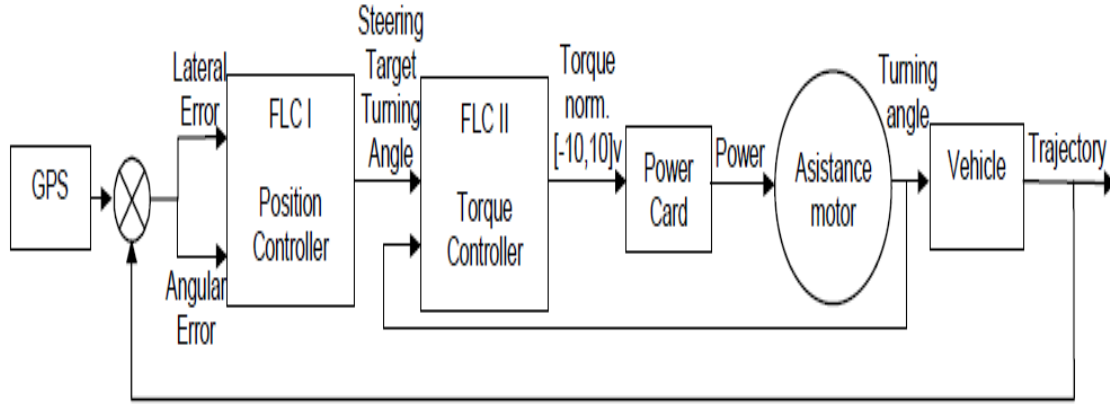
١,٨,٢ مقدمة عن التحكم العائم *Fuzzy controller*:

يعتبر المنطق العائم واحداً من الأدوات المهمة التي تستخدم اليوم في ايجاد حلول للنظم بطريقة واضحة وفعالية عالية خلال زمن قصير. إن جوهر المنطق العائم هو مجموعة القواعد البسيطة التي يُعتمد في تشكيلها على نظرية المجموعة العائمة وتعمل هذه القواعد على التقليل من دورة تطوير التصميم، تبسيط التصميم المعقد، تأمين بديل أفضل لحل مشكلة التحكم اللاخطي، تحسين عملية التحكم، تسهيل عملية التنفيذ، بالإضافة إلى أنها تقلل من كلفة الجزء المادي (hardware). تستخدم نظرية المجموعة العائمة لعرض مختلف الحالات التي من الممكن التعرض لها في اطار النظم الذكية التي تحاكي العقل البشري في اتخاذ القرارات. بينما تقوم القواعد التي تبني على هذه النظرية بتمثيل هذه الحالات على شكل مجموعة من القواعد (if – then rules) والتي تؤمن درجة عالية من الوضوح في نمذجة النظم.

٢,٨,٢ بناء متحكم عائم للتحكم بحركة المقود *Fuzzy steering controller*:

الهدف من عملية التحكم بالمقود هو حساب الزاوية التي يجب تحريك المقود بها وذلك لملاحقة المسار المرغوب بشكل صحيح، ولأجل ذلك فإن معلومات عن المسار الذي نريد عبوره ستستخدم كمرجع أثناء القيادة وذلك لحساب قيمة الخطأ في موضع العربة بالنسبة للمسار وتعديل حركة المقود بناء عليه، ويتم تحديد موقع العربة الحالي بالنسبة للمسار من خلال مستقبل GPS الذي يعطي معلومات عن المسار الذي تسلكه العربة.

سنعرف حلقتين من التحكم العائم لتحقيق عملية التحكم بالمقود وهما موضحتان في الشكل ٨:٢.



الشكل ٨:٢ نموذج تحكم بالمقود مؤلف من حلقتي تحكم عام

الحلقة الأولى Steering Position controller

مهمتها الرئيسية هي حساب زاوية تحريك المقود التي تؤمن تتبع صحيح للمسار المطلوب، ولهذه الطبقة دخلين وهما إشارة خطأ البعد الجانبي وإشارة الخطأ الزاوي الرأسي، واعتماداً على هاتين القيمتين يتم حساب قيمة محددة لزاوية الدوران. ويتم ذلك من خلال تعريف متغيرات عائمة تخضع لنظرية المجموعة العائمة وهما $error\ lateral$ و $angular\ error$ الهدف منهما تعويم إشارات الدخل التي ذكرناها سابقاً. كل من هذين المتغيرين يمكن تعبيران لغويان هما $left, right$ الهدف منهما الإشارة إلى المكان الذي تتوضع عليه العربة بالنسبة للمسار المرجعي وذلك لتحقيق تغطية لجميع الحالات المتوقعة للعربة. يعبر خرج هذه الطبقة عن زاوية المقود التي تتناسب مع موقع العربة الحالي ونشير إليه بمتغير عائم هو $Steering$ يملك تعبيران لغويان أيضاً $left, right$.

الحلقة الثانية Steering Torque controller

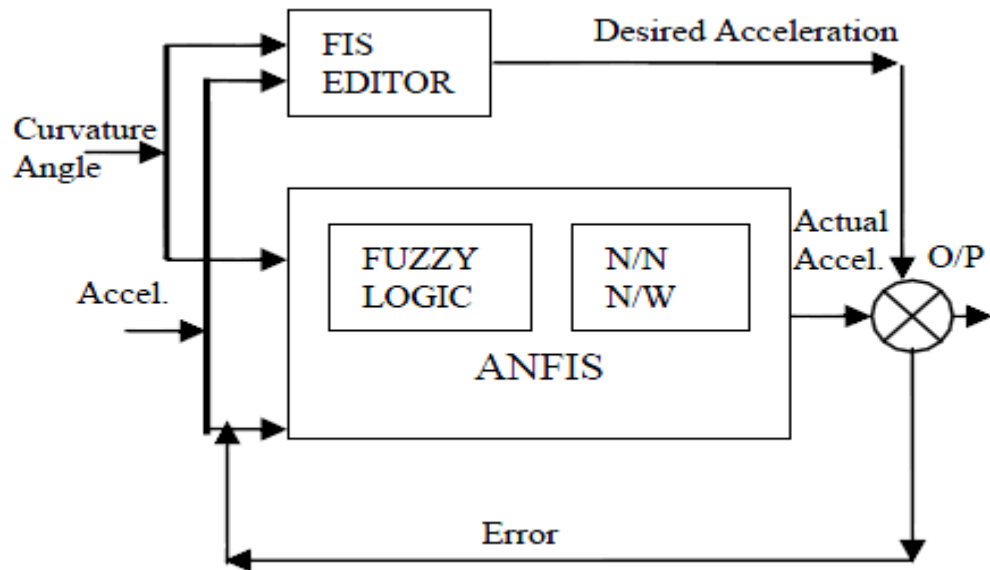
إن الهدف الرئيسي من هذه الطبقة هو توليد العزم الذي يتناسب مع الزاوية المقدمة من الطبقة الأولى وتطبيقه على عجلات القيادة وذلك لتوجيهها إلى الموقع الذي يحقق تتبع صحيح للمسار. يعود السبب في اختيار التحكم العائم كنمط أساسي في بناء هذه الطبقة بسبب شروط العمل حيث توجد عدة عوامل لا يمكن قياسها وتؤثر على نظام التحكم مثل متغير الضغط على حامل المقود $rack$ والذي يتأثر بسرعة العربة، لذلك في مثل هذه الحالات يتم التوجه إلى استخدام المتحكمات التي تعتمد في بنيتها على الذكاء الصناعي والتي تجعل سلوك التحكم يحاكي سلوك الإنسان البشري الذي لا يأخذ بالاعتبار القيم غير المقاسة أثناء اتخاذ القرار بل يعتمد على الوضع الانبي والقيم التي يدركها. تمتلك هذه الطبقة مدخلين المدخل لأول هو زاوية الهدف المتولدة من الطبقة الأولى والدخل الثاني هو الزاوية التي تعبر عن الموضع الحقيقي لعجلة القيادة في الوضع الحالي والفرق بين هاتين القيمتين يعطي قيمة زاوية الدوران المرغوبة. وخرج هذه الطبقة هو مقدار العزم الواجب تطبيقه على عجلة القيادة للوصول بها إلى قيمة زاوية الدوران المرغوبة وتحقيق تتبع صحيح للمسار.

٢,٨,٣ تطبيق المتحكم العصبوني العائم على نظم القيادة الذاتية:

عرضت الكثير من الأبحاث أهمية استخدام نمط التحكم العصبوني العائم في نظم القيادة الذاتية وسنقوم باستعراض البعض منها:

٢,٨,٣,١ التحكم الذكي في تعديل سرعة عربة باستخدام نمط التحكم العصبوني العائم:

ركز هذا العمل على بناء متحكم قادر على تعديل سرعة العربة بشكل متوافق مع المنعطف الذي تتجاوز به بشكل مشابه للإنسان، اعتمد في بناء هذا المتحكم على نظرية الدمج الهجين ما بين نمطين من أنماط الذكاء الصناعي وهما المنطق العائم والشبكات العصبونية في بنية جديدة تسمى ANFIS. وبعده عدة عمليات تدريب للمتحكم تم التوصل إلى متحكم يحقق تحكم صحيح بخطأ صغير ومقبول ليكون نموذجاً قابلاً للتطبيق.



الشكل ٩:٢ دورة تدريب متحكم الشبكات العصبونية

تم تطوير النظام السابق وبناء متحكم جديد وهو GenSoFNN، يختلف هذا المتحكم عن سابقه بأنه يستخدم تقنية جديدة لبناء توابع الانتماء وهي discrete incremental clustering (DIC)، التي تمكن الشبكة من بناء توابع الانتماء لها بشكل ذاتي وتم تجربة هذا المتحكم في تنظيم سرعة عربة تسير على طريق ذو عدة منعطفات وأعطت التجارب نتائج أفضل من نتائج السائق الانساني [4].

٩,٢ الخاتمة:

في المقارنة ما بين الاعمال السابقة نجد أن جميع المواضيع التي عُرضت اهتمت في تطبيق الذكاء الصناعي لتحقيق تحكم بالعربة بدرجات مختلفة، فالبعض منها ركز على التحكم التنبؤي لتحقيق التحكم بالسرعة الطولية للعربة والآخر ركز على التحكم التعويضي ليحقق التحكم العرضي بالعربة، ولكن لم نجد أي عمل قام بالدمج ما بين التحكم التنبؤي والتحكم التعويضي ضمن نموذج تحكم ذكي يحاكي السائق البشري. ولذلك كان التوجه في بحثنا الحالي إلى بناء متحكم يدمج ما بين التحكم التعويضي والتحكم التنبؤي في نموذج يحاكي نموذج السائق يعتمد في بنيته على المنطق العائم وعلى نظرية الدمج الهجين ما بين الشبكات العصبونية والمنطق العائم وسيتم التركيز في هذا البحث على عملية التحكم بالمقود فقط.

٣. الفصل الثالث: المنطق العائم ونظام الاستدلال العائم المتكيف عصبونياً ANFIS

١,٣ مقدمة:

يقدم المنطق العائم (Fuzzy Logic) الإطار العام لحل مشكلة تمثيل المعلومات التقريبية أو غير المحددة تماماً ويوفر الآلية اللازمة لاستخدام هذه المعلومات والمعارف. ظهرت فكرة المنطق العائم لأول مرة في عام ١٩٦٥ بواسطة العالم zade. ويركز المنطق العائم على الاستنتاج من خلال التعبيرات والألفاظ اللغوية غير المحددة مثل: طويل، قصير، شاب، كهل. تسمى هذه التعبيرات بالمتغيرات اللغوية (Linguistic variables) وتستخدم المتغيرات اللغوية في بناء المعارف في المنطق العائم حيث يعطى المتغير قيمة غير محددة فعلى سبيل المثال عندما يقال: الشاب طويل فإنه قد أعطي المتغير اللفظي (الشاب) القيمة (طويل)، وهي قيمة غير محددة تماماً في المنطق التقليدي (classical logic) ولكنها ذات معنى ضمن المنطق العائم. وعادةً ما يتم ربط المتغيرات في المنطق العائم لاستنتاج الحقائق مثال (إذا كانت الأرض زلقة خفف السرعة)، إن الجمل الشرطية المماثلة للبنية السابقة هي الأساس الذي يقوم عليه الاستدلال في المنطق العائم.

إن المتغير في المنطق التقليدي يأخذ إحدى القيمتين {1,0} أو بطريقة أخرى {T,F} أي {True-False} فإذا كانت على سبيل المثال المجموعة الشاملة X وأخذنا A كمجموعة جزئية منها فإن أي عنصر من عناصر المجموعة الشاملة إما أن ينتمي إلى A أو لا ينتمي. فعلى سبيل المثال إذا اعتبرنا مجموعة من الأشخاص كمجموعة شاملة X وأخذنا مجموعة جزئية هي الأطفال A وكمعيار لتحديد هذه المجموعة سنقول أن كل شخص عمره أصغر أو يساوي عشر سنوات هو طفل وينتمي لـ A. لنأخذ حالة الشخص الذي عمره عشر سنوات ويوم إن هذا الشخص لن ينتمي لمجموعة الأطفال وسيكون قد فقد طفولته فجأة. إن المثال السابق يوضح مدى قصور المنطق الكلاسيكي في التعبير عن الحقائق العامة بشكل جيد وهو أحد أهم الأسباب التي دفعت باتجاه المنطق العائم.

يقدم المنطق العائم حلاً مناسباً للمشكلة التي أوضحت سابقاً حيث أنه يجعل علاقة الانتماء علاقة متدرجة وبصيح المتغير ينتمي للمجموعة بدرجة تتراوح بين [1,0] بدلاً من حصرها بالقيمتين {1,0}. يساعد هذا التدرج في التعبير عن الحقائق الواقعية بشكل أفضل، فمثلاً الشخص الذي عمره ٦ سنوات ينتمي لمجموعة الأطفال بدرجة ٠,٩ أما الشخص الذي عمره ١٠ سنوات فينتمي بدرجة ٠,٤ والذي عمره ١٣ ينتمي بدرجة ٠,١.

حقق المنطق العائم تطورات كبيرة في شتى المجالات، فقد استخدمت مفاهيمه للتحكم بأول فرن للإسمنت في الدانمارك عام ١٩٧٥. وما لبث أن تبعتها منتجات عدة تتراوح بين آلات الغسيل وآلات التصوير فمكيفات الهواء الصناعية والمضخات وكذلك استخدم بشكل واسع في بناء الأنظمة الخبيرة خاصة في المجال الطبي. [26]

يقدم هذا الفصل فهماً معمقاً لمفهوم المنطق العائم والمجموعات العائمة والعمليات عليها، ومن ثم توضيح لبنية نظام الاستدلال العائم وأنواعه، وبعد ذلك تعريفاً بنظام الاستدلال العائم المتكيف عصبونياً وبنية وخوارزمية التعلم الخاصة به.

٢,٣ المميزات الأساسية للمنطق العائم:

يمتاز المنطق العائم بالعديد من الميزات التي جعلته مناسباً لكثير من التطبيقات العملية ونذكر منها:

كل نظام منطقي يمكن تمثيله بالمنطق العائم.

يتعامل بالمتغيرات اللغوية فيمكن تمثيل المعارف والحقائق باللغة المحكية وبسهولة.

سهولة الفهم والمرونة والسماحية في التعبير عن الحقائق.

يمكنه نمذجة النظم اللاخطية بسهولة.

يمكنه حل مشكلة الارتياح uncertainty.

يمكن استخدامه في مجال التحكم المتكيف والتحكم الإشرافي.

يمكن تصميم النظام ضمنه بالاعتماد على الخبرات البشرية دون الحاجة إلى دراسة وتمثيل رياضي [26].

٣,٣ المفاهيم الأساسية في المنطق العائم:

١,٣,٣ المجموعة التقليدية:

في المجموعة الكلاسيكية أو التقليدية يمكن لعنصر ما إما أن ينتمي للمجموعة و إما أنه لا ينتمي لها بتاتا. فلنعتبر مثلا المجموعة A و مجموعة U . إذا قمنا بتعريف التابع μ_A الذي يعطي لكل عنصر من عناصر المجموعة U درجة انتمائه إلى المجموعة A ، و ذلك عبر إعطائها الرقم ١ في صورة انتماء العنصر للمجموعة أي $\mu_A(x) = 1$ إذا كان عنصر المجموعة U أي العنصر x ينتمي للمجموعة A . أما إذا كان العنصر x لا ينتمي ل A فإن التابع μ_A يعطيه الرقم 0 أي

$$\mu_A(x) = 0 \quad [27,15]$$

٢,٣,٣ المجموعة العائمة

حسب تعريف العالم zade، في بحثه الشهير المنشور سنة ١٩٦٥، هي مجموعة من الكائنات التي تمتلك فيما متسلسلة و متدرجة لانتمائها الى تلك المجموعة، و تتميز العناصر المنتمية الى هذه المجموعات حسب نسبة انتمائها الى تلك المجموعات العائمة، وهذا يتم تحديده باستخدام تابع الانتماء أو تابع العضوية، ففي المجموعة العائمة يمكن لعنصر ما أن يكون منتمي إلى حد معين للمجموعة. لنأخذ مثالا: لنعتبر المجموعة A مجموعة درجات الحرارة التي تصنف كباردة (باردة بالنسبة للإنسان) و لنعتبر المجموعة U هي كل درجات الحرارة التي يمكن أن توجد في الكون مثلا ولنأخذ من المجموعة U العنصر $x = -100$ هذه درجة حرارة باردة جدا و لذلك فهي تنتمي تماما للمجموعة A أي $\mu_A(x) = 1$ أما إذا أخذنا درجة $x = +500$ فإن هذه الدرجة من الحرارة حارة جدا و لذلك العنصر x لا ينتمي أبدا إلى A . إلى الآن لم نخرج عن استعمالات المنطق الكلاسيكي أو التقليدي كما هو مبين أعلاه و لكن لنأخذ الآن درجة الحرارة ١٢ درجة أي $x = 12$. في المنطق التقليدي ليس لدينا إلا احتمالين إما أن x ينتمي أو أنه لا ينتمي ل A . في المنطق العائم يمكن أن نقول أن x ينتمي مثلا إلى درجة ٥٠% إلى A أي أن درجة حرارة ١٢ درجة هي نصف باردة نصف معتدلة مثلا أي $\mu_A(x) = 0.5$ [27,15].

٣,٣,٣ المتغيرات اللغوية *Linguistic variables*

تعتبر المتغيرات اللغوية جوهر أنظمة التحكم العائم فهي عبارة عن كلمات أو مصطلحات لغوية أكثر منها أرقام. حيث يتعامل المنطق العائم مع كلمات ومصطلحات اللغة الطبيعية، ويسمح بنمذجة هذه المصطلحات اللغوية كمتغيرات لغوية مما يفتح مجالاً واسعاً لاستخدام نظرية المنطق العائم في مجال التحكم والتطبيقات الأخرى. وهذه المتغيرات اللغوية تستخدم ضمن القواعد العائمة في نظم الاستدلال العائمة FIS، فالمتغير هو عبارة عن اسم مثل (درجة الحرارة - الضغط - المسافة - التدفق - السرعة - الخطأ.....) وتتضمن مجموعة المتغيرات قيم متدرجة أو عائمة مثلاً: مجموعة أعمار الناس هي مجموعة عائمة و التعابير (شاب، راشد، عجوز) هي مجموعة المتغيرات اللغوية الخاصة بهذه المجموعة. ويتم تحويل هذه المتغيرات إلى أرقام بواسطة توابع الانتماء. ومن الجدير بالذكر أن زيادة عدد المتغيرات اللغوية التي تصف نظام معين تزيد من مرونة المتحكم المصمم لهذا النظام. [28,18]

٤,٣,٣ توابع الانتماء *Membership Function*:

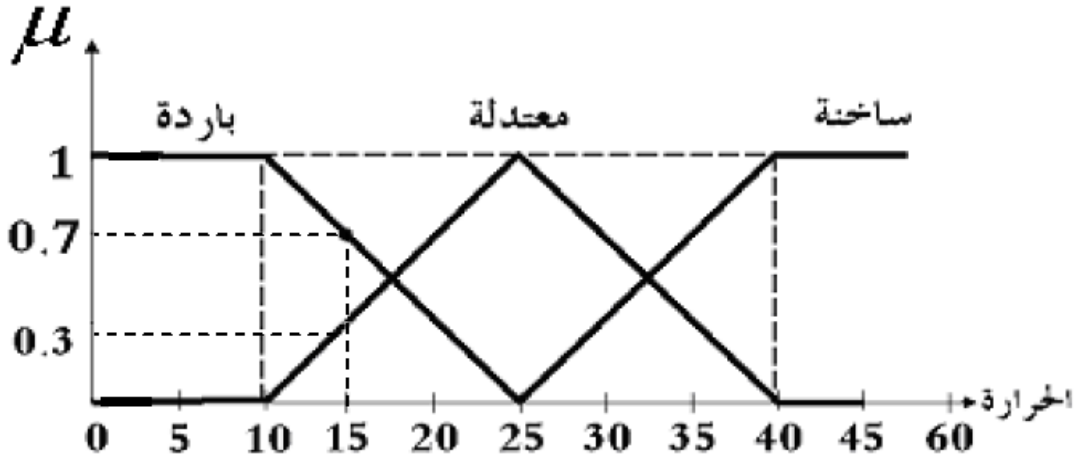
تُوصف المجموعة العائمة بتوابع انتمائها، حيث يشكل تابع الانتماء المدخل الرياضي لتعريف و تمثيل المتغيرات اللغوية ويرمز لتابع الانتماء ب $\mu_E(x)$:

حيث E : هو أحد قيم المتغير اللغوي الذي يرتبط بمجموعة عائمة.

x : هو عنصر ما من المجموعة الكلية .

μ : هو التابع الذي يربط كل عنصر بقيمة تنتمي للمجال $[0, 1]$ تدل على درجة انتمائه للمجموعة.

فمثلاً ليكن لدينا ثلاثة توابع انتماء لتمثيل درجة الحرارة وهي " باردة " و " معتدلة " و " ساخنة " الموضحة في الشكل ١:٣.



الشكل ١:٣ تمثيل درجة الانتماء

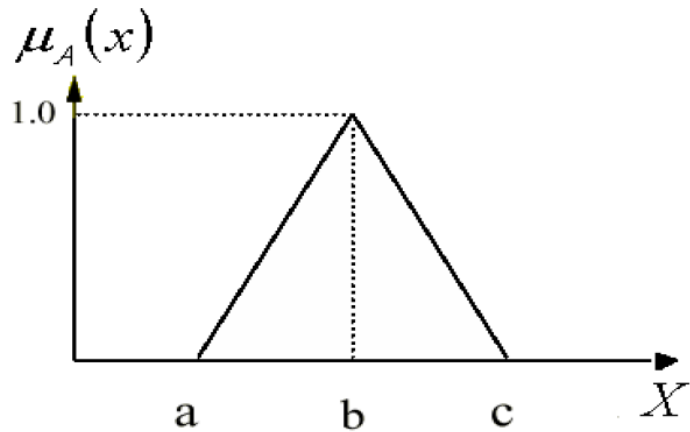
من خلال الشكل نلاحظ أنه إذا كانت درجة الحرارة 15 درجة مئوية فإنها تصنف على أنها باردة بدرجة انتماء 0.7، وفي نفس الوقت تصنف على أنها معتدلة بدرجة انتماء 0.3 وساخنة بدرجة انتماء صفر. أي بواسطة تطبيق توابع الانتماء يتم تحويل عناصر المجموعات العائمة إلى قيم معينة ضمن المجال [0, 1] وأما اختيار وتحديد حدود توابع الانتماء فهي متروكة لمصمم المتحكم العائِم ولزيادة دقة التحكم يكون من الضروري زيادة توابع الانتماء واختيار تقسيمات أكثر دقة. أما شكل تابع الانتماء فيمكن أن يكون أحادي البعد أو متعدد الأبعاد. حيث تُصمَّم توابع الانتماء بالاعتماد على عدة أمور كمقابلة الخبراء في الموضوع المطلوب التحكم به أو تشكيل التوابع آلياً من المعطيات ، وبالتالي يمكن أن تتواجد أشكال كثيرة لتوابع الانتماء ، ولا يزال شكل تابع الانتماء هو أحد المسائل المفتوحة للبحث ، وأهم توابع الانتماء التي يمكن استخدامها :

١,٤,٣,٣ تابع الانتماء المثلثي : *Triangular Membership Function*

يُعتبر الشكل المثلثي لتوابع الانتماء الأكثر شيوعاً، ويُحدد تابع الانتماء المثلثي بثلاث نقاط مميزة (a,b, c) مُوضحة في الشكل ٢:٣ بحيث يكون : $a < b < c$.

ويمكن أن يكون تابع الانتماء متناظراً أو غير متناظر ، و يُعبر عنه رياضياً :

$$(١.٣) \quad \text{Triangular}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases}$$

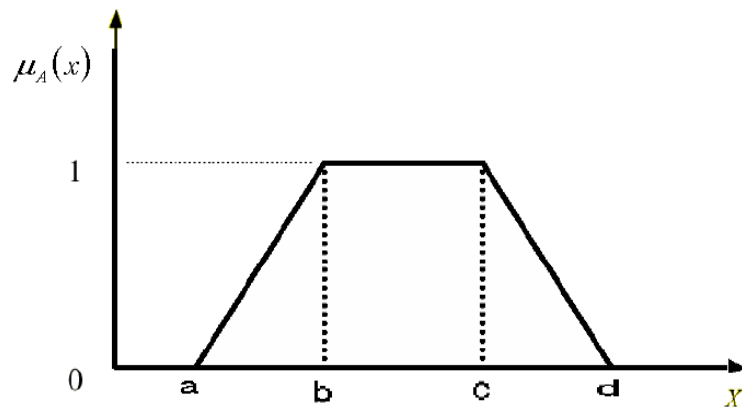


الشكل ٢:٣ تابع الانتماء المثلثي

٢,٤,٣,٣ تابع انتماء شبه المنحرف **Trapezoidal Membership Function**:

يُعطى هذا النوع من توابع الانتماء مجالات أوسع من النوع السابق ، حيث يُحدّد تابع انتماء شبه المنحرف بأربع نقاط أساسية (a , b , c , d) موضح في الشكل ٣:٣، ويُعبّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$(٢.٣) \quad \mu(x) = \text{Trapezoid}(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases}$$

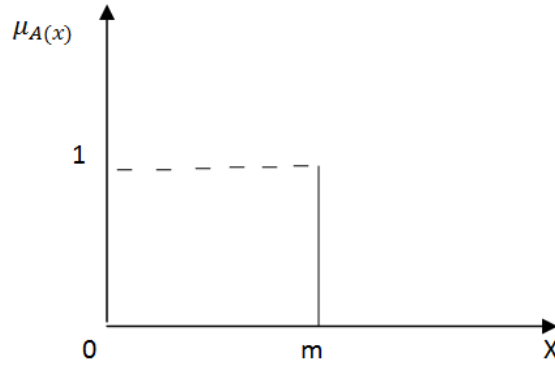


الشكل ٣:٣ تابع الانتماء ذو الشكل شبه المنحرف

٣,٤,٣,٣ تابع الانتماء ذو القيمة الوحيدة **Singleton Membership Function**:

إن تابع الانتماء ذو القيمة الوحيدة يأخذ القيمة 0 من أجل كامل المجال المدروس عدا قيمة واحدة m حيث تكون قيمته تساوي الواحد و رياضياً يُعبّر عنه بالعلاقة :

$$(٣.٣) \quad \text{SG}(X) = \begin{cases} 0 & x \neq m \\ 1 & x = m \end{cases}$$



الشكل ٤:٣ تابع الانتماء ذو القيمة الوحيدة

Gaussian Membership Function : ٤, ٤, ٣, ٣

يُحدد تابع الانتماء الغاوسي بالعلاقة التالية :

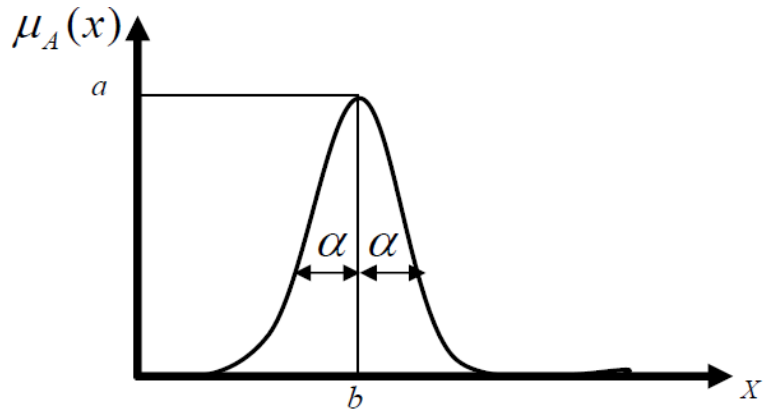
$$(٤.٣) \quad \mu(x) = \text{Gaussian} (x, b, \alpha) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2\alpha^2}}$$

حيث :

b : مركز تابع الانتماء (مكان القمة).

α : عرض مجال تابع الانتماء .

و الشكل ٥:٣ يُبين تابع الانتماء الغاوسي :



الشكل ٥:٣ تابع الانتماء الغاوسي

Sigmoidal Membership Function : ٥, ٤, ٣, ٣

يُعطى تابع انتماء السيغمويد بالعلاقة :

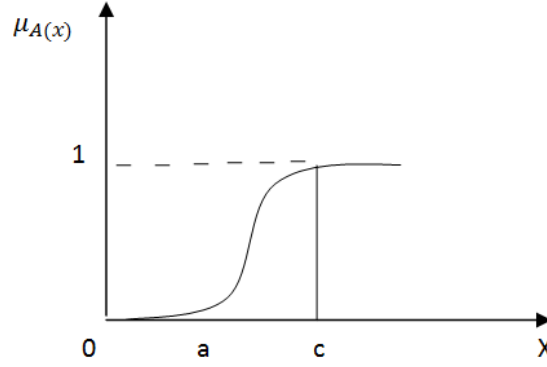
$$(٥.٣) \quad \text{Sig}(x, a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x-c)]}$$

حيث :

a : تتحكم بميل المنحني .

c : مركز تابع الانتماء (مكان القمة) .

و يُبين الشكل ٦:٣ تابع انتماء السيغمويد :



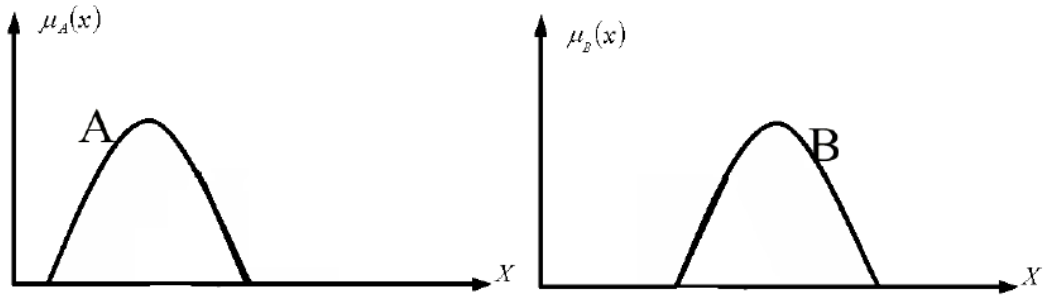
الشكل ٦:٣ تابع انتماء السيغمويد

تُعتبر توابع الانتماء المثلثية وتوابع الانتماء شبه المنحرف التوابع الأكثر استخداماً في المنطق العائم، و أما بالنسبة لاختيار تابع الانتماء لم يتم إيجاد صيغة أساسية لاختيار نوع تابع الانتماء، ويتم اختيار تابع الانتماء وفق موضوع البحث وتطبيقاته [28].

٥,٣,٣ العمليات على المجموعات العائمة *Operations on fuzzy sets*

كما ذكرنا سابقاً يُعتبر مفهوم المجموعة العائمة تعميماً لمفهوم المجموعة العادية، و وفقاً لذلك يُمكن تطبيق العمليات المستخدمة في المجموعة العادية على المجموعة العائمة مع الأخذ بعين الاعتبار أن المجموعة العائمة تتحدد بتابع انتمائها، لذلك فإن هذه العمليات ستُطبق على توابع الانتماء، بالاستعانة بالعلاقة الموجودة بين التابع الخاص لمجموعة عادية وتابع الانتماء للمجموعة العائمة يمكن أن نُعرّف أهم العمليات على المجموعة العائمة كالتالي :

لنفترض لدينا مجموعتان عائمتان A, B كما في الشكل ٧:٣:



الشكل ٧:٣ مجموعتان عائمتان

وتمثل المجموعتان A, B بالعلاقيتين التاليتين :

$$(٦.٣) \quad A = \{ (x, \mu_A(x)) : x \in X \}$$

$$(٧.٣) \quad B = \{ (x, \mu_B(x)) : x \in X \}$$

فالعمليات الأساسية التي تُطبَّق على هاتين المجموعتين هي :

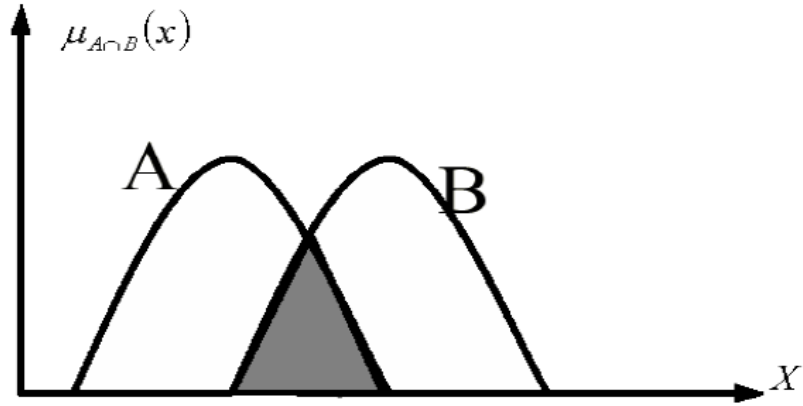
١,٥,٣,٣ عملية التقاطع *Intersection Operation*

إن تقاطع المجموعتين العائمتين $(A \cap B)$ هو مجموعة عائمة تابع انتمائها يُحدد بالعلاقة (٨,٣) :

$$A \cap B = \{ (x, \mu_{A \cap B}(x)) : x \in X \}$$

$$(٨.٣) \quad (\mu_{A \cap B}(x) = \{ \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} : x \in X \})$$

و تُعبّر عن التقاطع بلغة المنطق العائم بالعامل AND وتجدر الإشارة هنا أن العامل AND يمكن تفسيره بطرق مختلفة وليس فقط بطريقة min من هذه الطرق طريقة product، الشكل ٨:٣ يبيّن تقاطع مجموعتان عائمتان:



الشكل ٨:٣ التقاطع العائم

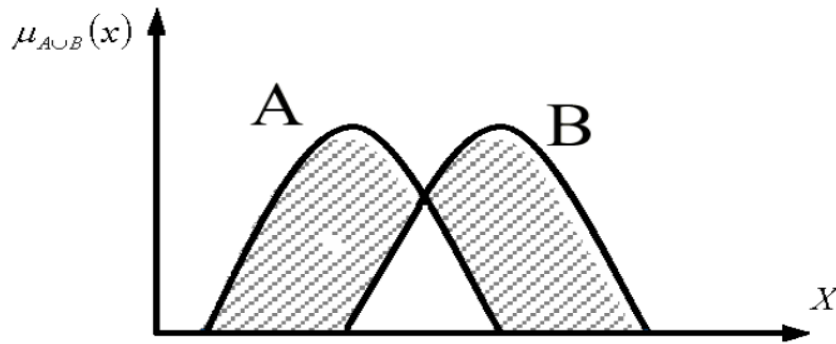
٢,٥,٣,٣ عملية الاجتماع Union Operation :

إن اجتماع المجموعتين العائمتين $(A \cup B)$ هو مجموعة عائمة تابع انتمائها يُحدد بالعلاقة (٩,٣):

$$A \cup B = \{(x, \mu_{A \cup B}(x)) : x \in X\}$$

$$(٩.٣) \quad \mu_{A \cup B}(x) = \{ \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} : x \in X \}$$

و تُعبّر عن الاجتماع بلغة المنطق العائم بالعامل OR والذي يمكن تفسيره أيضاً بطريقة sum وليس فقط بطريقة max الشكل ٩:٣ يبيّن اجتماع مجموعتان عائمتان :



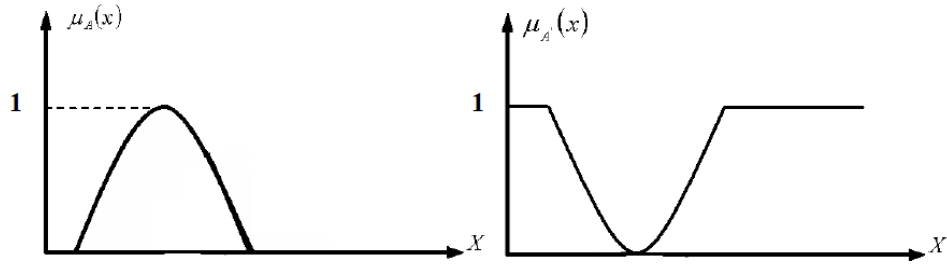
الشكل ٩:٣ الاجتماع العائم

٣,٥,٣,٣ متمم المجموعة العائمة fuzzy set Complement :

متمم المجموعة العائمة A هو مجموعة عائمة \bar{A} ويعرف تابع انتمائها كما يلي :

$$(١٠.٣) \quad \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad : x \in X$$

والشكل ١٠:٣ يوضح المجموعة العائمة A ومتمم هذه المجموعة \bar{A} :



الشكل ٣:١٠ المتمم العائِم

٣,٣,٥ التساوي Equality:

تتساوى المجموعتان العائِمَتان A , B إذا تساوى تابعا الانتماء لهما :

$$(١١.٣) \quad A = B \quad \text{if} \quad \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad : \forall x \in X$$

٣,٣,٥ الاحتواء Subsets:

نقول عن مجموعة A أنها محتواه في مجموعة أخرى B إذا كانت درجة انتماء أي عنصر x للمجموعة A أصغر من درجة انتمائه للمجموعة B .

$$(١٢.٣) \quad A \subseteq B \quad \text{if} \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad : \forall x \in X$$

٣,٣,٦ القواعد العائِمَة Fuzzy rule:

إن العلاقات العائِمَة التي تتكون بين مجموعتين عائِمَتين على الأقل تمكننا من فهم وصياغة المشكلة المطروحة فمثلاً لو وصف نظام تحكم ما يجب أولاً تحديد كيفية اعتماد خرج هذا النظام على دخله ، وهذا ما يُدعى بالقواعد العائِمَة فهي منهج تمثيل المعرفة التي تصدر عن نظم خبيرة أو عن خبراء إنسانيين ، تكون هذه القواعد وفق صيغة IF – THEN وتتكون القاعدة العائِمَة من جزأين ، يُطلق على الجزء الأول الشرط (condition) if والجزء الثاني نتيجة الشرط then (result) ويصف النتيجة التي يمكن استخلاصها إذا تحقق الشرط السابق ، وبالتالي تأخذ القواعد الصيغة التالية:

If (condition) THEN (result)

If C then R

مثال على ذلك قاعدة بسيطة : إذا كان (دخل الإنسان السنوي عالياً) فإنه يكون (غنياً)

IF (the annual income of a person is HIGH) THEN (the person is RICH)

واضح أن كلمة دخل عال هي صفة عائِمَة غير محددة بدقة، وقد تكون القاعدة مركبة مثل:

إذا (كانت درجة الحرارة متوسطة) و (درجة الرطوبة منخفضة) إذن (يعتبر الطقس معتدلاً).

٣,٣,٧ بنية نظام الاستدلال العائِم Fuzzy inference system structure:

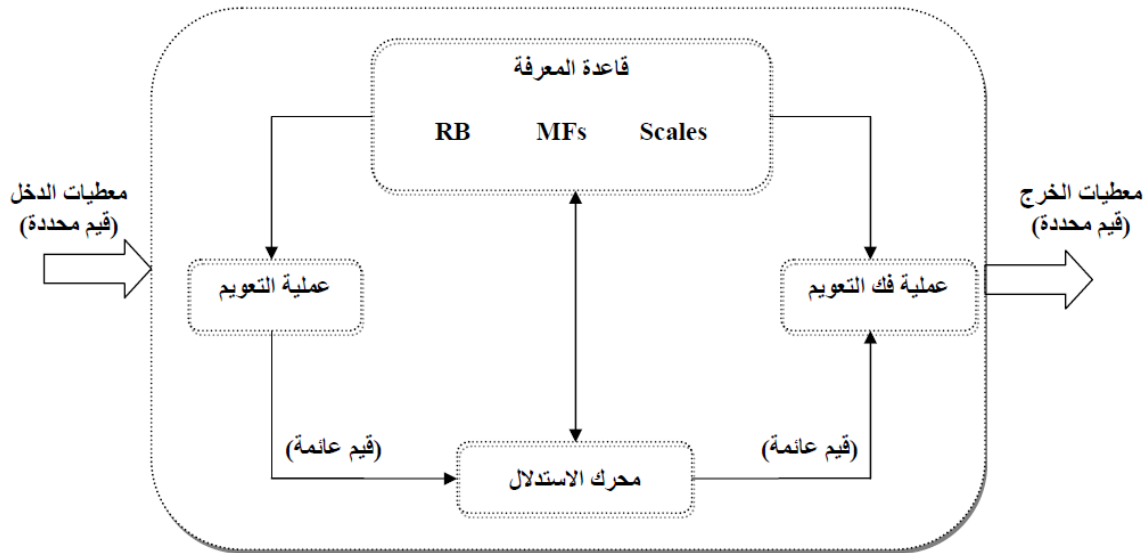
يتألف نظام الاستدلال العائِم بشكل عام من أربعة عناصر رئيسية مبينة في الشكل ٣:١١ وهي:

التعويم fuzzification

قاعدة المعرفة knowledge base

محرك الاستدلال inference engine

فك التعويم defuzzification



الشكل ١١:٣ مكونات نظام الاستدلال العائم

١,٧,٣,٣ عملية التعويم *Fuzzification*:

إن عملية الترميز العائم هي العملية التي تقوم بتحويل معطيات إشارات الدخل من قيم حقيقية (crisp values) إلى قيم عائمة (fuzzy values) والتي يتعامل معها المنطق العائم وذلك باستخدام تعابير لفظية خاصة بكل متحول وتمثل هذه التعابير مجموعات عائمة يتم تحديد عددها وتابع الانتماء لكل منها من قبل الخبير ، وتختلف المتغيرات اللغوية بحسب النظام المتحكم به وهذا ما يعطي التحكم العائم صفة المرونة والسهولة في التعامل .

وبالعودة إلى المثال المذكور سابقاً في الشكل ١:٣ تم استخدام ثلاث مجموعات عائمة للتعبير عن درجات الحرارة (وهي ساخنة، معتدلة، باردة)، ولتحويل القيمة الحقيقية لدرجة الحرارة 15 درجة مئوية إلى قيمة عائمة فإننا نأخذ درجة انتماء هذه القيمة لكل من المجموعات العائمة السابقة، وتوصلنا إلى أن هذه الدرجة من الحرارة باردة بدرجة 0.7 ومعتدلة بدرجة 0.3.

٢,٧,٣,٣ مجموعة القواعد *Rule Base*:

وظيفتها الأساسية تمثيل المعرفة الخبيرة، و تُعتبر القواعد العائمة جوهر أنظمة التحكم العائمة، و هي العلاقة التي تحكم بين إشارات دخل المتحكم العائم وإشارات خرج المتحكم، بشكل قواعد if-then:

If X is A then Y is B

حيث:

A, B : متغيرات لغوية يُعبّر عنها بمجموعات عائمة .

X, Y : يعبران عن الدخل والخرج للمتحكم العائم.

ويسمى الجزء الأول من القاعدة if X is A مقدمة القاعدة ومن الممكن وجود أكثر من شرط ضمن مقدمة القاعدة.

ويسمى الجزء الثاني من القاعدة then Y is B بنتيجة القاعدة.

٣,٧,٣,٣ محرك الاستدلال *inference engine*:

يعرف الاستدلال عموماً بأنه عملية استخراج نتيجة أو قرار ما بالاعتماد على معلومات أو حقائق معروفة مسبقاً، أما الاستدلال العائم فهو العملية الكاملة لاتخاذ القرارات باستخدام المنطق العائم بأسلوب مشابه للاستدلال البشري حيث يحتوي محرك الاستدلال على مجموعة من العلاقات المنطقية و التي تشبه أحياناً طريقة التفكير التي يستخدمها الإنسان، ويعتمد محرك الاستدلال على قاعدة المعرفة لاستخلاص النتائج منها حيث يقوم بتنشيط القواعد المناسبة وحساب درجات التحقق لكل شرط من شروط القواعد المستنتجة حيث تُحدّد درجة تحقق مقدمة القاعدة باستخدام (min أو product) في حال ربط مقدمات القواعد مع بعضها ب AND ، واستخدام (sum أو max) إذا كانت المقدمات مربوطة مع بعضها ب OR وبعد

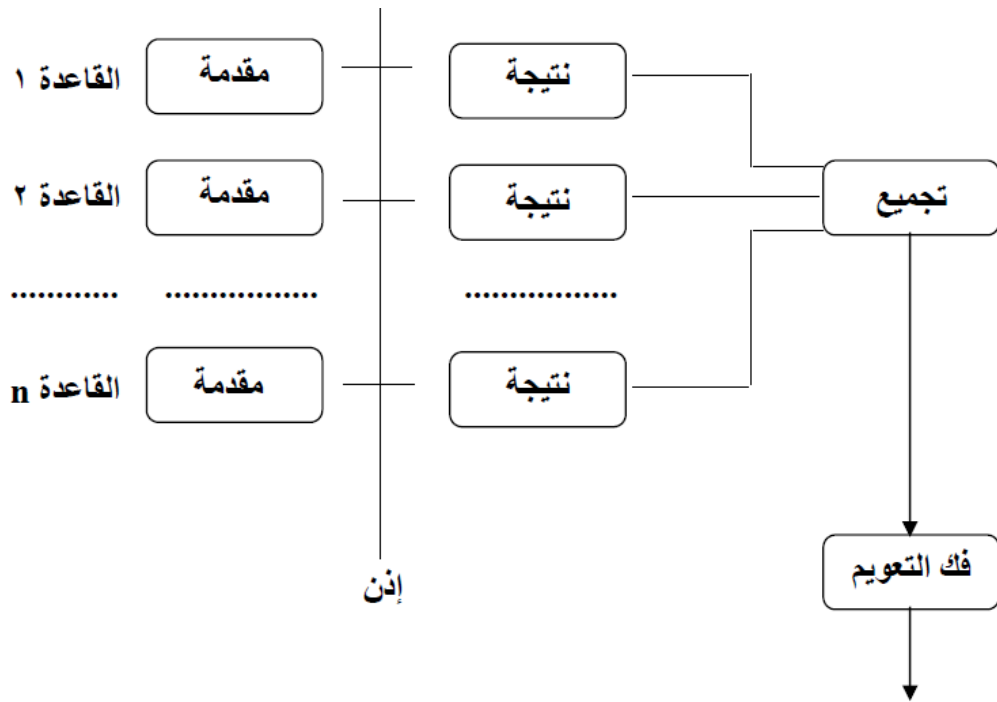
ذلك يتم تحديد نتيجة القاعدة النهائية باستخدام min أو product والتي تقابل ال then، وأخيراً تتم عملية التجميع والتي هي مراكمة للنتائج النشطة باستخدام max ، فمن أجل دخل معين للنظام العائم يمكن استخدام عدد من القواعد العائمة للحصول على الخرج النهائي للنظام ، كما هو مُبين في الشكل ١٢:٣ . وبالتالي يُعطى تابع الانتماء النهائي المستنتج من مجموعة قواعد عائمة على شكل تجمع عدد من توابع الانتماء المستخدمة في عملية الاستدلال أي:

$$\mu_A(x) = U_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \quad (١٣.٣)$$

حيث:

n : عدد توابع الانتماء.

أ: ترتيب توابع الانتماء.



الشكل ١٢:٣ مجموعة من القواعد المجمعة للحصول على الخرج النهائي

ويتوضح ذلك بشكل أمثلة في الشكلين ١٦:٣ و ١٧:٣ .

٤,٧,٣,٣ فك التعويم defuzzification:

عملية فك الترميز العائم هي عملية التحويل الثانية في المتحكم العائم والتي تقوم بتحويل إشارة الخرج العائمة (fuzzy-output) والتي هي إشارة خرج محرك الاستدلال العائم إلى إشارة خرج حقيقية (crisp output) وهي إشارة تحكمية تدخل المنظومة المراد التحكم بها، ويتم فك التعويم بعدة طرق:

- طريقة مركز الثقل (center of gravity method):

تُعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق المستخدمة لفك التعويم من حيث الدقة، وتُعطى قيمة الخرج الحقيقي بالعلاقة ١٤,٣:

$$x^* = \frac{\int_X x \cdot \mu_A(x) dx}{\int_X \mu_A(x) dx} \quad (١٤.٣)$$

حيث :

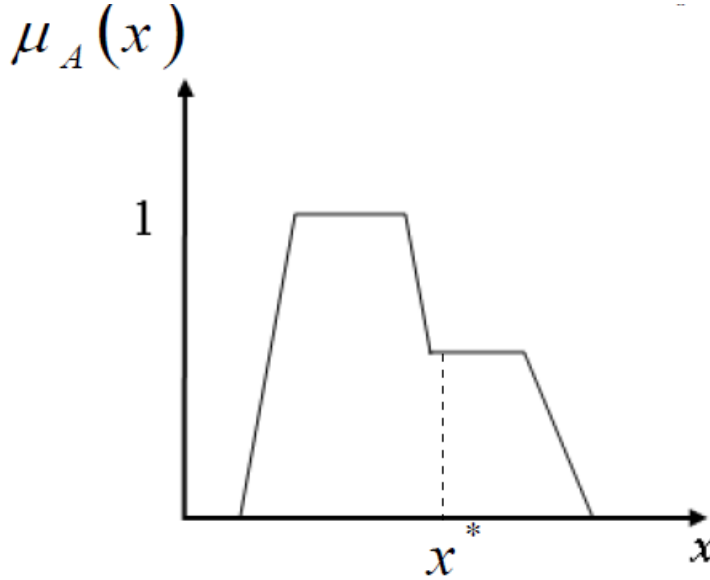
x^* : ناتج عملية فك التعويم (قيمة الخرج الرقمية).

x : متغير الخرج.

$\mu_A(x)$: تابع انتماء الخرج الناتج.

X : المجموعة الشاملة لقيم المتغير x .

ويُعبّر عن هذه الطريقة بالشكل ١٣:٣:



الشكل ١٣:٣ طريقة مركز الثقل لفك التعويم

ويوجد منها نسخة تحسب بشكل مجاميع بدلاً من التكامل ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة ١٥,٣:

$$(١٥.٣) \quad x^* = \frac{\sum_{l=1}^M x^l \cdot w^l}{\sum_{l=1}^M w^l}$$

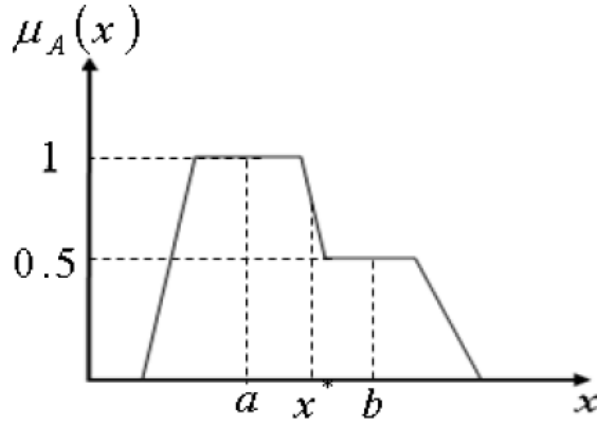
M : عدد المجموعات العائمة

l : رقم المجموعة العائمة.

x^l : مركز المجموعة العائمة.

w^l : ارتفاع المجموعة العائمة.

وتستخدم هذه الطريقة عندما تكون توابع الانتماء متماثلة، ولا يمكن استخدامها للتوابع غير المتماثلة، ويبيّن الشكل ١٤:٣ طريقة المركز الوسطي حيث a, b مراكز المجموعتين العائمتين و القيم $(1, 0.5)$ ارتفاع كل من المجموعتين العائمتين.



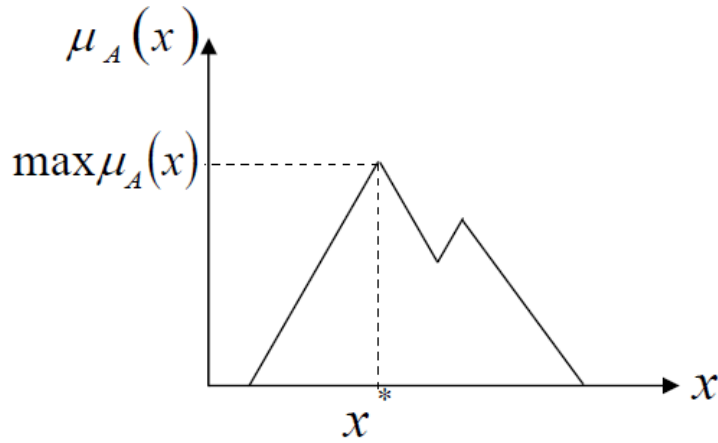
الشكل ١٤:٣ طريقة المركز الوسطي

- طريقة القيمة العظمى (maximum method) :

تُعطي هذه الطريقة قيمة الخرج الموافقة لأعظم قيمة تابع انتماء في الخرج $\mu_A(x)$ ، ويعبر عنها بالعلاقة ١٦,٣:

$$(١٦.٣) \quad \{x^* \in X : \mu_A(x^*) = \max \mu_A(x)\}$$

و الشكل ١٥:٣ يبيّن هذه الطريقة :



الشكل ١٥:٣ طريقة القيمة العظمى

وعند وجود مجموعة قيم لها نفس القيمة العظمى مثل حالة تابع الانتماء الذي له شكل شبه منحرف عندها نختار قيمة عظمى واحدة من هذه القيم وفق إحدى الطرق التالية:

- طريقة القيمة العظمى الأكبر (largest of maximum):

وفي هذه الطريقة نأخذ أكبر قيمة من القيم العظمى :

$$b = \max \{ \text{hgt} (A) \}$$

- طريقة القيمة العظمى الأصغر (smallest of maximum):

نختار في هذه الطريقة أصغر قيمة من القيم العظمى:

$$a = \min \{ \text{hgt} (A) \}$$

• طريقة متوسط القيمة العظمى (mean of maximum):

وهنا نحسب المتوسط الحسابي لمجموعة هذه القيم وفق العلاقة:

$$x^* = \frac{a + b}{2}$$

٣, ٣, ٨ أنواع أنظمة الاستدلال العائمة:

بحسب صياغة القواعد العائمة بمعنى اخر بسبب اختلاف عملية الاستدلال باختلاف صيغة هذه القواعد تقسم أنظمة التحكم إلى نوعين:

٣, ٣, ٨ نموذج مداني Mamdani:

قدم هذه النموذج العالم ابراهيم مداني في عام ١٩٧٥ في أثناء محاولته التحكم في محرك ومرجل بخاري من خلال تأليف مجموعة من قواعد التحكم اللغوية بالاعتماد على تراكم التجارب والخبرات البشرية في هذا المجال. ويتكون هذا النموذج من قواعد ذات شروط ونتائج رمزية ، وتبين المعادلة ٣, ١٧ الشكل العام للقاعدة العائمة :

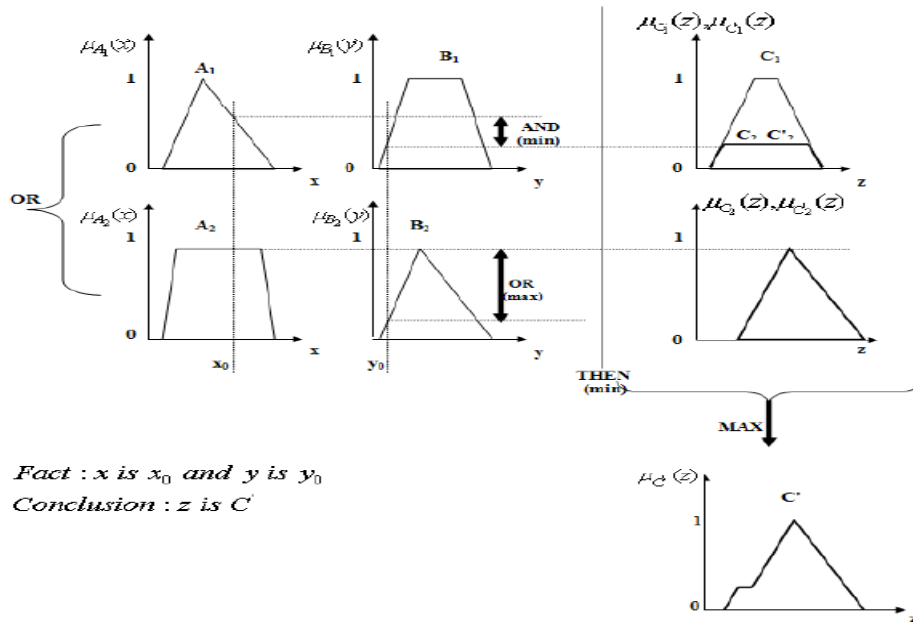
$$(١٧.٣) \quad \text{IF (x is A) AND (y is B) THEN (z is C)}$$

حيث:

A,B,C: مجموعات عائمة .

X,Y,Z: متغيرات لغوية .

ويبين الشكل ٣:١٦ عملية الاستدلال العائم باستخدام نموذج مداني:



الشكل ٣:١٦ نموذج مداني للاستدلال العائم

٣, ٣, ٢ نموذج تاكاجي سوجينو Takagi-Sugeno

وهو أحد أنواع الأنظمة العائمة التابعة والتي يكون شكل القاعدة فيها كما يلي:

$$(١٨.٣) \quad \text{IF } (x_1 \text{ is } A) \text{ AND } (x_2 \text{ is } B) \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } C) \text{ THEN } z = g(x)$$

حيث $g(x)$ تابع معين نستخدمه حسب التطبيق ، ومن هنا جاء اسم الأنظمة العائمة التابعة ، ويمكن للتابع $g(x)$ أن يأخذ أي شكل من أشكال التتابع كما ويمكن أن يختلف التابع بين قاعدة وأخرى ، فمثلاً من أجل نظام سوجينو من الدرجة الأولى تكون الصيغة كما يلي :

$$(19.3) \quad z = g(x) = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n$$

ومن أجل نظام سوجينو من الدرجة صفر الصيغة :

$$(20.3) \quad z = g(x) = C$$

و تأخذ القاعدة العائمة فيها الصيغة العامة المبينة في المعادلة ٢١,٣ :

$$(21.3) \quad \text{IF } (x_1 \text{ is } A) \text{ AND } (x_2 \text{ is } B) \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } C) \text{ THEN } (Z = c_0 + c_1 x_1 + \dots + c_n x_n)$$

A, B, C : مجموعات عائمة .

Z: خرج النظام من أجل قاعدة ما .

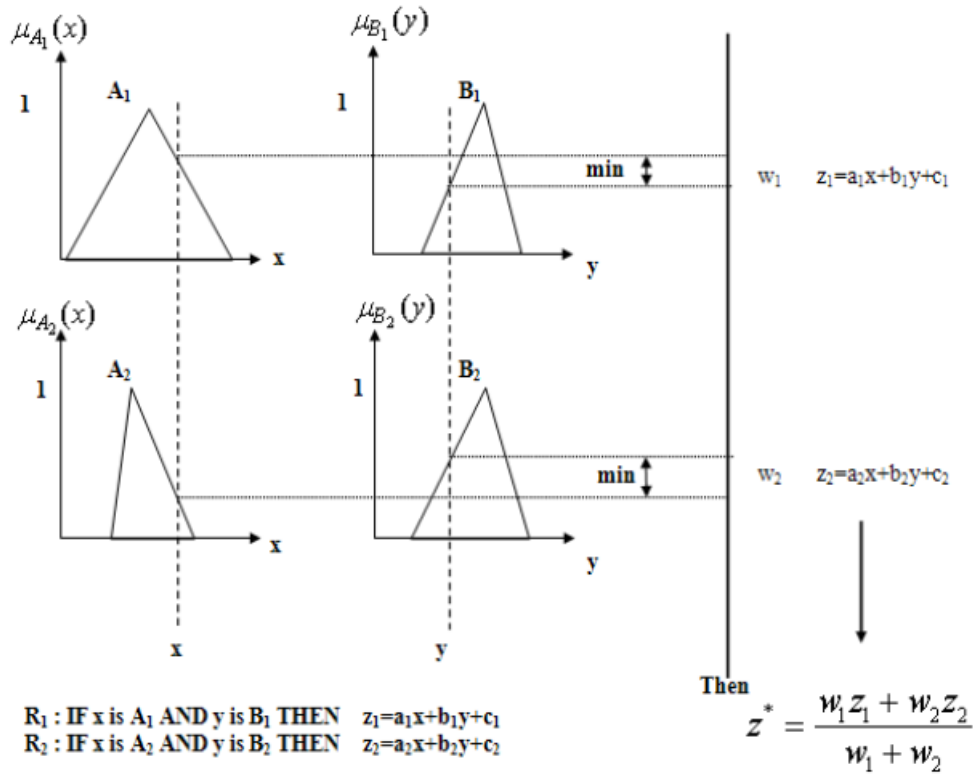
c_i : بارامترات ذات قيم حقيقية .

وتُعطى النتيجة النهائية للاستدلال العائم وفق هذا النموذج بالعلاقة ٢٢,٣ :

$$(22.3) \quad Z^* = \frac{\sum_{l=1}^m W_l Z_l}{\sum_{l=1}^m W_l}$$

حيث W_l : مستوى الخرج لكل قاعدة عائمة .

ويُبين الشكل ١٧:٣ الاستدلال العائم باستخدام نموذج تاكاجي سوجينو :



الشكل ١٧:٣ نموذج تاكاجي سوجينو للاستدلال العائم

مما سبق نجد أن الاختلاف بين النموذجين السابقين يكمن في طريقة الحصول على الخرج الحقيقي فنموذج Mamdani يستخدم توابع انتماء للخرج بينما في نموذج TS لا يوجد توابع انتماء للخرج، كما ويتميز نموذج TS باستخدامه مع الشبكات العصبونية والخوارزميات الجينية والتقنيات المتكيفة الأخرى والتي تتم فيها عمليات التكيف، وهو النوع المستخدم في المتحكم العائِم المصمم في هذه الدراسة.

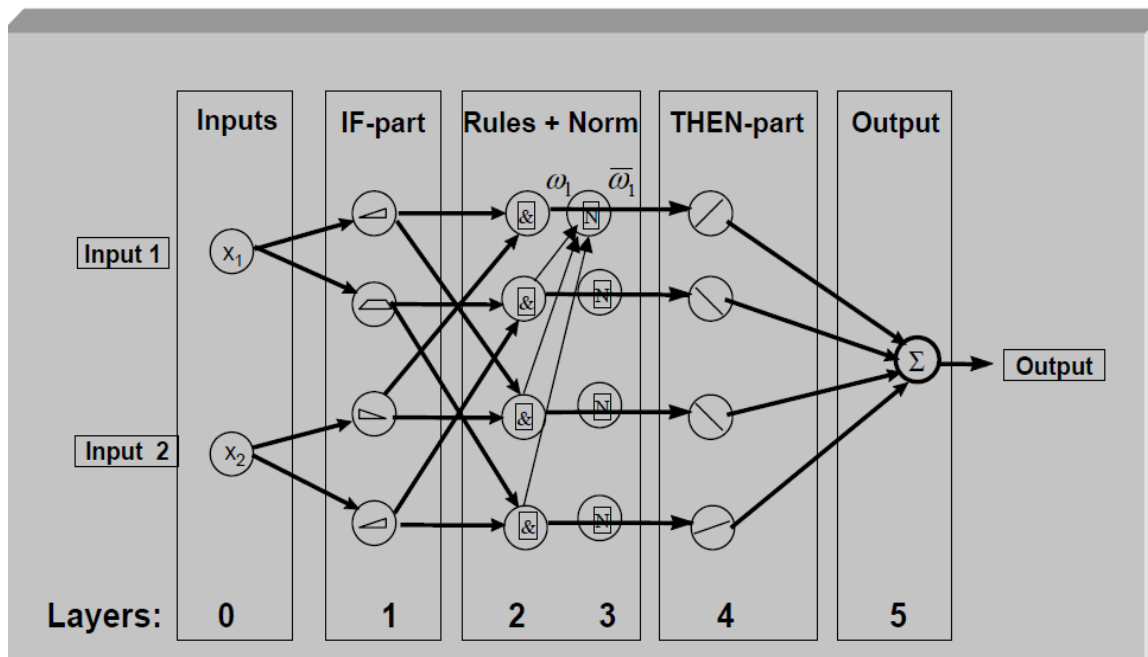
٤,٣ نظام الاستدلال العائِم المتكَيِّف عصيونياً Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System:

كما أوردنا سابقاً فإن نظام الاستدلال العائِم قد ساعد في حل المشكلات المرتبطة بالنظم التي يصعب نمذجتها رياضياً والنظم التي تحتوي على عدم تأكيد (uncertainty)، حيث أن النظام العائِم يوظف قواعد من الشكل (if ..then..) لنمذجة الجانب النوعي لمعرفة الإنسان وعمليات الاستدلال التي يقوم بها، وذلك يتم دون أي توظيف للتحليل الكمي الدقيق. بالرغم من الميزات الرائعة التي يتميز بها نظام الاستدلال العائِم إلا أنه يوجد العديد من نقاط الضعف التي تحد من استخدامه في بعض التطبيقات ونوجز بعض تلك النقاط فيما يلي:

- لا يوجد طريقة معيارية لنقل معرفة وخبرات الإنسان إلى مجموعة من القواعد والبيانات في نظام الاستدلال العائِم.
 - في حال تم نقل تلك المعارف والخبرات، فإننا سنبقى بحاجة إلى طريقة فاعلة لضبط مجالات توابع الانتماء من أجل تحسين الأداء وتقليل الخطأ.
- وللتغلب على تلك الصعوبات تم تقديم نظام ANFIS بواسطة (Jyh-Shing Roger jang) عام ١٩٩٣، حيث قدم نظام استدلال عائِم من نوع سوجينو يمتاز بقدرته على تكيف متغيرات توابع الانتماء لكل من الدخل والخرج بواسطة التعلم الآلي، وكذلك يمكننا اعتبار ANFIS شبكة عصبونية مكافئة وظيفياً لنظام استدلال عائِم. [28,29,21]

١,٤,٣ بنية نظام الاستدلال العائِم المتكَيِّف عصيونياً ANFIS structure:

يمكن تمثيل بنية ANFIS بشبكة عصبونية مؤلفة من خمس طبقات، البنية العامة لها موضحة في الشكل ١٨:٣:



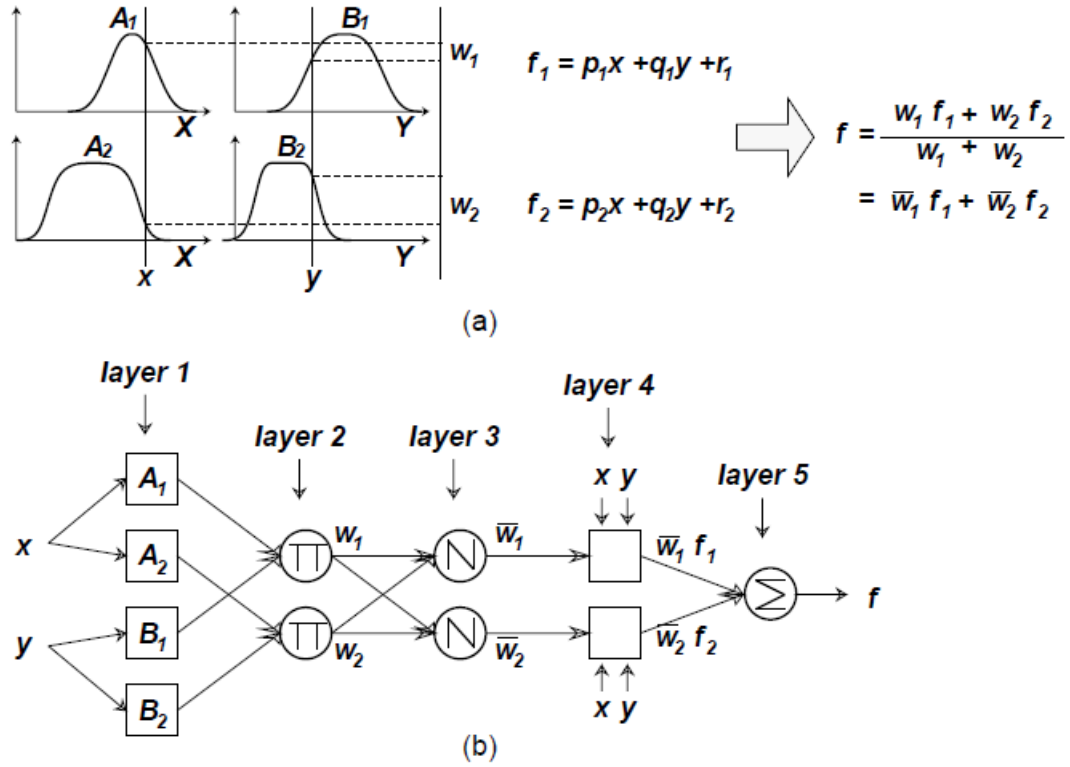
الشكل ١٨:٣ البنية العامة لنظام الاستدلال العائِم المتكَيِّف عصيونياً

وسيتم توضيح هذه البنية من خلال مثال بسيط، بفرض أنه لدينا نظام ANFIS بمدخلين X و Y و بمخرج وحيد Z وليكن لدينا قاعدتين ضمن هذا النظام وهما:

$$\text{rule1: If } X \text{ is } A_1 \text{ and } Y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1X + q_1Y + r_1$$

$$\text{rule2: If } X \text{ is } A_2 \text{ and } Y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = p_2X + q_2Y + r_2$$

سيتم مكافئة بنية نظام الاستدلال العائم التقليدية بالبنية الخماسية لـ ANFIS كما في الشكل ١٩:٣.



الشكل ١٩:٣ مكافئة بنية نظام الاستدلال العائم ببنية ANFIS

كما نلاحظ من الشكل فإنه يوجد عقد مربعة وأخرى دائرية، إن المربع يرمز إلى أن العقدة متكيفة في حين ترمز الدائرة إلى أن العقدة ثابتة [32,25,24].

وفيما يلي توضيح لكل طبقة من الطبقات الخمس:

الطبقة الأولى (If-part):

جميع العقد في هذه الطبقة تمثل بمربعات (متكيفة) وهي تمثل توابع الانتماء لدخل النظام وتكون توابع التفعيل لكل عقدة منها من الشكل:

$$(٢٣.٣) \quad O_i^1 = \mu_{A_i}(X)$$

حيث X هو دخل العقدة و A_i هو المتحول اللفظي المرتبط بتابع الانتماء لهذه العقدة.

إن عدد العقد في هذه الطبقة يساوي عدد توابع انتماء الدخل الكلي. ويشار إلى متغيرات هذه الطبقة باسم متغيرات المقدمة المنطقية (Premise parameters).

الطبقة الثانية (Rules):

تكون العقد في هذه الطبقة دائرية (ثابتة) ويرمز لها بـ Π

وظيفة هذه العقد هو القيام بعملية جداء لقيم مدخلاتها كما يلي:

$$(٢٤.٣) \quad W_i = \mu_{A_i}(X) \mu_{B_i}(Y)$$

ويمثل خرج هذه الطبقة مقدار تفعيل المقدمة المنطقية للقاعدة (firing strength)، وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن استخدام أي عملية مناسبة للتعبير عن المعامل المنطقي AND في هذه الطبقة مثل Minimum.

الطبقة الثالثة (Norm):

في هذه الطبقة تكون العقد دائرية (ثابتة) ويرمز لها بـ N وتقوم العقدة i بحساب نسبة تفعيل القاعدة i (Normalized-firing strengths) إلى مجموع نسب تفعيل باقي القواعد كما يلي:

$$(25.3) \quad \overline{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} ; i = 1, 2.$$

الطبقة الرابعة (Then-part):

تكون العقد في هذه الطبقة مربعة (متكيفة) ويكون تابع التفعيل لها من الشكل:

$$(26.3) \quad O_i^4 = \overline{W}_i f_i = \overline{W}_i (p_i X + q_i Y + r_i)$$

حيث \overline{W}_i هو خرج الطبقة الثالثة و f_i هو التابع i من توابع الخرج ويرمز لمتغيراتها باسم متغيرات النتيجة المنطقية (consequent parameters).

الطبقة الخامسة (Output):

تتألف من عقدة وحيدة دائرية (ثابتة) ويرمز لها بـ Σ ووظيفتها حساب الخرج كمتوسط موزون لقيم مخارج القواعد المنطقية كما في العلاقة:

$$(27.3) \quad O_1^5 = \sum_i \overline{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i}$$

٢, ٤, ٣ خوارزميات التعلم الآلي المستخدمة في تدريب ANFIS:

يتمتع نظام ANFIS بقابلية التعلم الذاتي من أزواج بيانات دخل خرج، وهذه القابلية تعني وجود خوارزميات تعلم آلي مسؤولة عن تدريبه وضبط بارامتراتة لكي يعطي أفضل أداء ممكن.

يمكن تدريب ANFIS ضمن بيئة MATLAB وفق إحدى خوارزميتين، وهما إما الانتشار الخلفي كما في شبكات الانتشار الخلفي العصيونية (Back propagation) أو خوارزمية تعلم هجينة (hybrid) والجدول (٣-١) يلخص مرحلتي التدريب ضمن الخوارزمية الهجينة. [32,33,25]

جدول ١.٣ توضيح مرحلتي التدريب ضمن الخوارزمية الهجينة

	Forward Pass	Backward Pass
Premise Parameters	Fixed	Gradient Descent
Consequent Parameters	Least-squares estimator	Fixed
Signals	Node outputs	Error signals

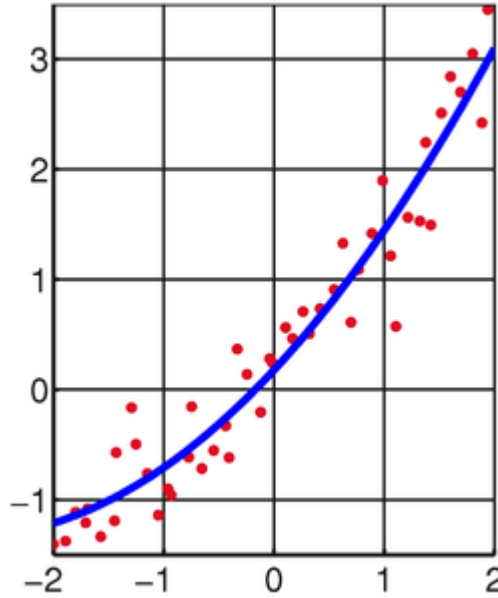
١, ٢, ٤, ٣ طريقة المربعات الأصغرية (Least Squares Method):

هي طريقة إحصائية تهدف إلى إيجاد أفضل منحنى من مجموعة النقاط التجريبية بهدف تقليل مجموع الانحرافات الرئيسية أو الأخطاء الواردة في هذا المنحنى، أي يتم التقليل من مجموع مربعات الفروق بين القيم الفعلية والقيم المحسوبة. ويمكن القول أيضاً أنها طريقة تقريب قياسية تستخدم لحل أنظمة المعادلات التي يكون فيها عدد المعادلات أكبر من عدد المتغيرات. وتعنى هذه الطريقة بتصغير قيمة مجموع مربعات الخطأ الناتج عن حل كل معادلة.

من أهم التطبيقات هو الإسقاط الشكلي للبيانات (data fitting) حيث أن أفضل إسقاط شكلي لمجموعة بيانات يتجه نحو تصغير مجموع مربعات الأخطاء، حيث أن الخطأ هو الفرق بين القيمة المقاسة للبيانات والقيمة المسقطة كما في

الشكل ٢٠:٣. تم وصف مسألة المربعات الأصغرية للمرة الأولى من قبل كارل غاوس حوالي عام ١٧٩٤. [32].

يستفاد من ميزة الإسقاط الشكلي للبيانات بشكل واسع في تدريب الشبكات العصبونية للحصول على أفضل قيم للأوزان، وهذه القيم هي القيم التي ستعطي مجموع مربعات خطأ أصغري. نفس المبدأ يطبق عند تدريب نظام ANFIS حيث أنه يتم ضبط البارامترات بحيث تعطي أقل مجموع مربعات خطأ.



الشكل ٢٠:٣ نتيجة الإسقاط الشكلي لمجموعة نقاط على تابع من الدرجة الثانية

٢,٢,٤,٣ خوارزمية الانتشار الخلفي *Back propagation Algorithm*:

تعد من أشهر طرائق تعليم الشبكات العصبونية التي تؤمن نقلاً للمعلومات بالانتشار المعاكس للاتجاه الأصلي لقدم المعلومات. تعتمد هذه الطريقة على مبدأ التعليم الموجه وتحتاج في مرحلة التدريب إلى بيانات خاصة تتعلم بها الشبكة حيث تقدم لها بيانات دخل (input) مع بيانات الخرج (output) المرغوب، ومن ثم تقوم الشبكة بعملية انتشار أمامي (feed-forward) لبيانات الدخل للحصول على قيمة خرج الشبكة بعدها تقوم بالمقارنة بين الخرج المحسوب والخرج المرغوب، فإذا لم تتطابق النتائج تقوم الشبكة بحساب قيمة الفرق بينهما لكل عصبون من طبقة الخرج والذي يمثل قيمة الخطأ (error)، بعدها تأتي مرحلة الانتشار الخلفي للخطأ (error back propagation) حيث تعيد الشبكة حساب قيمة الخطأ إلى كل عصبون من الطبقات الخفية. في النهاية تأتي مرحلة تحديث قيمة الأوزان (weight update) حيث تقوم الشبكة بإعادة حساب كل الأوزان وتعويضها بالقيم الجديدة المحسوبة.

يشترط في الانتشار الخلفي أن تكون توابع التفعيل التي تستعملها العصبونات قابلة للاشتقاق. ذلك لأنه في مرحلة تحديث الأوزان يستعمل التابع المشتق لتوابع التفعيل في حساب القيم الجديدة. ويمكن تقسيم مراحل التعليم التي تعتمد عليها الشبكة إلى مرحلتين:

المرحلة الأولى: الانتشار

مع كل عينة من بيانات الدخل يجب أن يتم:

- تغذية أمامية للشبكة بعينة بيانات الدخل (input) لحساب بيانات الخرج (output) ومن ثم يتم مقارنة النتائج المحصل عليها مع النتائج المرغوبة ويتم حساب الفرق الذي يمثل قيمة الخطأ (error).
- تغذية خلفية حيث يتم حساب قيمة الخطأ في كل عصبون ينتمي للطبقات الخفية.

المرحلة الثانية: تحديث قيم الأوزان

إن خوارزمية الانتشار العكسي القياسية هي خوارزمية الانحدار التدريجي gradient descent algorithm والتي تسمح لأوزان الشبكة أن تتحرك على الجانب السلبي من تابع الأداء، حيث يتم إعادة انتشار الإشارة من الخرج إلى الدخل بشكل عكسي، ويتم خلالها ضبط أوزان الشبكة، ويمكن تمثيل الخوارزمية لتكرار واحد كما يلي:

$$(28.3) \quad X_{k+1} = X_k - \alpha_k * g_k$$

حيث X_k : شعاع الأوزان و الانحيازات الحالية

α_k : معدل التعلم

g_k : الميل الحالي

وهناك طريقتان لحساب الانحدار التدريجي:

أولاً: النمط التزايدى (Incremental mode)

يتم وفق هذه الطريقة حساب الميل ومن ثم تعديل الأوزان بعد كل دخل يعطى للشبكة.

ثانياً: نمط الدفعة الواحدة (Batch mode)

وفق هذا النمط تزود الشبكة بكل أشعة الدخل قبل القيام بعملية تحديث الأوزان وبالتالي يمكن أن نقول أن الأوزان وعتبات التنفيعل في هذه الطريقة تعدل بعد تزويد الشبكة بكامل مجموعة التدريب حيث أن الميول المحسوبة في كل مثال تدريبي تضاف لبعضها البعض لتحديد التغيرات في الأوزان والإنحيازات.

إن نفس مفهوم الانتشار الخلفي السابق يستخدم ولكن لتعديل متغيرات توابع الانتماء لدخل نظام ANFIS (primes parameters) بدلاً من تعديل الأوزان والإنحيازات. [28,29]

٥,٣ الخاتمة:

تم خلال هذا الفصل توضيح مفهوم المنطق العائم والمجموعات العائمة والعمليات عليها، وشرح بنية نظام الاستدلال العائم وأنواعه، وتعريف نظام الاستدلال العائم المتكيف عصيونياً وبنيته وخوارزمية التعلم الخاصة به.

٤. الفصل الرابع حل مسألة التحكم بالمقود باستخدام المنطق العائم والشبكات العصبونية

سنعرض في هذا الفصل مقدمة عن بيئة العمل PARTAGE التي تم بناء نموذج التحكم عليها ومن ثم سنتطرق إلى طريقة تصميم المتحكمات اللازمة لإتمام عملية التحكم بالمقود باستخدام المنطق العائم والشبكات العصبونية وتطبيقها ضمن المحاكى PARTAGE، وسنعمد في بنية التصميم على البنية العامة المشابهة لنموذج السائق. سنناقش الهدف الأساسي من كل متحكم والسبب الرئيسي الذي دفعنا لاختيار المنطق العائم كبنية أساسية للمتحكم الأول ومتحكم الشبكات العصبونية العائمة ANFIS كبنية أساسية للمتحكم الثاني. سنوضح طريقة بناء المتحكم الأول والذي سنطلق عليه متحكم الموضع والمتحكم الثاني الذي سنطلق عليه متحكم العزم. وفي النهاية سنقوم بربط المتحكمين معاً والقيام بالإجراء التجريبي لهما ومقارنة النتائج التي سيتم الوصول إليها مع نموذج السائق الموجود مسبقاً في المحاكى.

١,٤ مقدمة:

تم العمل في هذا البحث بالاعتماد على المحاكى PARTAGE والذي تم تصميمه على برنامج الماتلاب من قبل IRCCyN في فرنسا، يهدف هذا المحاكى إلى إجراء محاكاة لنموذج التحكم بالعربة وقد تم التركيز فيه على موضوع التحكم بالمقود حيث تم بناء عدة نماذج للتحكم بالمقود ضمنه وتجربتها. وقد أثبتت فعاليتها و تم توثيق ذلك في عدة مقالات علمية [5,6]

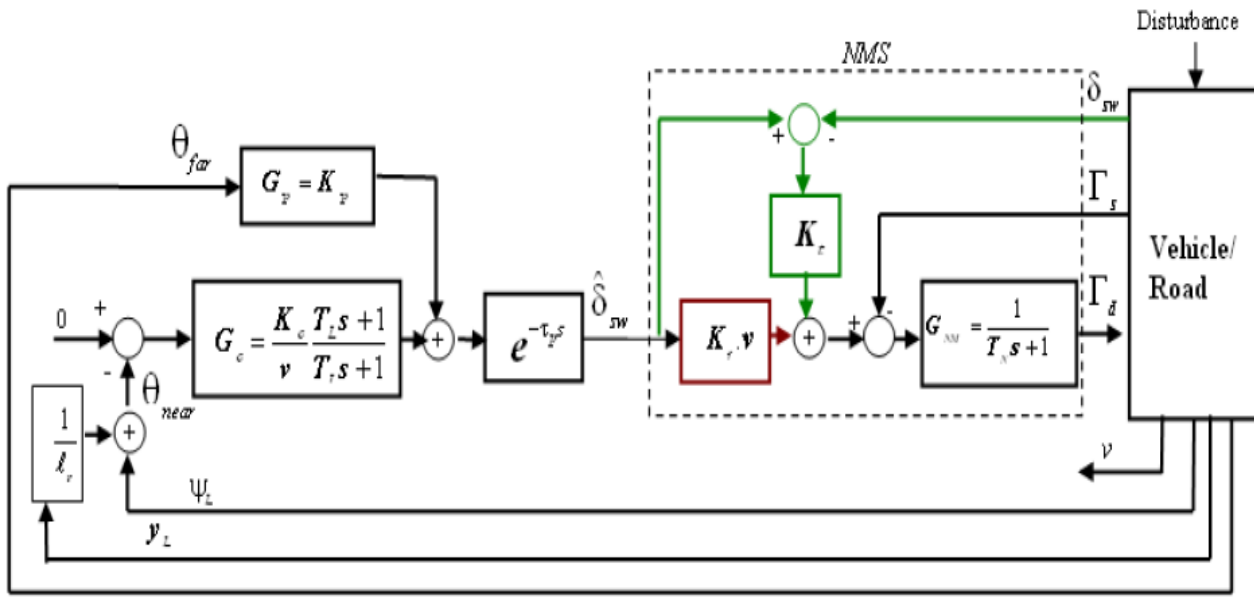
نماذج للتحكم بالمقود وتجربتها. أثبتت هذا المحاكى فعاليتها وقد تم توثيق ذلك في عدة مقالات علمية [5,6].

١,١,٤ توصيف لبنية المحاكى:

- ان بنية هذا المحاكى هي مماثلة للبنية الموضحة في الشكل ٢:٤ حيث يتضح أنها مؤلفة من أربع كتل أساسية وهي:
- كتلة التحكم بالمقود والتي ترتبط بشكل مباشر بكل من نموذج السائق والنموذج الديناميكي للعربة الهدف منها هو توليد زاوية الدوران الواجب تحريك المقود بها بناء على كل من قيمة العزم المطبق من السائق والعزم المرتجع من العربة
 - كتلة النموذج الديناميكي للعربة والتي ترتبط بشكل مباشر بكتلة التحكم بالمقود وكتلة الادراك الحسي والتموضع على الطريق.
 - كتلة الادراك الحسي والتموضع على الطريق وهي ترتبط مع كل من نموذج السائق والنموذج الديناميكي للعربة، بالإضافة إلى أنها تملك قاعدة بيانات مسبقة مخزنه فيها عن الطريق الذي تسير عليه، والهدف من هذه الكتلة هي تأمين القيم التي يحتاجها السائق عملياً عندما يقوم بقيادة العربة وهي القيم التي تحدثنا عنها سابقاً الزاوية القريبة والزاوية البعيدة لتحقيق عملية تحكم صحيح.
 - كتلة نموذج السائق ترتبط بكل من كتلة التحكم بالمقود وكتلة الادراك الحسي والتموضع على الطريق، وتعمل هذه الكتلة بمحاكاة العمل الذي يقوم به السائق حيث تقوم باستقبال معلومات عن الطريق (الزاوية القريبة و الزاوية البعيدة) التي تقدمها كتلة الادراك الحسي والتموضع بالإضافة إلى قيمة الموضع الحالي لعجلة القيادة والتي تستقبلها من كتلة التحكم بالمقود وبناء على هذه القيم يقوم هذا النموذج بحساب العزم الواجب تطبيقه على عجلة القيادة يتناسب مع زاوية دوران مرغوبة تحقق تتبع صحيح للمسار بناء على القيم التي تم إعلامها بها.
- خلال العمل سيتم التركيز على الكتلة الأخيرة، حيث سيكون الهدف استبدال كتلة نموذج السائق بكتلة تحكم جديدة تعتمد في بنيتها على المنطق العائم والشبكات العصبونية، ولذلك سنهتم بفهم البنية الداخلية لنموذج السائق.

٢, ١, ٤ توصيف نموذج السائق في المحاكى

تم الاعتماد على البنية العامة التي تحدثنا عنها في الفقرة ٣, ٢ حول كيفية بناء نموذج السائق فنلاحظ هنا أن النموذج يتألف من ثلاث أقسام رئيسية وهي الجزء التعويضي والجزء التنبؤي والجزء العصبي العضلي وقد تحدثنا سابقا عن أهمية كل من الجزئين التنبؤي والتعويضي أما بالنسبة للجزء العصبي العضلي فمهمة هذا الجزء تتلخص في محاكاة عملية الإدراك الحسي للسائق وتحويله إلى عزم عضلي لتحريك المقود حيث أن السائق يقوم بإدراك قيمة الزاوية المراد تطبيقها على المقود حسيا ومن ثم يقوم بتحويل هذا الإدراك إلى عزم يطبقه على المقود. ويجب الإشارة هنا أن عملية التأخير الزمني تعود أهميتها إلى تحقيق محاكاة صحيحة ومماثلة للإنسان حيث هناك تأخير زمني ما بين الإدراك الحسي والاستجابة العضلية الشكل ١: ٤.



الشكل ١: ٤ بنية نموذج السائق في المحاكى PARTAGE

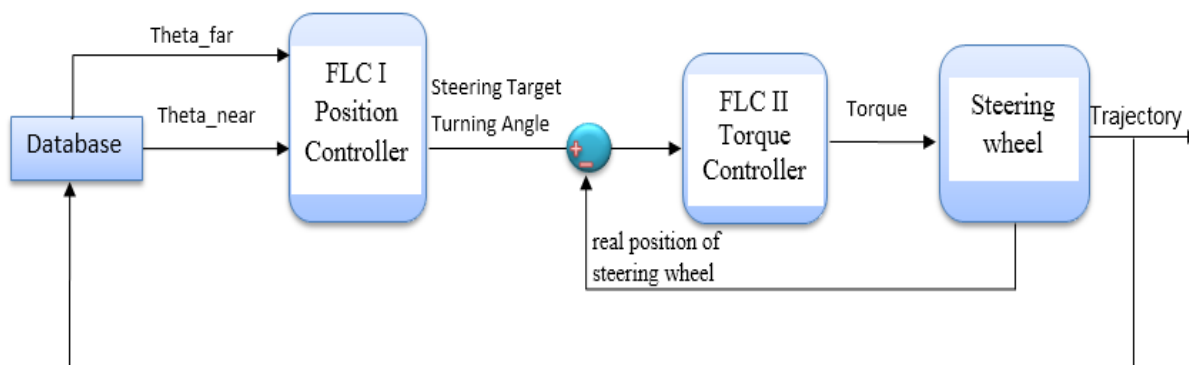
٣, ١, ٤ الميزات المتاحة في هذا المحاكى:

يحتوي هذا المحاكى على عدة طرق تجريبية ولكل طريق قاعدة بيانات مخزنه، بالإضافة إلى وجود إمكانية لمحاكاة حركة العربة على الطريق وبالتالي إمكانية معرفة احداثيات العربة لحظيا على الطريق بشكل مماثل لعمل ال GPS. من خلال قاعدة البيانات المخزنة مسبقا عن الطريق ومعرفة الاحداثيات فإنه من الممكن تأمين المعلومات المرئية وهي البعد الجانبي عن الطريق والخطأ الزاوي الرأسي ودرجة تقوص الطريق وبالتالي حساب كل من الزاوية القريبة والبعيدة وهذا ما تحدثنا عنه سابقا.

بناء على الوثوقية التي أثبتتها هذا المحاكى فقد تم الاعتماد والتعديل عليه بإضافة خيار جديد للتحكم وهو متحكم الشبكات العصبونية العائمة. تم ذلك من خلال بناء نموذج تحكم مشابه في بنيته لنموذج السائق حيث تم استبدال كل من الجزء التعويضي والجزء التنبؤي والجزء العصبي العضلي بمتحكمات عائمة تم بناؤها بالاعتماد على بيانات تم تحصيلها من المحاكى.

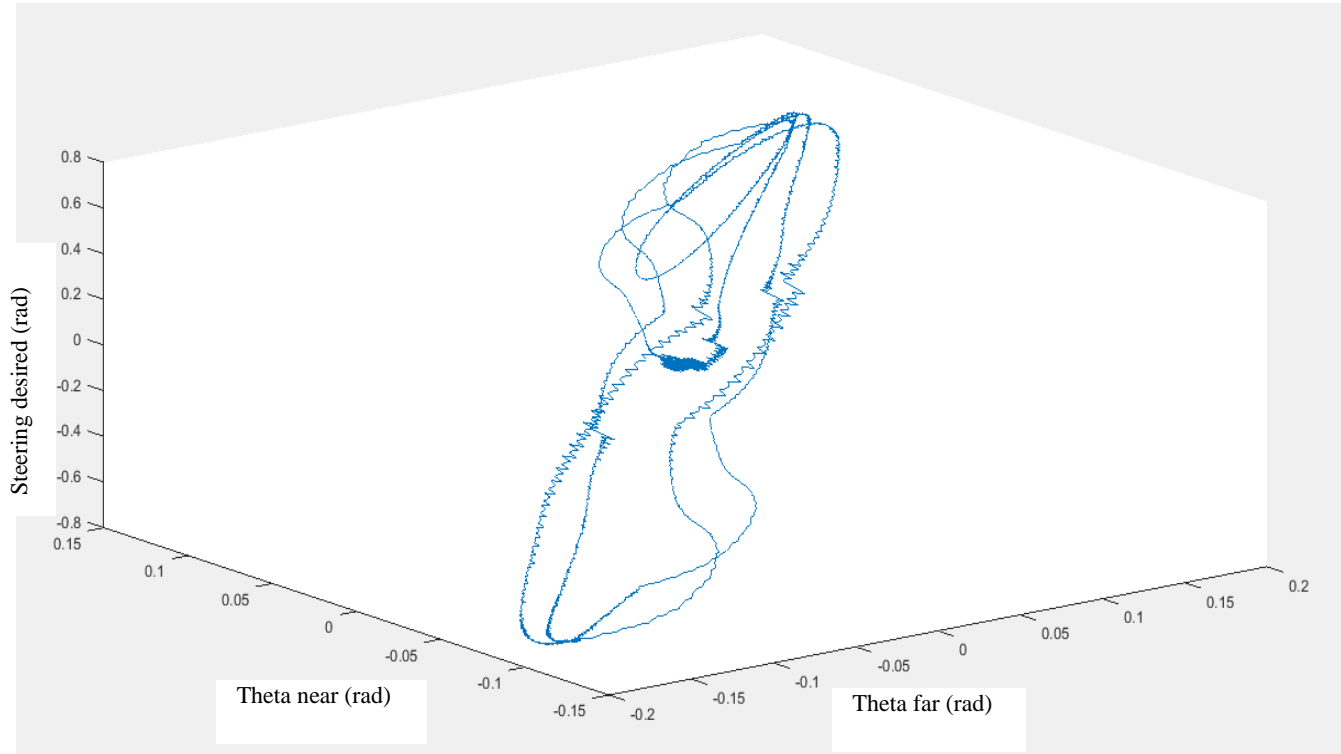
٢,٤ استخدام المنطق العائم في التحكم بمقود العربة:

سنعتمد في تصميم النموذج على بنية نموذج السائق التي تم توضيحها في الشكل ١:٤ حيث سنقوم بتقسيم بنية التحكم إلى متحكمين أساسيين الشكل ٢:٤ الأول مهمته تحديد قيمة الزاوية الهدف التي يجب تحريك المقود بها لتحقيق تتبع صحيح للمسار وسنطلق على هذا المتحكم متحكم الموضع، والمتحكم الثاني تتلخص مهمته في توليد العزم الأمثلي لتحريك المقود بشكل متناسب مع قيمة الزاوية الهدف وسنطلق على هذا المتحكم متحكم العزم. وسيتم اختيار محرك الاستدلال Sugeno لكل من هذين المتحكمين.

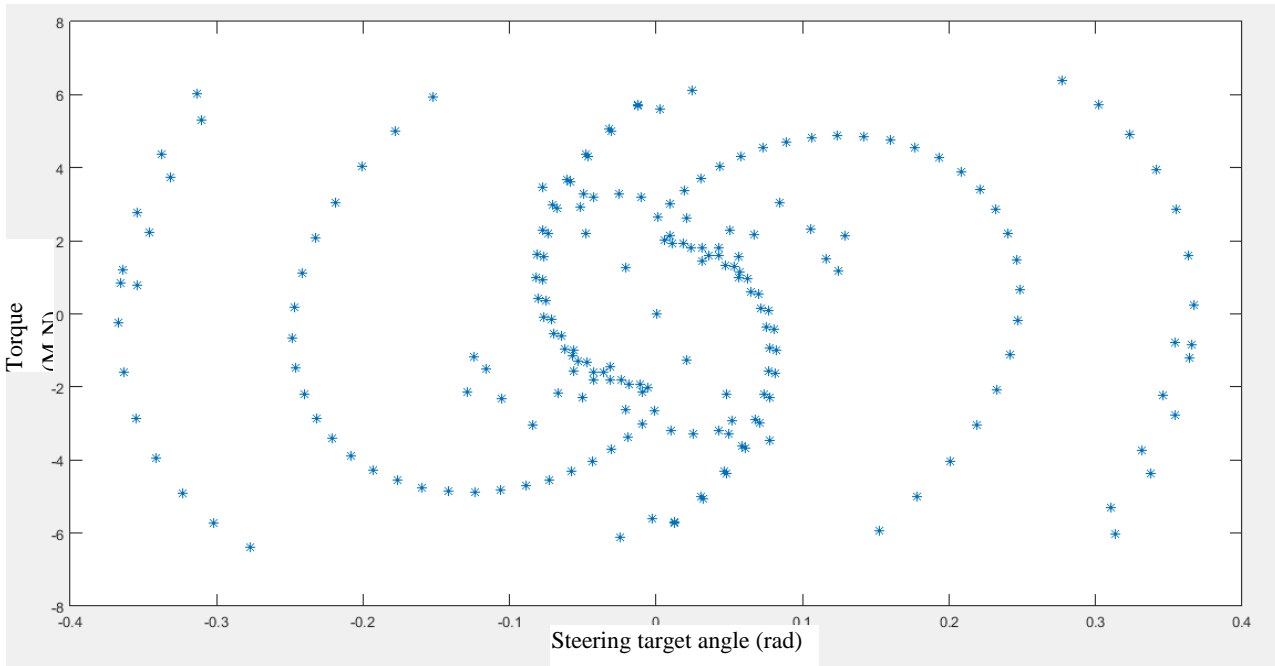


الشكل ٢:٤ تطبيقين من المتحكم العائم لأجل تحقيق عملية التحكم بالمقود

سنعتمد في بناء المتحكم الأول على المنطق العائم فقط دون استخدام الشبكات العصبونية والسبب في ذلك أننا عندما قمنا بتحصيل بيانات التدريب (الزاوية القريبة – الزاوية البعيدة (دخل)، الزاوية المرغوبة (خرج)) ورسمنا العلاقة بينهما الشكل ٣:٤، وجدنا أنه من أجل نفس القيمة في الدخل يوجد أكثر من قيمة في الخرج وبالتالي فإن ذلك جعل هذه البيانات غير صالحة لاستخدامها في تدريب الشبكات العصبونية والاعتماد على بنية ANFIS بسبب وجود ضجيج وارتياح عليها، لحل هذه المشكلة قمنا برسم العلاقة ما بين الدخل والخرج لتحديد بارامترات توابع انتماء هذا المتحكم ومن ثم ضبطها يدويا للوصول إلى القيم المناسبة.



الشكل ٣:٤ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة وزاوية دوران المقود المرغوبة



الشكل ٤:٤ العلاقة ما بين زاوية الدوران المرغوبة والعزم الواجب تطبيقه على المقود لتحقيق هذه الزاوية

أما بالنسبة للمتحكم الثاني فإننا عندما قمنا بتحصيل بيانات التدريب (الزاوية الهدف(دخـل) – العزم المطبق على المقود(خرج)) ورسمنا العلاقة بينهما الشكل ٤:٤. وجدنا أن هناك علاقة غير خطية تربط ما بين الدخل والخرج وبدون وجود ضجيج واضح على البيانات وبالتالي استعطنا اعتماد هذه البيانات في تدريب الشبكة العصبونية واستخدام بنية ANFIS في بناء هذا المتحكم.

١,٢,٤ تصميم المتحكم الأول: متحكم الموضع

المهمة الرئيسية لهذا المتحكم هو حساب الزاوية الهدف التي يجب تحريك المقود بها لتحقيق تتبع صحيح للمسار. لهذا المتحكم مدخلين وهما الزاوية القريبة والزاوية البعيدة وخرج وحيد هو الزاوية الهدف. والخطوة الأولى في تصميم المتحكم العائم هي تعويم المدخل ولأجل ذلك سنعرف متغيرات لفظية تشير إلى المدخل وهي θ_{near} و θ_{far} كل من هذين المتغيرين يملك خمس متغيرات عائمة ملحقه به وهي Small, MidPos, MidNeg, BigPos, BigNeg ويمكن الهدف وراء استخدام خمس متغيرات عائمة لكل متغير لفظي هو تغطية جميع الحالات الممكنة لتحديد موضع العربة على الطريق بشكل أدق. بالنسبة للخرج يتم تعويمه بتعريف متغير لفظي وحيد هو Steering ولهذا المتغير خمس متغيرات عائمة تلحق به وهي Small, MidP, MidN, BigP, BigN الجدول ١,٤.

إن القواعد التي يسلكها السائق أثناء القيادة هي قواعد ثابتة في كل الحالات، ولكن الذي يختلف هو فقط كيفية تعامل السائق مع هذه القاعدة بمعنى آخر درجة تحريك السائق للمقود بناء على الانعطاف تختلف بحسب درجة انعطاف الطريق لذلك فإن التحكم العائم يعمل على مواجهة هذه المشكلة من خلال عملية تعويم المتغيرات وتغطية جميع الحالات الممكنة. يمكننا تلخيص عملية بناء متحكم الموضع ضمن أربع خطوات رئيسية وهي:

- الخطوة الأولى: تحصيل البيانات اللازمة من نموذج السائق.
- الخطوة الثانية: في هذه الخطوة تتم عملية العنقدة clustering وتعتمد هذه الخطوة بشكل رئيسي على البيانات التي تم تحصيلها وخلال هذه الخطوة يتم تعويم المدخل والمخرج وذلك من خلال تحديد كل من المتغيرات اللفظية والعائمة وتوابع الانتماء.
- الخطوة الثالثة: بناء القواعد التي تربط ما بين توابع الانتماء في الدخل وتوابع الانتماء في الخرج بناء على الخبرة البشرية في القيادة.
- الخطوة الرابعة: يتم في هذه الخطوة التعديل اليدوي لبارامترات توابع الانتماء (مقدمة القاعدة) والمتغيرات الخطية (نتيجة القاعدة) وهي تعتمد على التجربة والخبرة البشرية حيث تم إجراء العديد من الاختبارات للوصول إلى القيم التي تحقق الهدف المطلوب.

١,١,٢,٤ تحصيل البيانات (الخطوة الأولى):

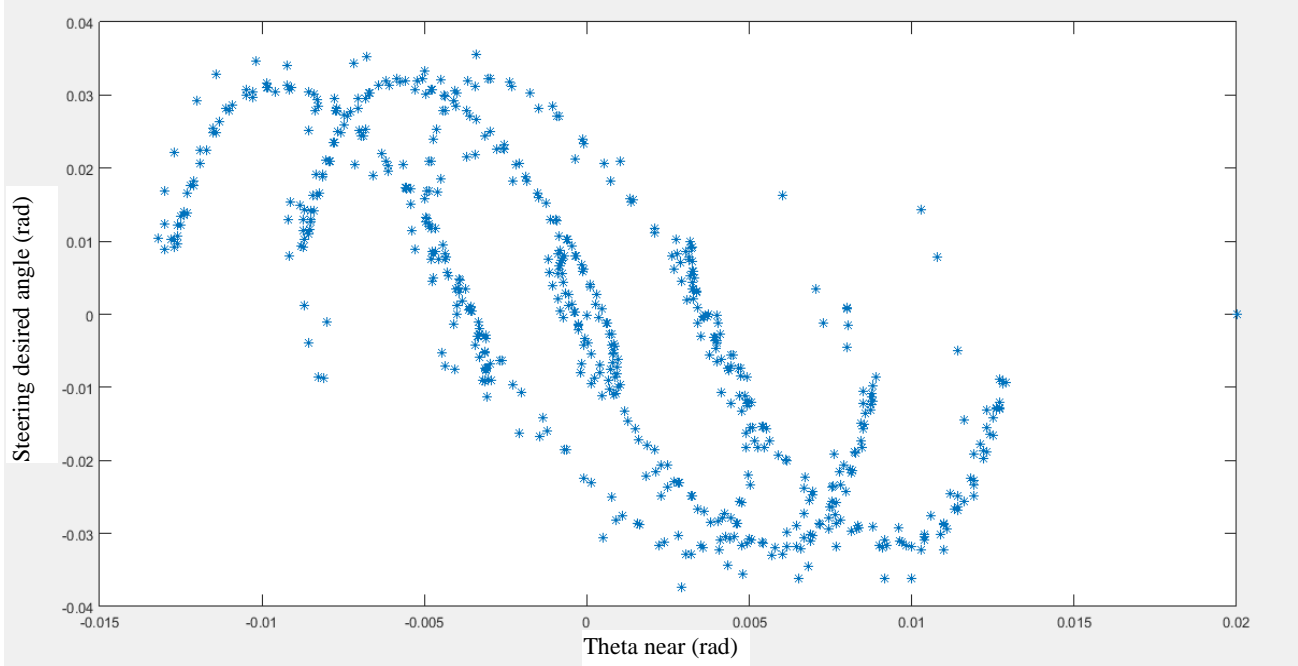
سنقوم بتحصيل بيانات التدريب بالاعتماد على نموذج السائق الموجود في المحاكى PARTAGE. خلال تجربة نموذج السائق يتم قياس كل من الزاوية القريبة والزاوية البعيدة التي تمثل لنا متغيرات الدخل للمتحكم العائم، ويتم أيضاً قياس زاوية دوران المقود التي يطبقها السائق بناء على قيم الدخل وهذه القيمة تمثل لنا خرج المتحكم العائم. يتم تخزين هذه البيانات على شكل مجموعات كل مجموعة مؤلفة من ثلاث عناصر وهي (زاوية قريبة، زاوية بعيدة (دخل) – زاوية الدوران المطلوبة (خرج)) الشكل ٣:٤.

٢,١,١,٥ العنقدة Clustering (الخطوة الثانية):

تعتمد هذه الخطوة على تجميع البيانات المتشابهة ضمن مجموعة واحدة وتعتبر هذه الخطوة هي الخطوة الأساسية في تصميم المتحكم العائم وان عملية ال clustering تختلف عن عملية التصنيف من حيث المبدأ فالأخيرة تعتمد على تعريف لوائح اسميه بشكل مسبق ومن ثم يتم ادراج البيانات تحتها بناء على المكان المناسب لها، أما الأولى فهي تعتمد على مبدأ تجميع البيانات التي تتقارب وتتشابه من بعضها وتختلف عن مجموعة بيانات أخرى وذلك بدون الحاجة لتعريف مسبق لأي لائحة اسميه وبعد عملية التجميع يتم تعريف لكل مجموعة اسم معين يتناسب معها ويميزها عن غيرها.

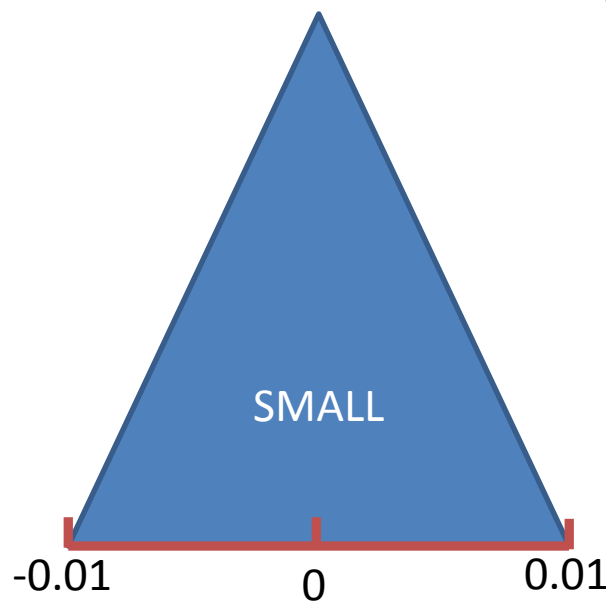
الشكل ٤:٥. يوضح لنا البيانات التي تحصيلها من نموذج السائق ومن خلال النظر الى هذا الشكل يتضح انه من الصعب جدا فصل هذه البيانات بناء على مبدأ ال clustering بسبب التداخل الكبير لهذه البيانات لذلك اعتمدنا على تجزئة هذه الخطوة الى عدة خطوات وذلك برسم العلاقة ما بين كل دخل مع الخرج بشكل مستقل عن الدخل الاخر ومن ثم رسم العلاقة ما بين المدخلين.

تم اختيار تابع الانتماء المثلثي كشكل أساسي لكل توابع الانتماء في هذا المتحكم وذلك بسبب ملاحظة العلاقة الشبه خطية ما بين الدخل والخرج عند التجزئة. وسنشير هنا أن المدخل الأول في هذا المتحكم يمثل الزاوية القريبة والمدخل الثاني يمثل الزاوية البعيدة اما الخرج فيمثل زاوية الدوران المرغوبة. في المرحلة الأولى للتجزئة سنرسم العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية الدوران المرغوبة وذلك عندما تكون الزاوية البعيدة معدومة أي أن قيمتها مساوية للصفر الشكل ٤:٥. ويتحقق ذلك الأمر عمليا عندما نسير على طريق مستقيم او عندما تكون العربة بعيدة جدا عن المنعطف فعندها تكون الزاوية البعيدة صفرية



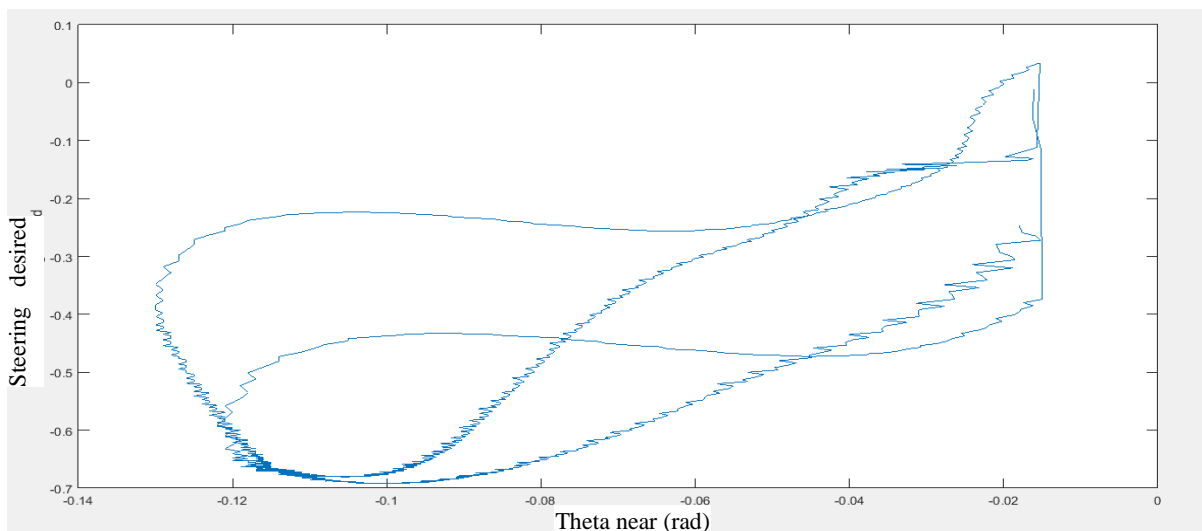
الشكل ٤:٥ العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية دوران المقود المرغوبة عندما تكون الزاوية البعيدة مساوية للصفر

من خلال هذا الشكل نستطيع تمييز ال cluster الأول وتحديد تابع انتمائه المعرف بالمتغير اللفظي theta near والمحدّد بالمتغير العائم small بأنه يغطي المنطقة المحصورة ما بين $[-0.01]$ و $[0.01]$



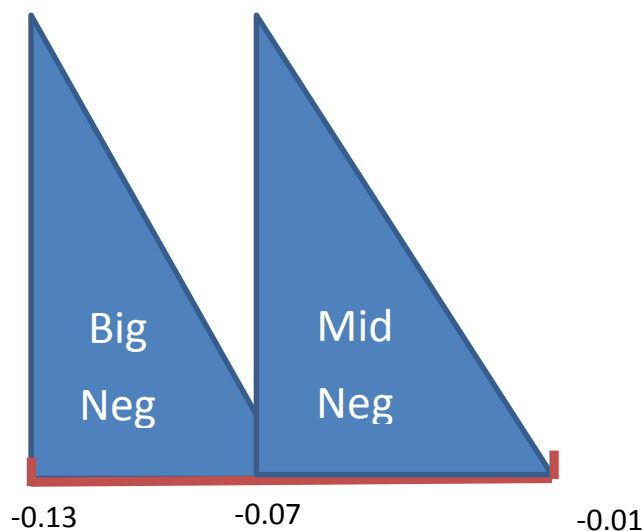
الشكل ٤:٦ تابع انتماء ال cluster الأول للزاوية القريبة

بعد اختيار تابع الانتماء الأول سنرسم العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية الدوران المرغوبة ولكن عندما تكون قيمة الزاوية القريبة أصغر من القيمة $[-0.015]$ وباعتبار أن الزاوية البعيدة غير معدومة



الشكل ٧:٤ العلاقة ما بين الزاوية القريبة وزاوية الدوران المرغوبة عندما تكون الزاوية القريبة قيمتها أصغر من $[0.015]$

من خلال الشكل ٧:٤ نستطيع تمييز ال cluster الثاني وتحديد تابع انتمائه المعرف بالمتغير اللفظي theta near والمحدد بالمتغير العائم MidNeg بأنه يغطي المنطقة المحصورة ما بين $[-0.07]$ و $[-0.015]$ الشكل ٨:٤. من خلال نفس الشكل السابق يمكن تمييز ال cluster الثالث وتحديد تابع انتمائه المعرف بالمتغير اللفظي theta near والمحدد بالمتغير العائم BidNeg بأنه يغطي المنطقة المحصورة ما بين $[-0.07]$ و $[-0.13]$ الشكل ٨:٤.

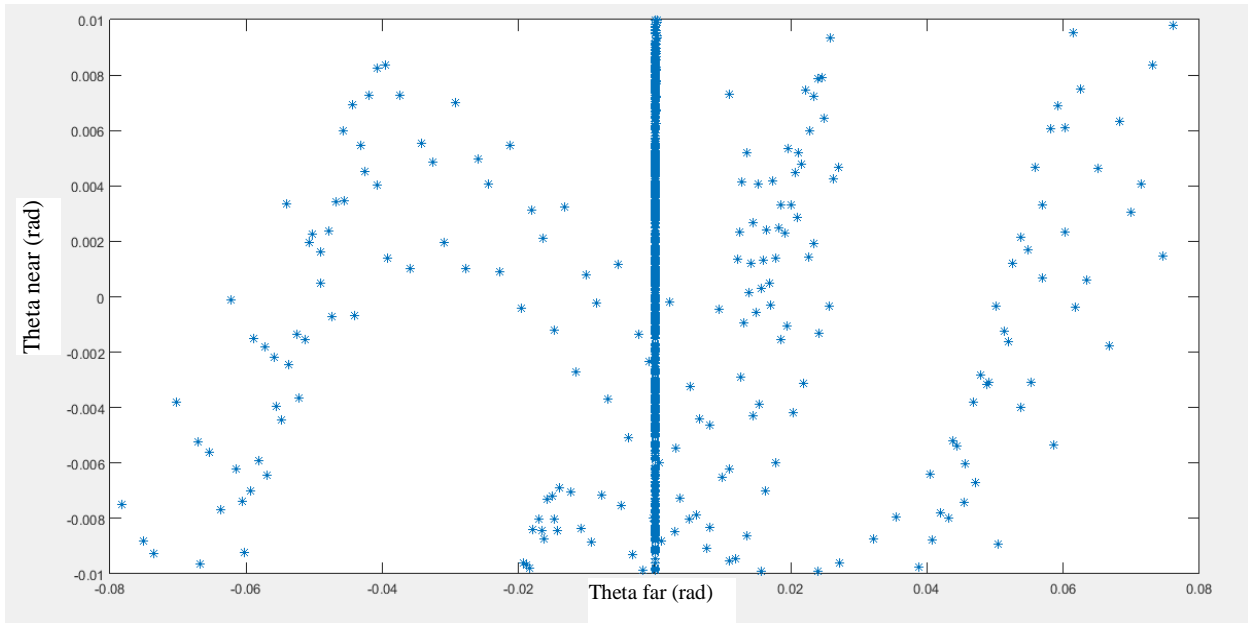


الشكل ٨:٤ تابعي انتماء ال cluster الثاني والثالث للزاوية القريبة

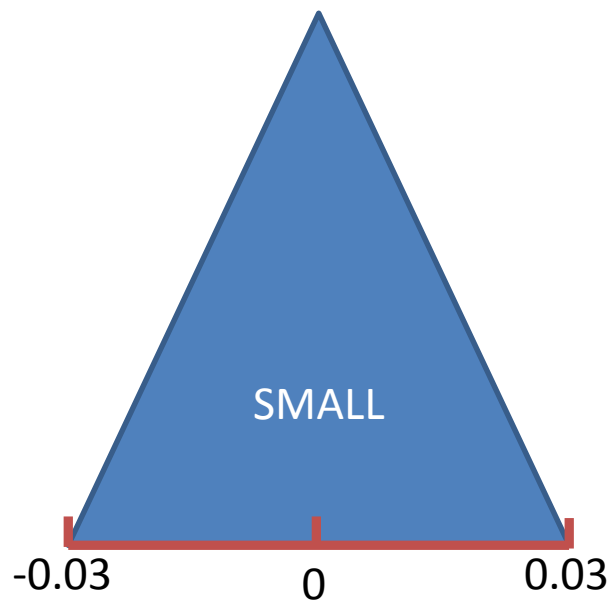
إن كل ما ذكرناه سابقا عن المتغير العائم theta near الذي ناقشنا فيه الجزء السالب يعمم على الجزء الموجب منه.

بعد تحديد توابع الانتماء الخاصة بالدخل الأول (الزاوية القريبة) سنعمل على تحديد توابع الانتماء الخاصة بالدخل الثاني (الزاوية البعيدة) ولأجل ذلك سنقوم بدراسة العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة ضمن كل مجال من المجالات التي تم تحديدها مسبقاً.

من أجل المجال الأول الذي تم اقتراحه بأنه يمتد ما بين $[0.01]$ و $[-0.01]$ سنرسم العلاقة ما بين الزاوية القريبة والبعيدة الشكل ٩:٤، وبناء على هذا الشكل سنقترح أن المجال الأول الخاص بالمتغير اللفظي θ_{far} والمحدد بالمتغير العائم small بأنه يغطي المنطقة المحصورة ما بين $[-0.03]$ و $[0.03]$ الشكل ١٠:٤.

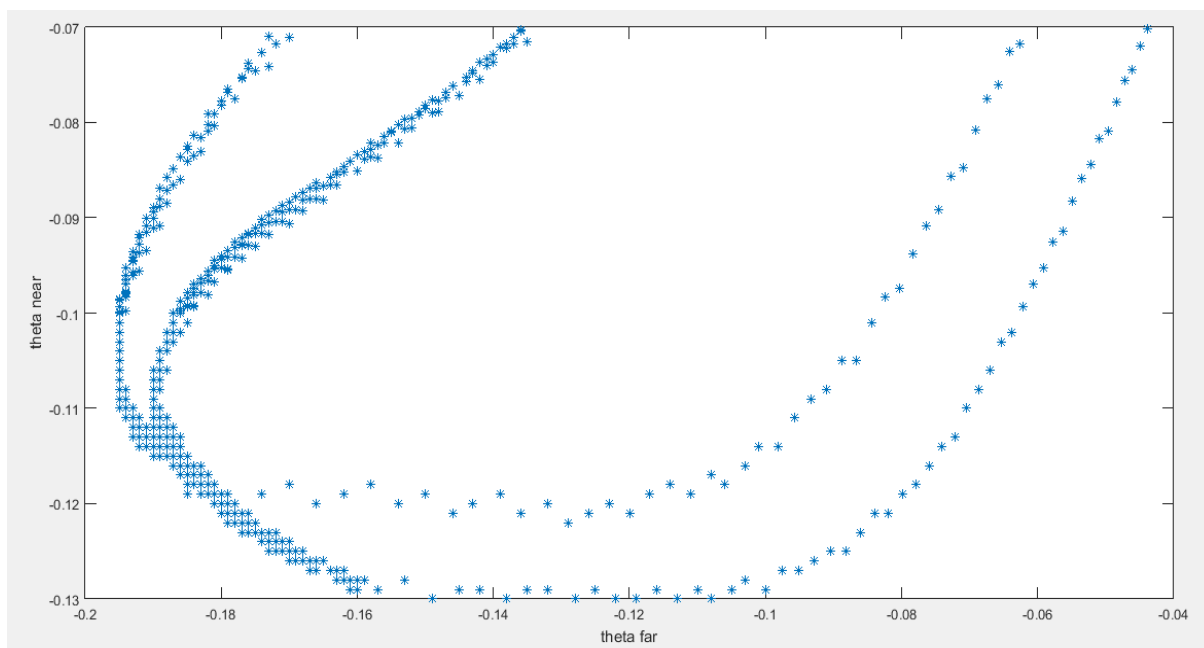


الشكل ٩:٤ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة ضمن مجال ال cluster الأول للزاوية القريبة $[-0.01,0.01]$

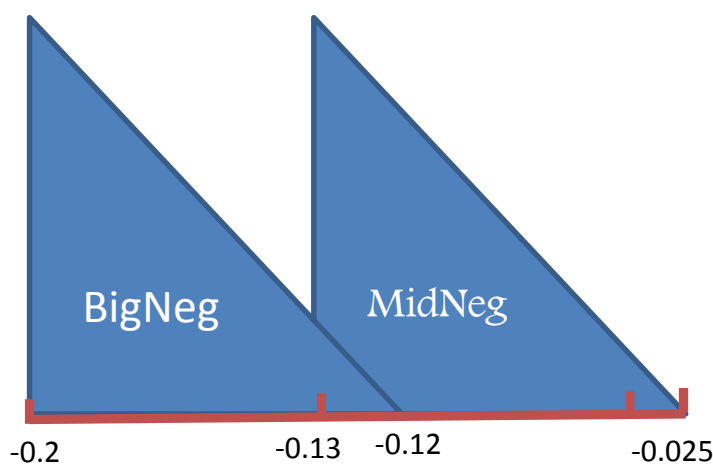


الشكل ١٠:٤ تابع انتماء ال cluster الأول للزاوية البعيدة

بالانتقال إلى ال cluster الثالث وهو الذي يكون فيه تابع انتماء للزاوية القريبة ممتدا ما بين $[-0.13, -0.07]$ ورسم العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة الشكل ١١:٤ سنقترح بأن تابع الانتماء الثالث الخاص بالمتغير اللفظي θ_{far} والمحدد بالمتغير العائم BigNeg بأنه يمتد ما بين $[-0.13, -0.2]$ ، ونحدد أيضا تابع الانتماء الثاني الخاص بالمتغير اللفظي θ_{far} والمحدد بالمتغير العائم MidNeg بأنه يمتد ما بين $[-0.04, -0.13]$ الشكل ١٢:٤. إن كل ما ذكرناه عن المتغير اللفظي θ_{far} الذي ناقشنا فيه الجزء السالب يعمم على الجزء الموجب منه.



الشكل ١١:٤ العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة ضمن مجال ال cluster الثالث للزاوية القريبة $[-0.07, -0.13]$



الشكل ١٢:٤ تابعي انتماء ال cluster الثاني والثالث للزاوية البعيدة

٣,١,١,٥ بناء القواعد (الخطوة الثالثة):

الفكرة الأساسية والمهمة في هذه الخطوة هو التأكد من ان جميع الاحتمالات الممكنة التي تربط ما بين توابع الانتماء قد تم أخذها بعين الاعتبار لذلك فإن الطريقة المثلى للتأكد من تغطية جميع الحالات هو العمل بمبدأ الجدولة التي يتم فيها وضع جميع توابع الانتماء ضمن جدول ومناقشة كل حالة على حدى كما هو مبين في الجدول ١,٤.

في هذه المرحلة يتم الاعتماد على الخبرة البشرية في ربط اطراف القاعدة، و سَيُعتمد في بناء القواعد على نموذج Sugeno وبالتالي فإن نتيجة القاعدة (خرج القاعدة) عبارة عن علاقة خطية، يتم تحديد بارامترات هذه العلاقات بالاعتماد على العلاقات التي تم توضيحها في الأشكال (الشكل ٣:٤، الشكل ٤:٤، الشكل ٥:٤، الشكل ٧:٤، الشكل ٩:٤، الشكل ١١:٤) حيث يتم دراسة ارتباط الدخل بالخرج.

جدول 1.٤ الاحتمالات الممكنة لبناء القواعد

	BN	MN	S	MP	BP
BIGN					
MIDN					
SMALL					
MIDP					
BIGP					

- عندما تكون الزاوية البعيدة صغيرة والزاوية القريبة كبيرة فهذا يُفسّر بأن الطريق الذي تسير عليه العربة هو طريق مستقيم ولكن العربة انحرفت عن مسارها المطلوب لسبب ما وبناء على الخبرة البشرية فإن التركيز سيكون على الزاوية القريبة فقط وذلك لتحقيق تصحيح التموضع السريع للعربة للعودة إلى المسار، القواعد التي تحكم هذه الحالات هي:

If theta_near is BigNeg and theta_far is small the desired steering is BigForNear1

If theta_near is BigPos and theta_far is small the desired steering is BigForNear2

أن كل من BigForNear1 and BigForNear2 عبارة عن علاقة خطية لها الشكل التالي:

$$(١.٤) \quad Z=a*\theta_{near}+0*\theta_{far}+c$$

حيث أن:

a هي عبارة عن الميل ويتم حسابه بالاعتماد على الشكل ٥:٤.

c هي عبارة عن انزياح المستقيم يتم حسابه بالاعتماد على الشكل ٥:٤.

- عندما تكون الزاوية القريبة صغيرة والزاوية البعيدة كبير فهذا يُفسّر بأن العربة تتبّع مسارها بشكل صحيح ولكنها اقتربت من منعطف حاد و بناء على الخبرة البشرية فإنه يجب التركيز على الزاوية البعيدة وذلك لضمان الاستقرار في عملية التحكم، القواعد التي تحكم هذه الحالات هي:

If theta_near is small and theta_far is BigNeg the desired steering is BigForFar1

If theta_near is small and theta_far is BigPos the desired steering is BigForFar2

أن كل من BigForNear1 and BigForNear2 عبارة عن علاقة خطية لها الشكل التالي:

$$(٢.٤) \quad Z=0*\theta_{near} + b*\theta_{far} + c$$

حيث أن:

b وهو يعبر عن الربح التنبؤي [5]، وهو ذو قيمة ثابتة لكل الحالات التي تكون فيها قيمة الزاوية البعيدة غير مهمة وبناء على التجربة فإن القيمة التي تم اعتمادها لهذا الثابت هي 3.4 .
c هي عبارة عن انزياح المستقيم يتم حسابه بالاعتماد على الشكل ٩:٤ .

- عندما تكون الزاوية القريبة متوسطة والزاوية البعيدة كبير فهذا يُفسر بأن العربة قد بدأت بالدخول في المنعطف علما بأن العربة كانت تتبع مسارها بشكل صحيح ولكن عند الدخول في المنعطف حدث انحراف عن المسار بقيمة متوسطة وهذا الانحراف ناتج عن وجود المنعطف وليس عن خطأ مسبق في التتبع، القواعد التي تحكم هذه الحالات هي:

If θ_{near} is MidNeg and θ_{far} is BigNeg the desired steering is MID4

If θ_{near} is MidPos and θ_{far} is BigNeg the desired steering is MID7

إن كل من MID4 و MID7 عبارة عن علاقة خطية لها الشكل التالي:

$$(٣.٤) \quad Z=a*\theta_{near}+b*\theta_{far}+c$$

حيث أن:

a عبارة عن الميل يتم حسابه بناء على الشكل ١١:٤ .

b وهو يعبر عن الربح التنبؤي.

c هي عبارة عن انزياح المستقيم يتم حسابه بالاعتماد على الشكل ١١:٤ .

- عندما تكون الزاوية البعيدة متوسطة والزاوية القريبة كبير فهذا يُفسر بأن العربة ربما قد اقتربت من نهاية المنعطف وهي في حالة تتبع غير صحيح للمسار، القواعد التي تحكم هذه الحالات هي:

If θ_{near} is BidNeg and θ_{far} is MigNeg the desired steering is MID1

If θ_{near} is BidPos and θ_{far} is MigNeg the desired steering is MID2

حيث ان كل من MID1 و MID2 عبارة عن علاقة خطية:

$$(٤.٤) \quad Z=a*\theta_{near}+b*\theta_{far}+c$$

a عبارة عن الميل يتم حسابه بناء على الشكل ١١:٤ .

b وهو يعبر عن الربح التنبؤي.

c هي عبارة عن انزياح المستقيم يتم حسابه بالاعتماد على الشكل ١١:٤ .

تم اعتماد نفس المنهج في بناء جميع القواعد حيث أُعتمد على الأشكال التي وضحت العلاقة ما بين الزاوية القريبة والزاوية البعيدة. جميع القواعد التي تم اعتمادها موضحة في الجدول ٢,٤ .

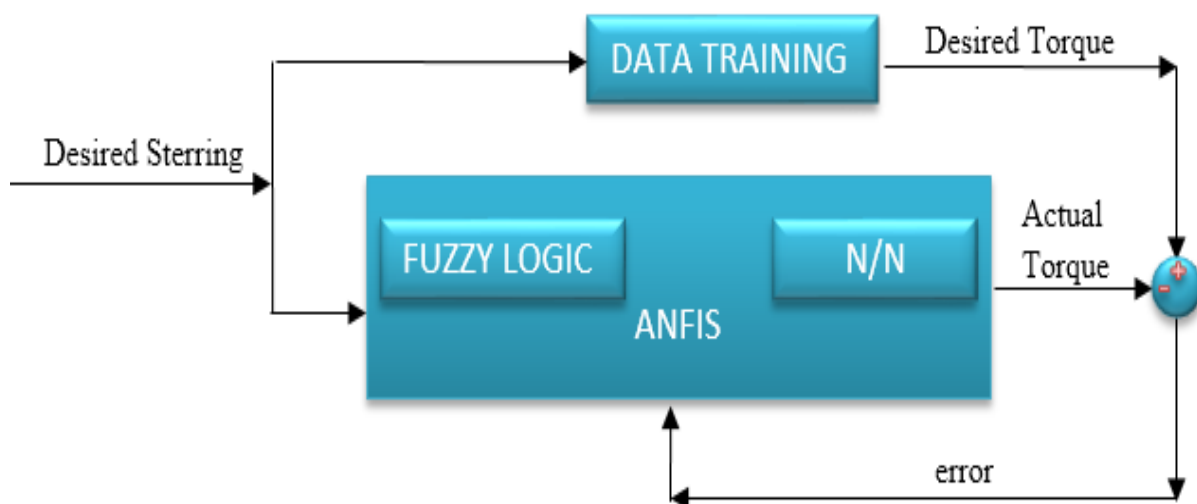
جدول ٢.٤ قواعد متحكم الموضع

<i>Theta near Theta far</i>	BN	MN	S	MP	BP
BIGN	BigForN&F1	Mid4	BigForFar1	Mid7	BigForN&F2
MIDN	Mid1	Mid3	BigForFar	Mid3	Mid2
SMALL	BigForNear1	Mid5	small	Mid6	BigForNear2
MIDP	Mid1	Mid3	BigForFar	Mid3	Mid2
BIGP	BigForN&F1	Mid4	BigForFar2	Mid7	BigForN&F2

٢,٢,٤ المتحكم الثاني: متحكم العزم:

المهمة الرئيسية لهذا المتحكم هو تطبيق العزم المناسب على مقود العربة والذي يحقق دوراناً متناسباً مع قيمة الزاوية الهدف وهي عبارة عن الفرق ما بين الزاوية المرغوبة التي تم تحصيلها من متحكم الموضع وزاوية دوران المقود الحالية. لهذا المتحكم مدخل وحيد وهو الزاوية الهدف وخرج وحيد وهو العزم المرغوب تطبيقه على مقود العربة. الخطوة الأولى في تصميم المتحكم العائم هي تعويم الدخل ولأجل ذلك سنعرف متغير لفظي يشير إلى الدخل وهو $steering_target$ له خمس متغيرات عائمة ملحقه به وهي S, MP, MN, BP, BN ويكمن الهدف وراء استخدام خمسة متغيرات عائمة تغطية جميع الحالات الممكنة قيمة العزم متناسب مع الزاوية الهدف بشكل أدق. أما بالنسبة للخرج فيتم تعويمه بتعريف متغير لفظي وحيد هو Torque ولهذا المتغير أيضاً خمس متغيرات عائمة تلحق به وهي BigP, MidN, MidP, Small, BigN. جدول ٣,٥. في بناء هذا المتحكم سنعتمد على نظرية الدمج الهجين ما بين التحكم العائم والشبكات العصبونية والتي أشرنا إلى أهميتها في الفصل الثالث من هذا البحث. ومن الممكن تلخيص عملية بناء متحكم العزم باستخدام ANFIS ثلاث خطوات رئيسية وهي:

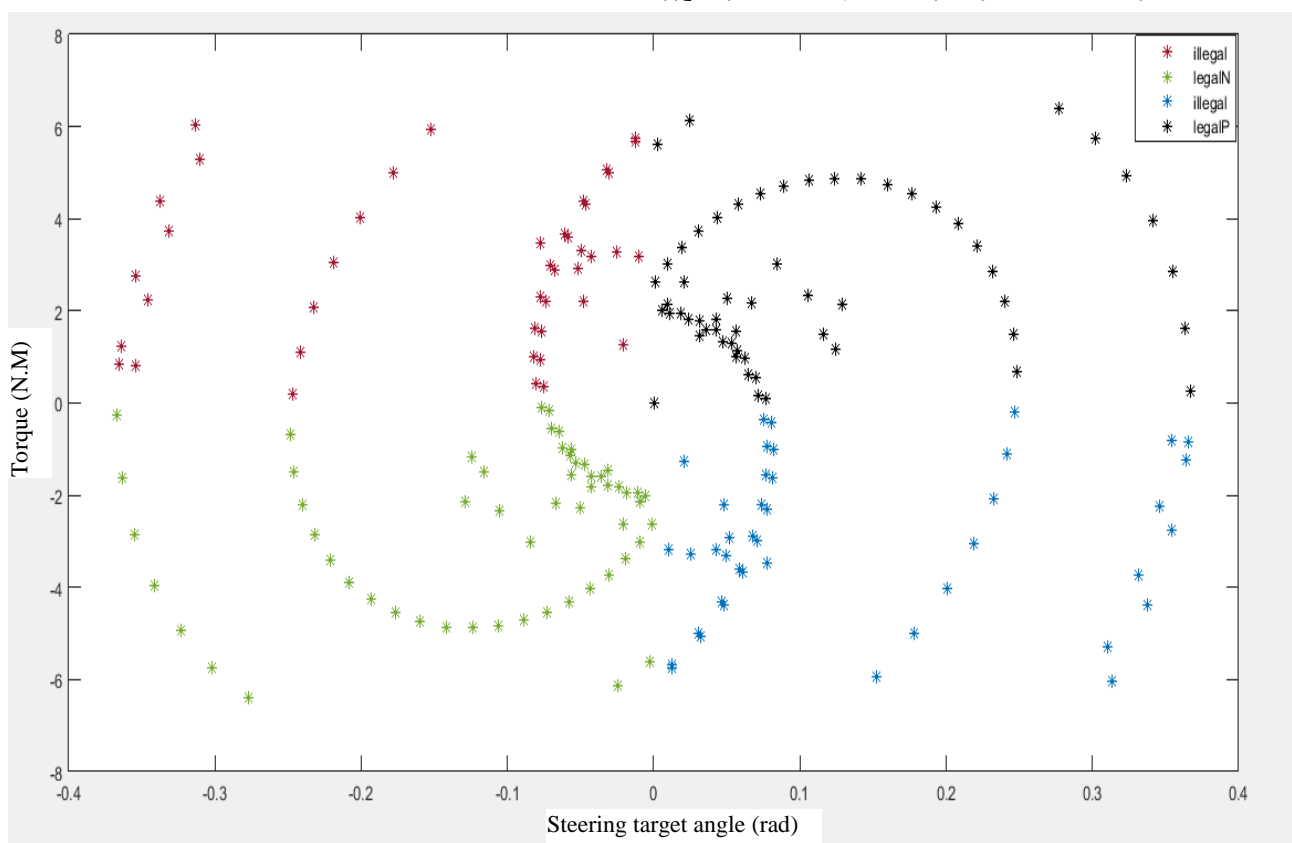
- الخطوة الأولى: تحصيل البيانات اللازمة من نموذج السائق وذلك لاستخدامها في عملية تدريب الشبكة العصبونية.
- الخطوة الثانية: بناء النموذج الأولي لمتحكم Sugeno وذلك اعتماداً على البيانات التي تم تحصيلها في الخطوة الأولى، ففي هذه الخطوة تتم عملية العنقدة clustering وبناء القواعد اعتماداً على الخبرة البشرية.
- الخطوة الثالثة: بناء نموذج ANFIS لتدريب المتحكم العائم باستخدام الشبكات العصبونية وبالتالي ضبط قيم كل من محددات توابع الانتماء والمتغيرات الخطية في القواعد.



الشكل ١٣:٤ مخطط صندوقي لتدريب متحكم الشبكات العصبونية العائمة ANFIS لمتحكم العزم

١,٢,٢,٤: ١,٢,٢,٤:٤ الحصول على بيانات التدريب (الخطوة الأولى):

سنقوم بتحميل بيانات التدريب بالاعتماد على نموذج السائق الموجود في المحاكاة PARTAGE. خلال تجربة نموذج السائق يتم قياس كل من زاوية الهدف التي تمثل متغير دخل المتحكم العائم، ويتم أيضا قياس العزم الذي يطبقه السائق على المقود وهذه القيمة تمثل لنا خرج المتحكم العائم. يتم تخزين هذه البيانات على شكل مجموعات كل مجموعة مؤلفة من عنصرين وهما (الزاوية الهدف (دخل) - العزم المطلوب (خرج)) الشكل ١٤:٤.



الشكل ١٤:٤ بيانات تدريب متحكم الموضع

يوضح الشكل ١٤:٤ بيانات التدريب بعد فصلها عن بعضها إلى عدة مجموعات حيث يتبين وضوحاً من الشكل وجود بيانات شاذة. بناء على الخبرة البشرية في القيادة لا يمكن أن تكون زاوية الدوران سالبة والعزم المطبق موجب لأن ذلك

سيؤدي إلى انحراف العربة عن مسارها وكذلك الامر في حال كانت زاوية الدوران موجبة لا يمكن تطبيق عزم سالب، وبناءً على ذلك تم عزل القيم الشاذة واستخلاص بيانات التدريب الصحيحة.

٢,٢,٢,٤ بناء النموذج الأولي لمتحكم Sugeno (الخطوة الثانية):

بناء على الشكل ٤:٤ تم تقسيم بيانات التدريب إلى خمس cluster وتم تعريف توابع انتماء لكل cluster في الدخل وبشكل أولي تم اختيار شكل شبه المنحرف لهذه التوابع حيث يعتبر هذا الشكل هو الأكثر تناسبا مع بنية التدريب ANFIS أما بالنسبة للخروج فالتوابع هي عبارة عن علاقات خطية أُعطيت بشكل أولي قيم واحدية لمحدداتها. ولقد أشرنا لهذه التوابع بالمتغيرات اللفظية التالية:

Steering target: BN,MN,S,MP,BP. (input)

Torque: BigN,MidN,Small,MidP,BigP. (output)

ومن ثم تم وضع القواعد منطقية التي تربط ما بين الدخل والخروج بناء على الخبرة البشرية وهي موضحة في الجدول التالي:

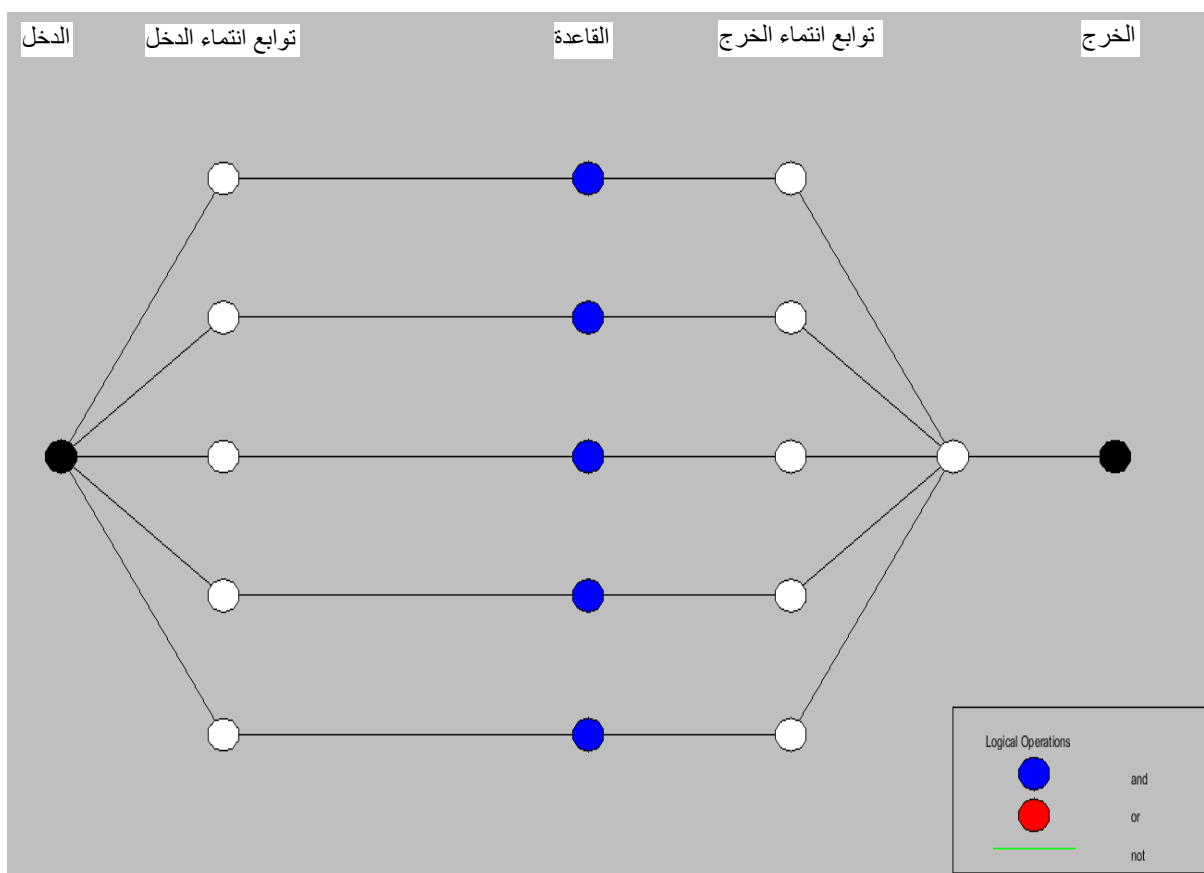
جدول ٣.٤ قواعد متحكم العزم

Steering target	Torque
BN	BigN
MN	MidN
S	Small
MP	MidP
BP	BigP

٣,٢,٢,٤ بناء نموذج ANFIS (الخطوة الثالثة):

في هذه المرحلة يتم بناء الشبكة العصبونية وربطها مع المتحكم العائم الأولي الذي تم بناؤه في الخطوة السابقة، وذلك بهدف ضبط بارامترات كل من دخل وخروج القواعد في المتحكم والوصول بهذه القيم إلى القيم المثلى والحصول على أصغر خطأ ممكن أثناء عملية التدريب. تم ربط الشبكة العصبونية والمتحكم العائم وفق بنية ANFIS الشكل ٤:١٣ وقد تحدثنا عن هذه البنية بشكل مفصل في الفقرة ١,٥,٣.

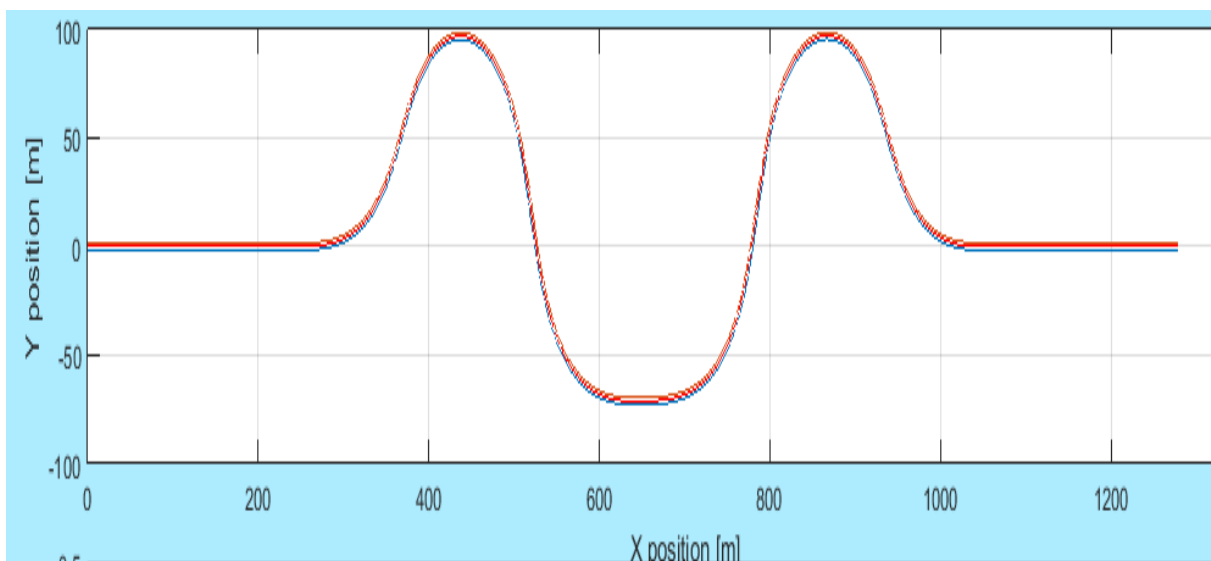
نلاحظ من الشكل ان بنية ANFIS هي مشابهة تماما لهيكلية الشبكات العصبونية ولكنها تختلف عنها في بنية العصبون وهي مؤلفة من خمس طبقات (طبقة توابع انتماء الدخل (مقدمة القاعدة)- طبقة ربط القواعد (الربط المنطقي في القاعدة (AND) - طبقة التقييس(تم دمجها مع الطبقة الأخيرة حيث تم حساب القيمة المحددة بالاعتماد على نظرية مركز الثقل (COG) -طبقة التوابع الخطية (خرج القاعدة)- طبقة إيجاد القيمة المحددة(فك التعويم)).



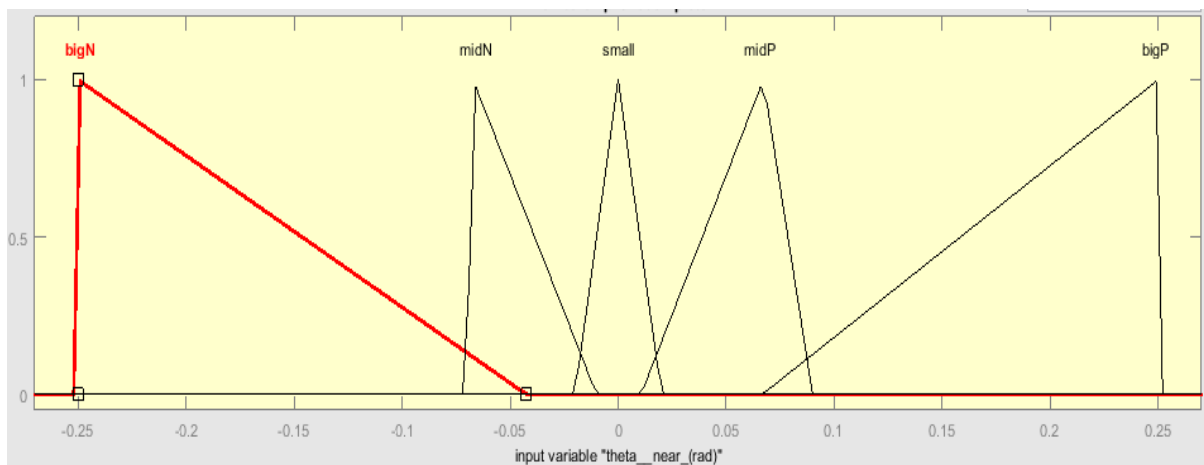
الشكل ١٥:٤ بنية ANFIS لمتحكم العزم

٢,٥ الاختبار التجريبي:

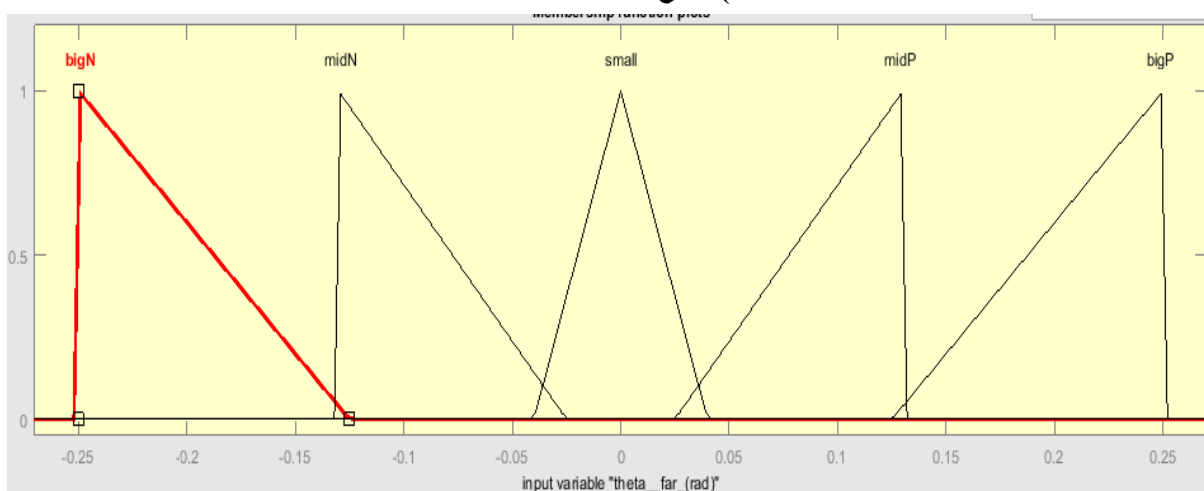
في هذه المرحلة تم الدمج ما بين متحكم الموضع ومتحكم العزم ضمن بنية مشابهة لنموذج السائق حيث تم استبدال الجزء التعويضي والجزء التنبؤي من نموذج السائق الشكل ١:٤ بمتحكم الموضع الشكل ٢:٤ كما تم استبدال النموذج العصبي العضلي من نموذج السائق الشكل ١:٤ بمتحكم العزم الشكل ٢:٤ وقد تم اختيار الطريق Test الموجود في المحاكى Partage الشكل ١٦:٤ لإجراء التجارب على نموذج التحكم العائم ومقارنتها مع نموذج السائق حيث يتميز هذا الطريق بوجود خمس منعطفات وبطول ١٢٠٠ متر. تم إجراء العديد من التجارب لضبط بارامترات توابع الانتماء التي عرفناها مسبقا في كل من متحكم الموضع ومتحكم العزم للحصول على تحكم مستقر ومماثل لنموذج السائق.



الشكل ٤:١٦ الطريق test الذي تم الاعتماد عليه في اختبار المتحكم العائم

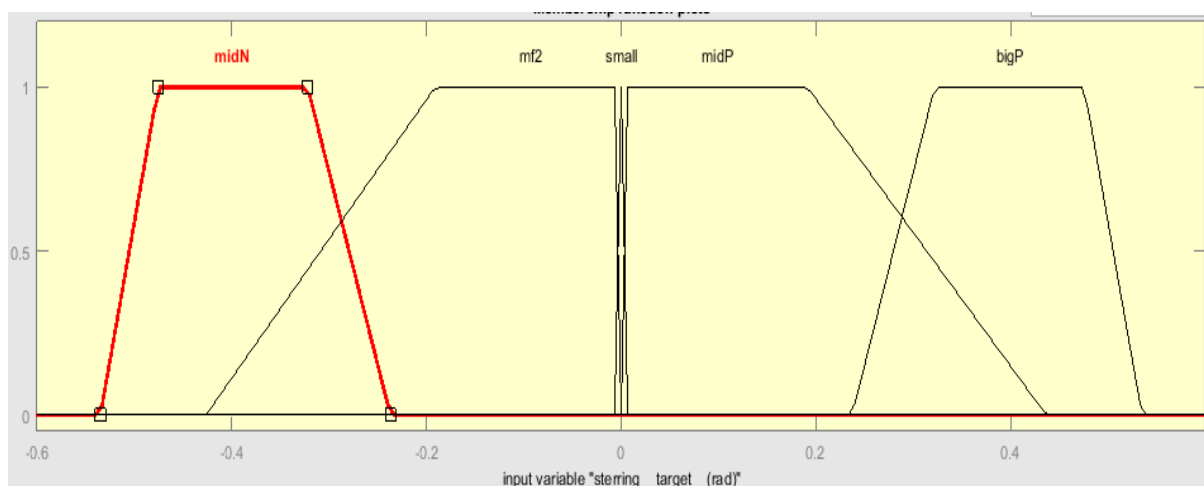


(a) تابع انتماء الزاوية القريبة



(b) تابع انتماء الزاوية البعيدة

الشكل ١٧:٤ توابع انتماء متحكم الموضع



الشكل ١٨:٤ تابع انتماء متحكم العزم

توضح الاشكال السابقة الشكل النهائي لتوابع انتماء كل من متحكم العزم ومتحكم الموضع بعد اجراء العديد من التجارب،وبالمقارنة ما بين نموذج التحكم العائم الذي تم التوصل اليه وبين نموذج السائق جدول ٤.٤ وجدنا أنه باستخدام التحكم العائم توصلنا إلى نتائج أفضل من نموذج السائق حيث استطعنا من خلال نموذج التحكم بالمقود تقليل الخطأ الأعظمي للانزياح عن الموضع المطلوب إلى 0.498 بينما في نموذج السائق كانت القيمة العظمي للخطأ هو 0.941 أي

تقريباً تم تقليل نسبة الخطأ بنسبة ٥٠% وكذلك الأمر بالنسبة لمتوسط الخطأ في الانزياح الجانبي أما بالنسبة للعزم والتسارع فكان نموذج تحكم السائق مشابهاً لنموذج التحكم العائم الذي تم بناؤه.

جدول ٤.٤ مقارنة ما بين نموذج التحكم العائم الذي بناؤه ونموذج السائق في المحاكاة PARTAGE

	FUZZY	DRIVER MODEL
max(error displacement)	0.498 m	0.941 m
max(torque)	6.831 n.m	6.416 n.m
max(acclerartion)	0.274 m	0.231 m
average(displacement)	0.1580 m	0.2387 m

٣,٥ الخاتمة:

إن السبب الذي دفعنا إلى اختيار المتحكم العائم في هذا النوع من التحكم وجود عدد من المتغيرات التي لا يمكن قياسها والتي تحدث بشكل غير متوقع مثل الضغط على مقود العربة الناتج عن وجود مطبات على الطريق. ولمعالجة هذه المشكلة يمكن التعلم من السائق بشكل مباشر ومحاكاة التفكير المنطقي الذي يسلكه في معالجة هذه المتغيرات وهذا ما دفعنا إلى استخدام التحكم العائم والشبكات العصبونية حيث تساهم الشبكات العصبونية في تسهيل عملية ضبط البارامترات بشكل أدق مع توفير للكثير من الوقت والجهد وهذا ما دفعنا إلى استخدام النمط الهجين ANFIS مع الإشارة إلى أن الشرط الأساسي في استخدام هذا النمط هو الحصول على بيانات تدريب صحيحة في متحكم العزم حيث تمكنا من عزل البيانات الشاذة أما في حالة متحكم الموضع فكان هناك صعوبة في عزل البيانات الشاذة لذلك تم التوجه إلى ضبط البارامترات تجريبياً.

٥. الفصل الخامس خلاصة البحث والتوصيات المستقبلية

١,٥ خلاصة البحث:

خلال هذا البحث عرضنا كيفية تطبيق التحكم الذكي على العربات الذاتية، وقمنا بالتركيز على كيفية التحكم بمقود العربة عند السير على طريق ذو منعطفات حيث يتم التنبؤ بوجود المنعطف اعتماداً على الزاوية البعيدة وتعديل حركة المقود بشكل تدريجي لتحقيق عبور مستقر وناعم للانعطاف. وتم الاعتماد في تحقيق هذا التحكم على المنطق العائى وعلى نظرية الدمج الهجين ما بين الشبكات العصبونية والمنطق العائى ANFIS.

يُعتبر استخدام التحكم الذكي في القيادة الذاتية للعربات موضوعاً لا يزال قيد البحث، وفي كل المراجع التي تم التطرق إليها خلال بحثنا في هذا الموضوع وجدنا أن تركيز الأبحاث كان على مستوى واحد من مستويات التحكم بالعربة، فبعض الأبحاث ركزت على التحكم التعويضي بهدف تحقيق التوضع الصحيح على المسار دون الاهتمام بالتحكم التنبؤي، والبعض الآخر ركز على التحكم التنبؤي بهدف تعديل سرعة العربة على الطريق دون الاهتمام بالتحكم التعويضي، فكان الهدف في هذا البحث هو تحقيق تحكم ذكي يدمج ما بين التحكم التنبؤي والتحكم التعويضي ضمن بنية تحكم واحدة تشابه تماماً نموذج السائق. وقد تم التوصل إلى بنية أعطت نتائج جيدة مقارنة مع نموذج السائق و كان ذلك مشجعاً لاستكمال العمل في خطوات مستقبلية.

تم الاعتماد في هذا البحث على المحاكى PARTAGE الذي تم تطويره من قبل IRCCYN والذي تم اثبات وثوقيته ضمن العديد من المقالات العلمية. قمنا بإضافة بنية تحكم جديدة إلى هذا المحاكى وهي بنية التحكم العائى وأجراء التجارب عليه ومقارنة النتائج التي التوصل إليها باستخدام هذا المحاكى مع بنية نموذج السائق الموجودة عليه مسبقاً.

٢,٥ التوصيات المستقبلية:

على الرغم من أن النتائج التي تم التوصل إليها كانت مشابهة لنموذج السائق، ولكن لا يزال هذا البحث يحتاج إلى المتابعة وذلك للوصول إلى نموذج تحكم أفضل. حيث ظهرت أبحاث جديدة تدمج ما بين الخوارزميات الجينية والمنطق العائى، وهذه النظريات تمكننا من تجاوز مشكلة عدم وجود بيانات تدريب صحيحة إلى حد ما. فمن الممكن باستخدام مثل هذا النمط من التحكم الوصول إلى بنية تحكم أفضل بالإضافة إلى أنه خلال هذا البحث كان التركيز فقط على التحكم بالمقود وضمن الخطوات المستقبلية نتطلع إلى الدمج ما بين التحكم بالمقود والتحكم بالسرعة ضمن بنية تحكم واحدة.

٦. المراجع

- [1] Sleet D. et al. Peden M., Scurfield R, World report on road traffic injury, Geneva: World Health Organization, 2004.
- [2] M.Pasquier, A.Spаланzani D.Partouche, Intelligent Speed Adaptation Using a Self-Organizing Neuro-Fuzzy Controller, Istanbul: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2007.
- [3] R.Oentaryo, Automated Driving Based on Self-Organizing GenSo-Yager Neuro-Fuzzy System, Singapor: Nanyang Technological University, 2004.
- [4] D.Partouche, Intelligent Speed Adaptation in Curves for Autonomous Vehicles, France: HAL, 2007.
- [5] L.Saleh P.Chevrel F.Mars J. Lafay and F.Claveau, Human-like cybernetic driver model for lane keeping, France: IRCCyN, 2011.
- [6] C.Sentouh P.Chevrel F. Mars F.Claveau, A Human-Centred Approach of Steering Control Modelling, France: IRCCyN.
- [7] C. MACADAM, Understanding and Modeling the Human Driver, Swets & Zeitlinger, 2003.
- [8] J. E. NARANJO C. GONZÁLEZ R. GARCÍA T. DE PEDRO, FLC DESIGN FOR ELECTRIC POWER STEERING AUTOMATION, Madrid: Instituto de Automática Industrial.
- [9] F. Mars, Driving around bends with manipulated eye-steering coordination, France: IRCCyN, 2008.
- [10] Dr.David Cole, DRIVER-VEHICLE DYNAMICS, Cambridge, 2007.
- [11] Shuonan Xu, Vehicle State and Parameter Estimation, Clemson University vehicular Electronic laboratory.
- [12] Michael F. Land, Does Steering a Car Involve Perception of the Velocity Flow Field?, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2001.
- [13] A.Ahmad M.S.Khan K.Ahmed N.Anwar A.Athar, Speed Scheduling of Autonomous Railway Vehicle Control System using Neuro-Fuzzy System, IJSER, 2011.
- [14] S.Wankhede M.M.Khanapurkar P.Bajaj, Intelligent Speed Adaptation System with Hybrid Algorithm, India: IJCSNS, 2011.
- [15] Y.Bai D.Wang, Advance Fuzzy Logic Technologies in Industrial Application, springer, 2006.
- [16] FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, pp-61-84, 2001.
- [17] BEHAVIOURS USING RULE BASED METHODS, NPC.
- [18] MathWorks, Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB, 2002.

- [19] J.Jang C. Sun E. Mizutani, Fuzzy Rule-based Models, 1997.
- [20] Roland S.Burns, Advance Control Engineering, 2001.
- [21] S. N. Sivanandam S. Sumathi S. N. Deepa, Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB, springir, 2007.
- [22] Jeff Heaton, Introduction to Neural Networks with Java, Heaton Research,Inc.
- [23] Paraskevi Th. Zacharia, An Adaptive Neuro-fuzzy Inference System for Robot Handling Fabrics with Curved Edges towards Sewing, springir, 2009.
- [24] Hybrid intelligent systems, Computer Intelligence and Soft Computing.
- [25] Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems (ANFIS) Analysis and Applications, Piero P. Bonissone, 2002.
- [26] G.J.Klir and B.Yuan (1995) " Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications", United States of America.
- [27] N.K.Kasabov (1998) " Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems , and Knowledge Engineering " , 2nd ed , London , England , pp.581.
- [28] G.Chen and T.T.Pham (2001) " Introduction to Fuzzy Sets , Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems" ,London , NewYork, pp.329
- [29] [Jang, J.-S. R., "ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May 1993.
- [30] Jang, J.-S. R. and C.-T. Sun, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence", Prentice Hall, 1997
- [31] Cruz,A."Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems (ANFIS)", <http://documents.mx/documents/anfis-adaptive-neuro-fuzzy-inference-systems.html> downloaded on (5/1/2015).
- [32] Joshi, A. , Ramakrishman, N., Houstis, E.N. and Rice, J.R., (1997), "On Neurobiological, Neuro-Fuzzy, Machine Learning, and Statistical Pattern Recognition Techniques", IEEE Transactions on Neural Networks, VOL. 8, NO.1