

**HİYERARŞİK BULANIK ÇIKARSAMA SİSTEMLERİNDE
BULANIKLIĞIN DÜZEYLER ARASI AKTARIMI İÇİN
YÖNTEM ÖNERİSİ**

**A METHOD SUGGESTION FOR TRANSITION OF
FUZZINESS BETWEEN SUBLAYERS IN HIERARCHICAL
FUZZY SYSTEMS**

BEGÜM MUTLU

DOÇ. DR. EBRU A. SEZER

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. HAKAN A. NEFESLİOĞLU

İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YLİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

BEGÜM MUTLU' nun hazırladığı “Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemlerinde Bulanıklığın Düzeyler Arası Aktarımı için Yöntem Önerisi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YLİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL

Başkan

.....

Doç. Dr. Ebru A. SEZER

Danışman

.....

Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

Üye

.....

Doç. Dr. Lale ÖZKAHYA

Üye

.....

Dr. Murat HACIÖMEROĞLU

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YLİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/12/2014

BEGÜM MUTLU

ÖZET

HİYERARŞİK BULANIK ÇIKARSAMA SİSTEMLERİNDE BULANIKLIĞIN DÜZEYLER ARASI AKTARIMI İÇİN YÖNTEM ÖNERİSİ

Begüm MUTLU

YLisans, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ebru A. SEZER

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan A. NEFESLİOĞLU

Aralık 2014, 99 sayfa

Hiyerarşik Bulanık Sistemler çok sayıda girdi parametresi olan karmaşık problemlerin çözümünde bulanık mantık yaklaşımının tek bir bulanık sistemle modellenmesinin uygulanabilir olmadığı durumlarda sıklıkla kullanılan çözümdür. Bu karmaşıklık hem hesaplama maliyeti hem de bulanık kural oluşturmanın zorluğu ile ilişkilidir. Bu çekincelerin üstesinden gelmek adına çok boyutlu tek bir bulanık sistem, daha küçük boyutlu alt sistemlere ayrıştırılır ve bu alt sistemler farklı tasarım stratejileri yardımıyla birbirine bağlanır.

Geleneksel Mamdani tipi bir hiyerarşik bulanık çıkarsamada, çıkarsama adımları her bir alt sistem için uygulanmakta ve elde edilen keskin çıktı üst katmana aktarılmaktadır. Söz konusu keskin çıktı bir sonraki alt sistemde yeniden bulanıklaştırılmaktadır. Ancak gerekli olmadığı halde tekrarlanan bu durulaştırma ve bulanıklaştırma adımları, her durulaştırma-bulanıklaştırma ikilisi verinin bulanıklık seviyesinde bozulmaya sebep olduğundan bilgi kaybı yaratmaktadır. Bu durum hiyerarşik sistemin kendisine karşılık gelen CFS ile eş çıktılar üretmesini engellemektedir. Ayrıca bu sistem, hiyerarşik tasarım stratejisindeki değişimlere karşı da dirençli değildir. Girdi parametrelerinin aldıkları değerler değişmese

bile, hiyerarşik yapıda meydana gelen herhangi bir değişim, sistemin farklı bir çıktı üretmesine yol açmaktadır. Bu durumda hiyerarşik sistem kullanımının avantajlarından yararlanılırken sistem doğruluğu ve kararlılığından ödün verilmektedir.

Bu çalışmada geleneksel hiyerarşik bulanık sistemlerde ortaya çıkan katmanlar arasında hatalı veri aktarımı konusu vurgulanmış ve yeni bir hiyerarşik çıkarsama akışı, Durulaştırmasız Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemi, önerilmiştir. Bu yaklaşıma göre ara katmanlardaki durulaştırma adımları çıkarsama akışından kaldırılmış ve birleştirme adımı çıktısı doğrudan üst katmana taşınmıştır. Bu sayede bir sonraki alt sistem girdisi bulanık olarak alındığından bu alt sistemdeki bulanıklaştırma adımı da gereksiz olması dolayısı ile çıkarsama akışından çıkarılmıştır. Bu sayede bulanık bilginin ilk katmandan en üst katmana kadar doğru bir şekilde aktarımı sağlanmış olur.

Deneyler farklı senaryolar üzerinde gerçekleştirilmiştir: ‘VE’ ve ‘Dışlayan VEYA’ mantıksal problemleri ve Kaya Kütle Puanı (RMR) hesaplama problemi. Bu deneylerde tek bir bulanık sistem ve üç farklı hiyerarşik çıkarsama akışı en doğru çözümün bulunması açısından bu senaryolara uygulanmıştır. Bu hiyerarşik çıkarsama akışlarının karşılaştırmasında tek bir bulanık sistemin çıktıları referans alınmıştır. Çünkü hiyerarşik sistemlerden beklenen en önemli özellik tek bir bulanık sistemin çıktılarına mümkün olduğunca eşit çıktılar üretebilmesidir. Sonuçlar, bir tasarım stratejisine bağlı olmaksızın, CFS davranışlarına en yakın davranışı sergilemesi açısından en doğru veri transferinin önerilen yöntem tarafından yapıldığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hiyerarşik Bulanık Sistemler, Mamdani Tipi Bulanık Çıkarsama, Bulanıklığın Aktarımı.

ABSTRACT

A METHOD SUGGESTION FOR TRANSITION OF FUZZINESS BETWEEN SUBLAYERS IN HIERARCHICAL FUZZY SYSTEMS

Begüm MUTLU

Master of Science, Department of Computer Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Ebru A. SEZER

Co-Supervisor: Doç. Dr. Hakan A. NEFESLİOĞLU

December 2014, 99 pages

Hierarchical Fuzzy Systems are commonly used solutions where performing the fuzzy logic approach by only one fuzzy system is inapplicable for complex problems with a great number of input variables. This complexity is both related with the computational cost and the challenging fuzzy rule creation. In order to overcome these concerns the high dimensional single fuzzy system is separated into lower dimensional sub-systems and these sub-systems are linked by utilizing different design strategies.

During the conventional Mamdani style hierarchical inference, the inference stages are employed on each sub-system and the provided crisp output is transferred to the higher layer. The crisp value in question is fuzzified again in the subsequent sub-system. Nevertheless the redundantly repeated defuzzification and fuzzification stages cause data loss since each defuzzification-fuzzification pair degenerates the fuzziness level of the transferred information. This situation prevents obtaining the same outputs with a single fuzzy system. In addition it is not resistant against the revisions in the hierarchical design strategy. Any altering in the hierarchical structure causes providing different outputs from the system even though the values of input variables are not revised. Therefore while utilizing a hierarchical system, it is compromised on the system's accuracy and stability.

In this study it is emphasized that the data transmission during the conventional hierarchical inference flow is inaccurate and a new hierarchical flow, namely Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System, is proposed. In this approach the defuzzification stages are eliminated from the inference flow in the inner layers and the aggregation result is directly transformed to the upper layer. Since the input of the subsequent sub-system is already fuzzy, the fuzzification stage is also removed due to its redundancy. Thus the fuzzy information is propagated from the first layer to the topmost layer accurately.

The experiments are employed on using different scenarios: logical cases contains ‘AND’, ‘XOR’ and Rock Mass Rating calculation. In these experiments the single fuzzy system and three types of hierarchical fuzzy systems are implemented in order to bring the most accurate solution to these scenarios. The comparisons between the hierarchical flows are employed by using the outputs of single fuzzy system for reference points. Because the most significant requirement of a hierarchical system is providing as much as equal outputs with related single fuzzy system. Results show that the most accurate data transmission is obtained independently from the hierarchical design strategy by using the proposed method since the closest behaviors to the single fuzzy system is procured by this type of hierarchical inference.

Keywords: Hierarchical Fuzzy Systems, Mamdani Type Fuzzy Inference, Transition of Fuzziness.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca ilminden ve tecrübelerinden faydalandığım, göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırla bana her açıdan destek olan danışmanım Sayın Doç. Dr. Ebru A. SEZER' e,

Çalışmama büyük bir özveri ile destekte bulunan eş danışmanım Sayın Doç. Dr. Hakan A. NEFESLİOĞLU' na,

Tez savunmam sırasındaki değerli yorumları ve önerileri sebebiyle jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL' a, Sayın Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU' na, Sayın Doç. Dr. Lale ÖZKAHYA' ya, Sayın Dr. Murat HACİÖMEROĞLU' na,

Başta bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Hayri SEVER olmak üzere yüksek lisans eğitimimi aldığım Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği' nin tüm akademik ve idari çalışanlarına,

Desteğini benden hiçbir zaman, hiç bir konuda esirgemeyen ablam Sayın Uzm. Dr. Bengü MUTLU SARIÇİÇEK' e,

Benim için yaptıkları büyük fedakârlıklarla başarılarımın en büyük kaynağı olan anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALAN BİLGİSİ.....	5
2.1. Bulanık Mantık.....	5
2.2. Bulanık Çıkarıma	8
2.2.1. Bulanık Çıkarıma Sistemleri	8
2.2.2. Bulanık Çıkarıma Türleri	9
2.2.3. Bulanık Sistem Bileşenleri	11
2.3. Hiyerarşik Bulanık Sistemler.....	14
2.3.1. Geleneksel Hiyerarşik Bulanık Sistemler (conHFS).....	17
2.3.2. Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemler (HCTFS)	19
3. ALANYAZIN ÖZETİ.....	23
4. DURULAŞTIRMASIZ HİYERARŞİK BULANIK ÇIKARSAMA SİSTEMİ.....	26
5. DENEYLER VE SONUÇLARI.....	30
5.1. Mantıksal ‘VE’ Problemi için Deneyler.....	31
5.1.1. Mantıksal ‘VE’ Problemi için CFS Çözümü.....	31
5.1.2. Mantıksal ‘VE’ Problemi için conHFS Çözümü.....	33
5.1.3. Mantıksal ‘VE’ Problemi için HCTFS Çözümü	35
5.1.4. Mantıksal ‘VE’ Problemi için DF-HFS Çözümü	38
5.2. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için Deneyler.....	41
5.2.1. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için CFS Çözümü.....	41

5.2.2. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için conHFS Çözümü.....	43
5.2.3. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için HCTFS Çözümü	46
5.2.4. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için DF-HFS Çözümü	48
5.3. Mantıksal ‘VE’ ve ‘Dışlayan VEYA’ için Deney Sonuçları.....	51
5.4. RMR Problemi için Deneyler	52
5.4.1. RMR Problemi için Bulanık Kuralların Oluşturulması.....	56
5.4.2. RMR Problemi için CFS Çözümü	58
5.4.3. RMR Problemi için HFS Çözümü.....	59
5.4.4. RMR Problemi için Deney Sonuçları	62
6. SONUÇ.....	65
KAYNAKLAR.....	68
EKLER	71
EK1: RMR Problemi için Kullanılan Sözel Değişkenlere Ait Üyelik Fonksiyonları	71
EK2: Kaya Kütle Puanı Sistemi (Kaya Kütlelerinin Jeomekanik Sınıflandırması)	73
EK3: Tez Çalışması Sonucunda Yayınlanması Planlanan Makale Taslak Metni	75
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Bir Bulanık (kural-tabanlı) Sistem için Kanonik Form [15]	9
Çizelge 5.1. Dört Girdi Değişkenli Mantıksal ‘VE’ Problemi için CFS Kuralları.....	32
Çizelge 5.2. Dört Girdili ‘VE’ Problemi için CFS Çözümü (Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları)	32
Çizelge 5.3. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	34
Çizelge 5.4. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,2}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	34
Çizelge 5.5. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	34
Çizelge 5.6. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde HCTFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları ile (y^D ve y^Y) Değerleri.....	38
Çizelge 5.7. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	40
Çizelge 5.8. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki $SFS_{1,2}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	40
Çizelge 5.9. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları	40
Çizelge 5.10. Dört Girdi Değişkenli Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ için CFS Kuralları	42
Çizelge 5.11. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için CFS Çözümü (Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları).....	42
Çizelge 5.12. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	44
Çizelge 5.13. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,2}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	45
Çizelge 5.14. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	45
Çizelge 5.15. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde HCTFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları ile (y^D ve y^Y) Değerleri	48
Çizelge 5.16. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	50

Çizelge 5.17. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS _{1,2} için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları	50
Çizelge 5.18. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS _{2,1} için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları	50
Çizelge 5.19. Hiyerarşik Sistemlerin CFS’ ye Kıyasla RMSE Değerleri	52
Çizelge 5.20. Süreksizlik Koşulları Sözel Değişkenleri.....	53
Çizelge 5.21. Diğer RMR Parametrelerine Karşılık Gelen Sözel Değişkenler	54
Çizelge 5.22. RMR Çıktı Sözel Değişkenleri.....	57
Çizelge 5.23. Hiyerarşik Modellerin AHFS ile Modellenmesi Durumunda Geleneksel RMR Hesaplama Yöntemi ve CFS’ in Ayrı Ayrı Referans Alınması Sonucunda Yapılan Karşılaştırma Sonuçları	63
Çizelge 5.24. Hiyerarşik Modellerin İki Katman ve Üç Alt Sistem ile Modellenmesi Durumunda Geleneksel RMR Hesaplama Yöntemi ve CFS’ in Ayrı Ayrı Referans Alınması Sonucunda Yapılan Karşılaştırma Sonuçları	64
Çizelge 5.25. RMR Problemi Üzerinde Uygulanan Bulanık Sistemlerin Hesaplama Zamanları.....	64

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Klasik ve Bulanık Mantık Kümelerinin Ateş Sözel Değişkenine Bağlı “Şiddetli” Kümesi için Gösterimi.....	6
Şekil 2.2. Yamuk (solda) ve Gauss (sağda) Tipi Üyelik Fonksiyonlar	7
Şekil 2.3. Üyelik Fonksiyonları Üzerinde Temel İşlemler	8
Şekil 2.4. Mamdani Tipi Bulanık Çıkarsamanın Genel Yapısı [23]	12
Şekil 2.5. Sıklıkla Kullanılan Durulaştırma Yöntemleri [15].....	13
Şekil 2.6. CFS ve Chung ve Duan’ ın Sınıflandırmasından [7] Alıntı HFS Örnekleri	16
Şekil 2.7. conHFS	18
Şekil 2.8. Çift Sayıdaki Girdi Değişkeni için AHFS [10]	20
Şekil 4.1. DF-HFS	26
Şekil 5.1. Mantıksal Problemler için Geliştirilen 4 (solda) ve 6 (sağda) Girdi Parametresine Sahip Hiyerarşik Bulanık Sistemler	30
Şekil 5.2. Mantıksal Problemlerde Kullanılan Girdi (solda) ve Çıktı (sağda) Sözel Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları.....	30
Şekil 5.3. CFS Çıkarsama Akışında Birleştirme Adımı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı	33
Şekil 5.4. conHFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı	35
Şekil 5.5. Dört girdili ‘VE’ Problemi için HCTFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Bu kümenin Durulaştırılması.....	38
Şekil 5.6. DF-HFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı	41
Şekil 5.7. CFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı	43
Şekil 5.8. conHFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı	45
Şekil 5.9. HCTFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Bu Kümenin Durulaştırılması	48
Şekil 5.10. DF-HFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi.....	51
Şekil 5.11. RMR Çıkarsama Problemi için CFS Mimarisi	58
Şekil 5.12. RMR Çıkarsama Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde conHFS.....	59
Şekil 5.13. RMR Çıkarsama Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde HCTFS	60

Şekil 5.14. RMR Çıkarsama Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde DF-HFS 61

SİMGELER VE KISALTMALAR

CFS	: Geleneksel Bulanık Sistem (Conventional Fuzzy System)
HFS	: Hiyerarşik Bulanık Sistem (Hierarchical Fuzzy System)
conHFS	: Geleneksel Hiyerarşik Bulanık Sistem (Conventional Hierarchical Fuzzy System)
AHFS	: Hiyerarşik Bulanık Sistemin Alternatif Modeli (Alternative Model of Hierarchical Fuzzy System)
HCTFS	: Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemler (Hierarchical Classifying-Type Fuzzy System)
DF-HFS	: Durulaştırmasız Hiyerarşik Bulanık Çıkarılma Sistemi (Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System)
SFS	: Alt Bulanık Sistem (Sub-Fuzzy System)
RMSE	: Karesel Hata Ortalamalarının Karekökü (Root Mean Square Error)
R^2	: R Kare (R Square)
VAF	: Varyansın Nedeni (Variance Accounted For)
RMR	: Kaya Kütle Puanı (Rock Mass Rating)
UCS	: Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)
RQD	: Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designation)
x	: Süreksizlik Aralığı (Spacing of Discontinuities)
GW	: Yeraltı Suyu Koşulu (Groundwater Condition)
l	: Süreksizlik Devamlılık (Persistence of Discontinuities/Trace Length)
a	: Süreksizlik Açıklık (Aperture)
r	: Süreksizlik Pürüzlülük (Roughness of Discontinuities)
fill	: Süreksizlik Dolgu (Filling Material,)
w	: Bozunma (Weathering)

1. GİRİŞ

Bulanık mantık, belirsizlik içeren problemlerin çözümünde yetersiz kalabilen klasik mantık yaklaşımına, daha geniş ve çok boyutlu bir çerçeveden bakabilmeyi sağlayan bir düşünce akımıdır. Bu akıma göre klasik mantıktaki keskin çizgiler, yerini sınırları bulanıklaştırılmış kümelerle bırakmaktadır. Bulanık çıkarsama sistemleri ise genel bir ifade ile kural tabanlı çıkarsamanın bulanık küme ya da bulanık mantık yaklaşımı ile genişletilmesidir. Bu sistemlerden çeşitli problemler için oluşturulmuş otomatik kontrol sistemleri, karar destek sistemleri, uzman sistemler gibi yapay zekâ tabanlı sistem tasarımlarında faydalanmak mümkündür. Ancak üzerinde durulan problemi tek bir sistem ile çözmek, problemler karmaşık hale geldikçe zorlaşmakta ve hatta imkânsız hale gelmektedir. Burada belirtilen karmaşıklık yapısal, mantıksal ve maliyet açısından düşünülmekte ve bu karmaşıklığın temel sebebi olarak girdi parametrelerindeki artış gösterilmektedir. Çünkü girdi parametrelerindeki artış, sözel değişkenlere ait bulanık kümelerin birbiri ile ilişkilerinin kontrolünü zorlaştıracığı gibi bulanık kuralların yazılmasını da güçleştirecektir. Bu artış aynı zamanda, tüm bir sistemin geliştirilmesi için gerekli kural sayısını arttıracak ve kuralların her birinin yapısını da karmaşıklataştıracaktır. Çünkü yazılacak kuralların içerisindeki sözel değişkenlerin tümünün kontrol altında ve birbiri ile sağlam bir ilişki içinde olması gerekir. Aksi durumda birbiri üzerindeki etkisi bilinmeyen veya birbirinden tümüyle bağımsız sözel değişkenleri içeren kuralların yazımı sistem doğruluğu açısından risklidir. Ayrıca tüm bu durumlar çıkarsamanın hesaplama maliyetini de ciddi bir şekilde arttırmaktadır. Belirtilen yapısal, mantıksal ve maliyet karmaşıklığı göz önüne alındığında karmaşık problemler için bulanık çıkarsamanın tek bir sistem ile doğru ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Tez çalışması kapsamında bu karmaşık yapıdaki problemin tek bir bulanık sistem ile çözümü Geleneksel Bulanık Çıkarsama Sistemi (Conventional Fuzzy System, CFS) olarak ifade edilmektedir.

CFS'lerin oluşturulması ve işletilmesindeki kısıtlar, karmaşık sistemlerin daha basit alt sistemlere ayrıştırılmasını hedefleyen Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemleri' nin (Hierarchical Fuzzy System, HFS) önerilmesini sağlamıştır. Bu sistemler tüm bir CFS ile aynı işlevi görecektir şekilde, sistemin daha küçük boyutlu alt sistemlere ayrıştırılmasını ve bu alt sistemlerin birbirine hiyerarşik bir yapıda bağlanarak çıkarsama akışını yönetmesini sağlarlar. Alt sistemlerdeki, girdi parametrelerindeki ve kural sayısındaki azalış, bu sistemlerin oluşturulmasını, anlaşılmasını ve işletilmesini kendisine eşdeğer CFS'ye

nazaran çok daha kolay hale getirmektedir. Geleneksel Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemi (Conventional Hierarchical Fuzzy Inference System, conHFS) açısından, Mamdani tipi bir çıkarsama [1] için, alt sistemlerin her birine çıkarsama adımlarının tamamı uygulanmakta ve bunlardan elde edilen keskin çıktı değeri bir üst katmandaki alt sisteme girdi olarak sunulmaktadır. Günümüze kadar birçok çalışmada CFS kullanımının uygulanabilir olmadığı senaryolar için bu geleneksel hiyerarşik bulanık çıkarsama akışından yararlanılmış ve bütün bir sistemin daha küçük boyutlu alt sistemlere ayrıştırılması uygulamada kolaylıklar sağladığı için tercih edilmiştir [2][3][4][5][6].

HFS'lerin giderek artan kullanımı, etkili ve kararlı HFS modellemenin gerekliliği konusunda tartışmalar başlatmıştır. Çünkü değişen girdi sırası veya mimarideki küçük ya da büyük ölçekli farklılıklar hiyerarşik sistemden elde edilen çıktının değişmesine sebep olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak hiyerarşik sistemin etkili modellenmesi ve en doğru çıktıyı üretmesi için farklı teknikler geliştirilmiş ve söz konusu problemler için özelleşmiş mimariler ortaya koyulmuştur [7][8][9][10][11]. Ayrıca geliştirilen mimariler, genel olarak girdi parametrelerinin sırasından en az etkilenecek şekilde oluşturulmuş ve bu sayede kararlılık gereksinimi karşılanmaya çalışılmıştır [10][12]. Ancak ideal durumda hiyerarşik bir sistemin yalnızca girdi değerlerinin sırasındaki değişimlere karşı dirençli olması yetmez; mimarideki farklılıklara karşı da kararlı davranması gerekir. Üzerinde durulan her problem için en doğru çıktıyı üretecek şekilde yeni ve özelleşmiş bir mimari geliştirilmesi etkili bir çözüm olmayacaktır. Bu durumda 'en doğru çıktının' doğru bir şekilde tanımlanabilmesi gerekir. Ancak bu gereksinimi karşılamak belirsizlik içeren problemler için oldukça zordur.

Hiyerarşik sistemlerin geleneksel yöntem olan conHFS ile çözümünde ortaya çıkan kararsızlık problemi sistemin doğru bir akış ile çözülmediğinin göstergesidir. Esasında bir hiyerarşik sistemin kendisine eşdeğer CFS ile aynı çıktıları üretmesi gerekmektedir. Çünkü hiyerarşik sistemlerin temel amacı CFS işleyişindeki maliyet olumsuzluklarını ve kural oluşturma güçlüklerini taşımadan, her durumda CFS davranışlarını sergileyebilmektir. Bu sayede hiyerarşik sistemlerin kararlı çıktı üretmesi kaçınılmazdır.

Hiyerarşik sistemlerdeki kararsız ve hatalı çıktı üretiminin sebebi conHFS akışında katmanlar arasındaki hatalı veri aktarımıdır. Çünkü alt sistemlerden elde edilen her bir keskin sonuç değeri, bulanıklığın bozulması sonucunda elde edilmekte ve üst katmana

hasarlı bilginin aktarımı yapılmaktadır. Bir başka deyişle, katmanlar arasında veri aktarımının olduğu her noktada, verideki bulanıklık seviyesi bozulur ve bu bozulma üst katmanlara kadar artarak devam eder. Bulanıklık seviyesindeki bu bozulma bilgi kaybına sebep olmaktadır. Bu durumda elde edilen nihai çıktı eşdeğer CFS' den elde edilen çıktıdan farklılık göstermektedir. Sonuç olarak tek bir CFS' nin kullanımının dezavantajlarından kaçınılırken, conHFS ile de bilgi kaybından kaynaklı hatalı çıktılar elde edilmektedir. Mimarideki değişimler sonucunda da katmanlar arasındaki bulanıklık seviyesinin farklı ölçülerde bozulması sistemlerin kararsız çıktılar üretmesine sebep olmaktadır. Bu durum, CFS ile de çözümü mümkün olan ancak hesaplama maliyetinden dolayı uygulanabilir olmayan senaryolar için CFS mimarisinden HFS' ye geçişte çekincelere sebep olmaktadır. Esasında bir HFS' den beklenen daha düşük maliyetle ve daha basit yapıdaki sistemlerin kullanımı ile CFS doğruluğunda çıkarsama yapabilmektir. Çünkü sistem çıktılarının doğruluğu en az maliyet kadar önemli bir parametredir. CFS ile modellenemeyen sistemler içinse oluşan bilgi kaybı ölçülemediğinden aslında var olan bu probleme karşı farkındalık gelişmemiştir. Ancak her durumda, her problem için bu bilgi kaybı küçük veya büyük çapta mevcuttur.

Geleneksel yaklaşım olan conHFS' de meydana gelen ve sistemde yanlgı ve kararsızlığa yol açan katmanlar arası bilgi aktarımı konusu bu tez çalışmasının üzerinde durduğu ana problemdir. Burada, katmanlar arasında transfer edilen veri üzerindeki bozulmaların hiyerarşik sistem çıktısı üzerindeki olumsuz etkisi, yapılan deneylerle incelenmiştir. Bu durumun sonucu olarak bu tezin hedefi katmanlar arası veri aktarımının etkili ve doğru bir şekilde yapılmasına olanak veren yeni bir çıkarsama akışı geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen Durulaştırmasız Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemi (Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System, DF-HFS) Mamdani tipi bir hiyerarşik çıkarsamada bulanıklığın ara adımlarda bozulmasını engellemekte ve katmanlar arasında keskin veri yerine bulanıklığın taşınmasını sağlamaktadır. Bu durumda da bulanıklığın nasıl ve hangi ifade şekliyle taşınacağına yönelik tartışmalar çözüme kavuşturulmuştur.

Performans değerlendirmesi için üç farklı problem üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir: 4 ve 6 girdili mantıksal 'VE' ve 'Dışlayan VEYA' kapıları ile Kaya Kütle Puanı (Rock Mass Rating, RMR). Mantıksal kapılar ile RMR problemleri birbirinden oldukça farklı olmakla birlikte; önemli bir ortak özellikleri nedeni ile önerilen çözümün deney senaryoları içinde

yer almışlardır. Bu ortak özellik tez çalışmasının amacı ile doğrudan ilişkili olmak üzere her bir problemin tek bir bulanık sistem ile çözümünün mümkün olmasıdır. Çünkü katmanlar arası veri transferinin doğruluğu tek bir sistem ile gerçekleştirilen çözüm referans alınarak ölçülmüştür. Mantıksal problemler geliştirilen DF-HFS akışının bulanıklığı doğru bir şekilde transfer ettiğini göstermek için yeterli ve uygundur. Çünkü girdi parametrelerinin sayısı kaç olursa olsun, bu problemler için CFS kurallarına eşdeğer HFS'leri tam ve doğru bir şekilde geliştirmek oldukça kolaydır. RMR ise CFS ile modellenebilen ancak CFS ile çözümü çıkarsamanın maliyeti açısından uygulanabilir olmayan bir problemdir. Ayrıca bu problem için CFS ile eşdeğer kurallara sahip HFS'ler geliştirilemediğinden, bu olumsuzluğun DF-HFS performansı üzerindeki etkisini de ölçmek mümkün olmuştur. Performans ölçümlerinde CFS çıktıları referans kabul edilmek üzere, farklı hiyerarşik çıkarsama akışlarının doğruluğu Karesel Hata Ortalamalarının Karekökü (Root Mean Square Error, RMSE), R Kare (R Square, R^2) ve Varyansın Nedeni (Variance Accounted For, VAF) yöntemleri ile hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda DF-HFS tipi akışın CFS performansına en yakın davranışı gösterebildiği sonucuna varılmış, bu durumun sebepleri tartışılmış ve katmanlar arasındaki veri aktarımının doğru bir şekilde yapılmasının avantajları sunulmuştur.

Tez metninin ana hatlarıyla yapılaşması şu şekildedir: İkinci bölümde bulanık mantık, bulanık çıkarsama sistemleri, bileşenleri ve türleri, hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemleri ve hiyerarşik sistemlerin çözümü için geliştirilmiş yöntemler hakkında bir alan bilgisi verilmiştir. Ardından hiyerarşik sistemler ve bu sistemler ile ilgili temel nitelik ve yaklaşımları ön plana çıkaran bir alanyazın özeti sunulmuştur. Devamında, geliştirilen DF-HFS tipi hiyerarşik çıkarsamaya ayrıntıları ile yer verilmiştir. Ardından DF-HFS çözümü çıktılarının mevcut hiyerarşik çıkarsama yöntemlerinin çıktıları ile karşılaştırılması için yapılan deneyler verilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. ALAN BİLGİSİ

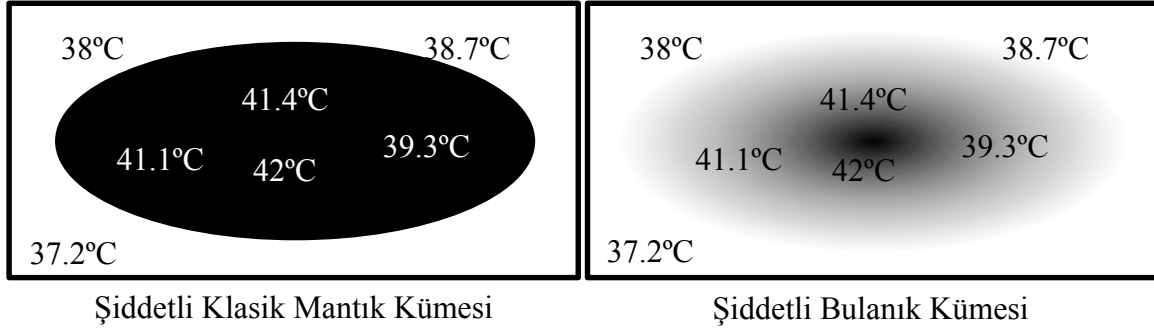
2.1. Bulanık Mantık

Elea okulu ve sofistler tarafından temelleri atılan ve ancak MÖ 384-322 yılları arasında bir disiplin haline gelen mantık biliminin kurucusu Aristo' dur [13]. Aristo, Organon adlı altı ciltlik eserinde klasik mantık yaklaşımını; kavramlar, hükümler, akıl yürütmeler, çeşitli ispat şekilleri ve kıyas üzerinde durarak oluşturmuş ve yorumlamıştır [13]. Aristo mantığında varlık kendisine özdeştir, başka bir varlığa eşit ya da özdeş olamaz. Ayrıca varlık çelişmez niteliktedir ve ara durumların varlığı söz konusu değildir. Aristo önderliğinde başlayan ve Stoacılar gibi düşünce grupları tarafından da özelleştirilerek sürdürülen klasik mantık, asırlarca tüm dünyada tek otorite olarak hüküm sürmüştür [13].

Lütfi Aliasker Zade [14] tarafından 1965 yılında önerilen ve Aristo' nun klasik mantık yaklaşımını genişleten bulanık mantık, doğadaki birçok problemin ve insan düşünce yapısının belirsizlik içerdiğini ve klasik mantığın bu belirsizliği tanımlamada yetersiz kaldığını savunur. Bulanık mantığa göre klasik mantığın temelini oluşturan varlığın özdeşliği, çelişmez niteliği ve ara durumların olmazlığı ilkeleri bulanık mantıkta farklılaşmıştır. Bu doğrultuda klasik mantıkta bir varlık bir kümenin elemanı olup olmama konusunda iki değer (elemanıdır veya elemanı değildir) alırken, bulanık mantıkta bir nesne bir kümeye belirli bir aidiyet derecesinde aittir ve bu aidiyet derecesi sonsuz sayıda değer alabilir. Yani bulanık kümeler, klasik kümelerin genişletilmesi ve belirsizleştirilmesi ile oluşturulmuş yapılardır. Ayrıca bir varlığın yalnızca bir kümenin elemanı olmasını savunan klasik mantık, bulanık mantıkta yerini bir varlığın belirli derecelerde, birden fazla kümenin elemanı olabileceği şeklinde bir yaklaşıma bırakmıştır. Bu doğrultuda klasik mantıkta reddedilen ara değerler, bulanık mantığın önemli bir unsuru olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bulanık mantık yaklaşımında bir nesnenin belirli bir problem için oluşturulmuş ve değeri sözel olarak ifade edilebilir olan değişkenlerine sözel değişken ismi verilmiştir (örnek: ateş). Bulanık kümeler ise bir sözel değişkenin alabileceği değerleri tanımlayan alt sınıfların her birine verilen isimdir ve bu kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanır (örneğin ateş sözel değişkeni bulanık kümeleri: şiddetli ve normal). Şekil 3.1' de vücut sıcaklığını belirten "ateş" sözel değişkeni için oluşturulan "şiddetli" bulanık kümesi görsel olarak ifade edilmektedir. Buna göre klasik mantık yaklaşımında "şiddetli" sınıfına dahil

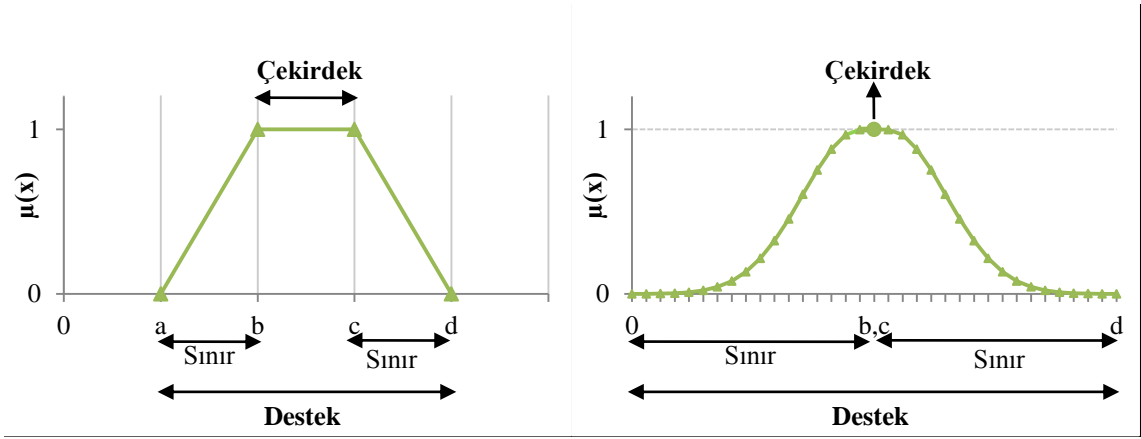
edilmeyen birçok ateş değeri bulanık mantıkta belirli bir derecede bu sınıfın elemanı haline gelmiştir. Bununla birlikte klasik mantıkta “şiddetli” sınıfına dahil edilen bir dizi değer, bulanık mantık yaklaşımında “şiddetli” kümesinin yanı sıra onu tümleyen “normal” kümesine de belirli bir derecede aittir.



Şekil 2.1. Klasik ve Bulanık Mantık Kümelerinin Ateş Sözel Değişkenine Bağlı “Şiddetli” Kümesi için Gösterimi

Daha önce de belirtildiği gibi sözel değişkenlere ait bulanık kümelerin ifade edilmesinde üyelik fonksiyonlarından yararlanılmaktadır. Üyelik fonksiyonları çekirdek, sınır ve destek bölgelerinden oluşurlar [15]. Çekirdek bölgesi, bir A bulanık kümesinin aidiyet derecesinin 1 olduğu durumdaki ($\mu_A(x) = 1$) tüm değerlerin bulunduğu bölgedir. Bu bölgede bulanıklığın derecesi sıfırdır. Destek bölgesi bir bulanık kümenin 0’ dan büyük tüm derecelerinin bulunduğu bölgeyi ($\mu_A(x) > 0$) ifade eder. Bu bölgedeki her bir değer ilgili bulanık kümeye belirli bir derecede aittir. Son olarak sınır bölgesi ise bir bulanık kümeye olan aidiyet derecesi 0 ile 1 aralığında olan ($1 > \mu_A(x) > 0$) tüm değerleri kapsayan kısımdır. Bulanıklık bu bölgededir. Şekil 2.2’ de sıklıkla kullanılan iki tür üyelik fonksiyonu olan yamuk ve Gauss tipi üyelik fonksiyonlarına ve bunları oluşturan çekirdek, sınır ve destek bölgelerine yer verilmiştir. Yamuk üyelik fonksiyonlarında b ve c noktalarının birbirine eşit olması halinde bu üyelik fonksiyonu üçgen üyelik fonksiyonu olarak adlandırılır.

Üyelik fonksiyonları ile tanımlanan bulanık kümeler, klasik kümelerde olduğu gibi kesişim, birleşim, tümleyen, kapsama ve altküme, kartezyen çarpım işlemlerine maruz kalabilirler. Şekil 2.3’ te iki adet üçgen üyelik fonksiyonunu üzerindeki işlemlerin birkaçına yer verilmiştir.



Şekil 2.2. Yamuk (solda) ve Gauss (sağda) Tipi Üyelik Fonksiyonlar

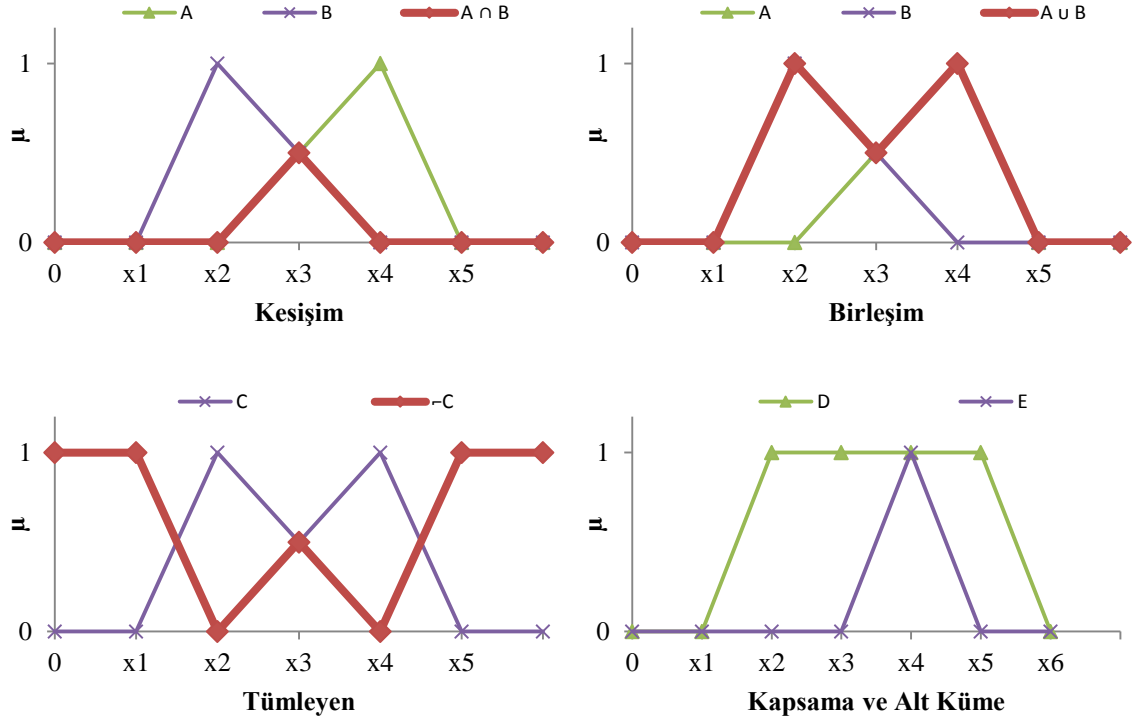
Kesişim: A ve B birer bulanık küme ve $A \cap B$ bu iki kümenin kesişimini ifade etmek üzere $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$ olarak veya $\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$ şeklinde tanımlanır.

Birleşim: A ve B birer bulanık küme ve $A \cup B$ bu iki kümenin birleşimini ifade etmek üzere $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ olarak veya $\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ şeklinde tanımlanır.

Tümleyen: Bir C bulanık kümesinin tümleyeni $\neg C$ (veya \bar{C}) şeklinde gösterilip $\mu_{\neg C}(x) = 1 - \mu_C(x)$ şeklinde tanımlanır.

Kapsama ve Alt Küme: Bir D bulanık kümesi E bulanık kümesini ancak ve ancak x' in tüm değeri için D kümesine aidiyet derecesi E kümesine aidiyet derecesinden küçük ise ($D \subseteq E \Leftrightarrow \mu_D(x) \geq \mu_E(x)$) kapsar. Bu durumda E kümesi D' nin alt kümesidir.

Kartezyen Çarpım: F ve G bulanık kümeleri sırasıyla U ve U' uzayında tanımlı olmak üzere bu iki kümenin kartezyen çarpımı ($U \times U'$) uzayında bir bulanık kümeyi ($F \times G$) ifade eder. Matematiksel olarak $\mu_{A \times B}(x,y) = \min(\mu_F(x), \mu_G(y))$ şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.3. Üyelik Fonksiyonları Üzerinde Temel İşlemler

2.2. Bulanık Çıkarsama

2.2.1. Bulanık Çıkarsama Sistemleri

Bilgisayar sistemlerinde öğrenme iki şekilde yapılabilir. Bunlardan birisi makine öğrenmesi bilim dalında da temel kabul edilen veri ile öğrenme; diğeri ise uzman görüşüne dayalı öğrenmedir. Herhangi bir problemin çözümünde elde veri olması halinde makine öğrenmesi teknikleri ile gerekli çıkarsama işlemlerini yapmak mümkündür. Verinin yeterli ve kaliteli olması halinde istatistiki yöntemlerin de harmanlanması ile yüksek doğruluklarla öğrenme gerçekleştirilir. Buna göre eldeki verinin kalitesi, doğruluğu ve örnekleme başarısı kullanılacak olan makine öğrenmesi tekniğinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu kısıt dolayısıyla mevcutta veri olmadığı veya verinin yeterince kararlı sonuçlar doğurmadığı durumlarda, problemin çözümüne ulaşabilmek adına, uzman görüşünden yararlanılan öğrenme teknikleri kullanılmaktadır.

Bulanık çıkarsama sistemleri, bulanık mantık yaklaşımının modellenmesi için kullanılan, girdilerin tümünü çıktılarının tümü ile ilişkilendirecek kuralları ve kümeleri barındıran sistemler olarak tanımlanabilir. Öğrenme sürecinde veriye değil uzman görüşüne ihtiyaç

duyarlar. Bu özellikleri ile sezgisel çözüm olarak değerlendirilirler. Otomatik kontrol sistemleri, karar destek sistemleri, uzman sistemler gibi birçok yapay zekâ tabanlı sistem tasarımlarında bulanık sistemlerden yararlanılmaktadır.

Bulanık çıkarsama sistemleri uzman görüşünü, bulanık kurallar vesilesi ile içerisinde barındırmaktadır. Bu kurallar, bilgisayar sistemlerince matematiksel olarak ifade edilip yorumlanıyor olsa da sistem kullanıcıları, kuralları insan algısına hitap edecek şekilde oluşturabilmektedirler. Bu sayede problemin çözümü için kullanılacak uzman kişilerin, bu kuralları Çizelge 2.1’ deki gibi doğal dil ifadeleri ile yazmaları sağlanmış olur.

Çizelge 2.1. Bir Bulanık (Kural-Tabanlı) Sistem için Kanonik Form [15]

Kurallar						
Kural 1	:	EĞER	Koşul	K^1	İSE	Sonuç S^1
Kural 2	:	EĞER	Koşul	K^2	İSE	Sonuç S^2
		⋮				
Kural n	:	EĞER	Koşul	K^n	İSE	Sonuç S^n

Çizelge 2.1’ de “Koşul” olarak adlandırılan kısım, girdi niteliğindeki sözel değişkenin ve bu girdinin ait olduğu bulanık kümenin mantıksal ifadesini içerirken; “Sonuç” olarak adlandırılan kısım çıktı sözel değişkeninin hangi bulanık kümeye ait olacağını ifade etmektedir. İfadelerin koşul ve sonuç kısımlarında, problemin karakteriyle bağlantılı olarak birden çok sözel değişken ile ilgili mantıksal ifadeler yazılabilir. Bu hallerde ifadenin bütünlüğü açısından mantıksal operatörler (ve (and), veya (or), değilse (else)) bu çoklu ifadeleri birbirine bağlamak için kullanılır.

2.2.2. Bulanık Çıkarsama Türleri

Bulanık çıkarsamanın üzerinde kurgulandığı mantık ve temel nitelikleri sabit kalmak üzere çıkarsamanın temel bileşenleri ve adımları bazı durumlarda küçük farklılıklar gösterebilmektedir. Bu küçük farklılıklar sistem çıktılarını doğrudan etkiler ve yöntemlerde çeşitlilik sağlar. Bulanık çıkarsama sistemlerinin, oluşturulan kuralların sonuç kısımlarının yapısına göre sınıflandırılması sonucunda üç temel çıkarsama stratejisi oluşturulmuştur [11]: Mamdani [1], Takagi Sugeno Kang (TSK) [16][17] ve Tsukamoto [18].

Mamdani tipi bulanık çıkarsama sistemleri [1] ilk olarak 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından bir miktar sözel değişkenin kullanımı ile buhar motoru ve kazan bileşimini kontrol etmek için geliştirilmiştir. Bu tip çıkarsamada kuralların oluşturulmasında insan algısı ön plandadır. Bu yüzden kural yazımında doğal dilin etkileri mevcuttur. x ve y girdi sözel değişkenleri; z çıktı sözel değişkeni ve A , B , C bulanık kümeler olmak üzere bu tip çıkarsamanın kural yapısı "EĞER $x = A$ ve $y = B$ İSE $z = C$ " şeklindedir.

Mamdani tipi bulanık çıkarsamada kuralların hem koşul hem de sonuç kısımları dil ile doğrudan ilişkili ve bulanıktır. Kullanılan girdi sözel değişkenleri öncelikle bulanıklaştırmaya tabi tutulur. Ardından çıkarsama adımı ve birleştirme adımları uygulanır. Kuralların sonuç kısımlarının bulanıklığının bir sonucu olarak çıkarsama akışında sonuç bulanık kümenin belirli bir keskin değere dönüştürülmesi problemi ortaya çıkmış olur ve bu durumun çözümü için bu tip çıkarsamada, diğer türlerden farklı olarak durulaştırma adımı gerçekleştirilmiştir.

TSK bulanık çıkarsama sistemleri [16][17] verilen girdi ve çıktı setlerinden bulanık kuralları oluşturabilen sistematik bir yaklaşım geliştirmek adına Takagi, Sugeno ve Kang tarafından önerilmiştir. Bu tip çıkarsamada, bulanık kuralların koşul kısımları bulanıkken sonuç kısımları girdi sözel değişkenlerine bağımlı keskin bir fonksiyondur. x ve y girdi sözel değişkenleri; z çıktı sözel değişkeni ve A , B , C bulanık kümeler olmak üzere bu tip çıkarsamanın kural yapısı "EĞER $x = A$ ve $y = B$ İSE $z = f(x, y)$ " şeklindedir. TSK çıkarsama, sonuç fonksiyonun derecesine göre sınıflandırılabilir (birinci derece, sıfıncı derece). Nihai çıktının elde edilmesinde çoğunlukla ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılır. Bunun yanında hesaplama karmaşıklığını düşürmek ve işlemleri basitleştirmek adına ağırlıklı toplam yönteminden de yararlanan çalışmalar mevcuttur [19].

Tsukamoto bulanık çıkarsama sistemleri, sonuç kısımları monoton üyelik fonksiyonları olan kurallar içermektedirler. x ve y girdi sözel değişkenleri; z çıktı sözel değişkeni; A , B , bulanık kümeler ve c^1 keskin bir değer olmak üzere bu tip çıkarsamanın kural yapısı "EĞER $x = A$ ve $y = B$ İSE $z = c^1$ " şeklindedir. Bir başka deyişle bu tür çıkarsama için kullanılan kuralların koşul kısmı bulanık iken sonuç kısımları keskin değerlerdir. Her bir kuralın sonucunun ağırlıklı ortalaması alınarak nihai çıktıya erişilir.

Bulanık çıkarsamada kullanılacak olan yöntemin belirlenmesi, kararlı ve etkili bir model ortaya koyabilmek açısından çok önemlidir. Bu doğrultuda bu türleri karşılaştıran, birbirlerine göre üstünlüklerini ve farklılıklarını tartışan çok sayıda çalışma mevcuttur [20][21]. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, problemin girdi ve çıktı sayısına, yapısına ve özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ancak genel olarak Mamdani tipi çıkarsamanın insan algısına ve doğal dile yakınlığı, kullanım kolaylığı sağlaması açısından tercih edilirken, durulaştırma adımı dolayısıyla hesaplaması daha maliyetlidir. Buna karşı TSK çıkarsamada kural oluşturmak ve kuralları sistematik bir yapıda sunmak Mamdani tipi çıkarsamadan daha güçtür. Ancak hesaplamalar ve matematiksel analizler için uygun oluşu, durulaştırma adımına ihtiyaç duymaması sebebiyle hesaplama maliyetini oldukça düşürmesi bu yöntemin güçlü özellikleridir. Bunlardan farklı olarak Tsukamoto tipi bulanık çıkarsama, Mamdani ve TSK kadar şeffaf bir yöntem olmadığından uygulamalarda daha az tercih edilmektedir [11]. Tez çalışması kapsamında kullanılan bulanık sistemler Mamdani tipi çıkarsama üzerinden gerçekleştirilmiştir.

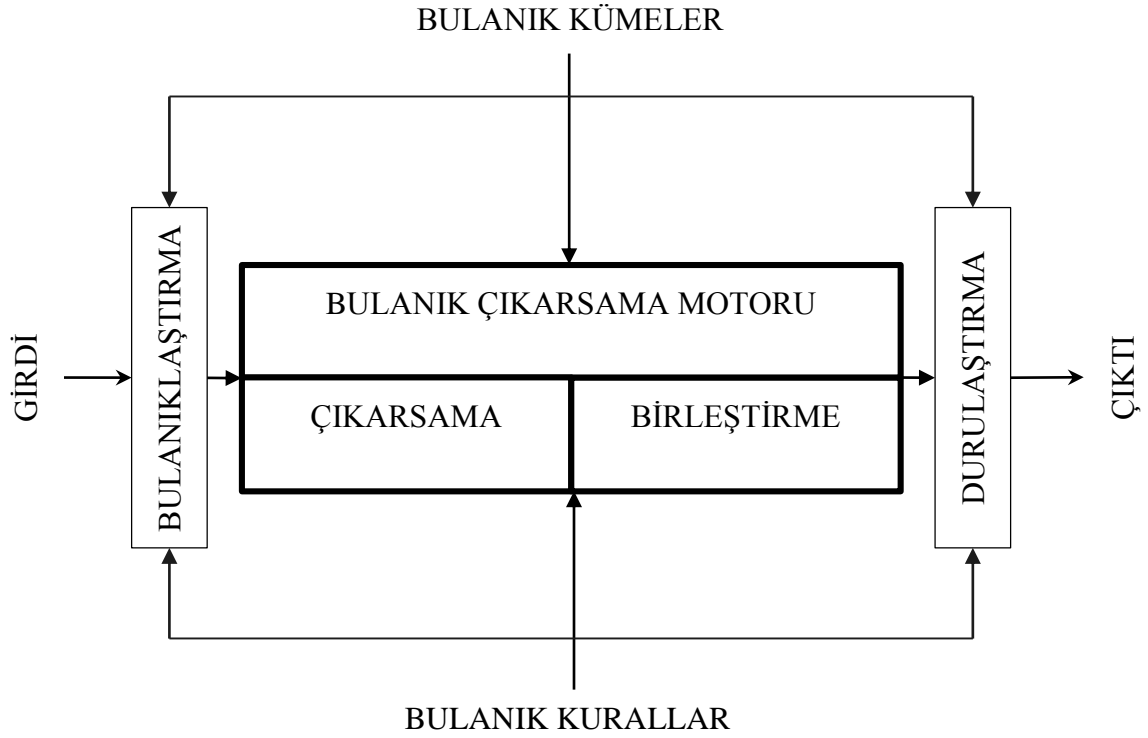
2.2.3. Bulanık Sistem Bileşenleri

Mamdani tipi bulanık sistemlerde, Şekil 2.4' deki gibi bulanıklaştırma arayüzü, çıkarsama motoru, durulaştırma arayüzü ve çıkarsama akışı boyunca kullanılacak olan bulanık kümeler ve bulanık kurallar olmak üzere beş temel bileşen yardımı ile yapılır [22]. Çıkarsama süreci ise dört temel adımdan oluşmaktadır: Bulanıklaştırma, çıkarsama, birleştirme, durulaştırma.

Bulanıklaştırma: Bulanıklaştırma aşamasında keskin girdi, bulanık değerlere dönüştürülür. Bu aşamada, ilgili sözel değişken için bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının tanımlanmış olması beklenir. Bir sözel değişkenin, her bir bulanık kümeye ait üyelik fonksiyonlarından o girdinin aidiyet derecesinin hesaplanması ile girdi verisi bulanıklaştırılmış olur. Buna göre, ilgili girdi için o küme, belirlenen aidiyet derecesinde tetiklenmiş olarak kabul edilir.

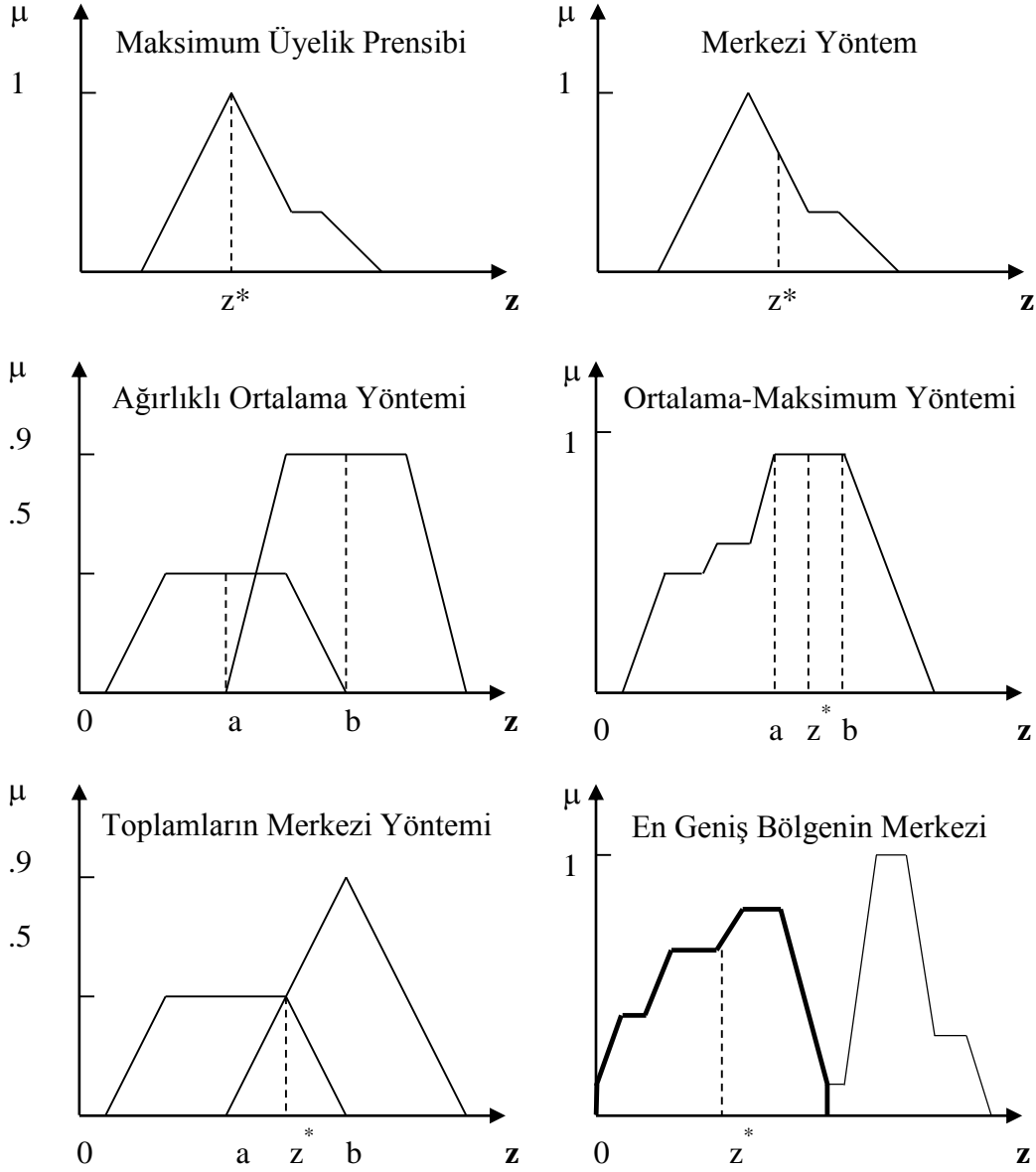
Çıkarsama: Çıkarsama aşamasında her bir kural için ayrı ayrı olmak üzere koşul kısımlardaki bulanıklaştırılmış veriden yola çıkılarak belirli operatörler (minimum ve çarpım) sayesinde sonuç kısımların da tetiklenme dereceleri hesaplanmaktadır. Temelde yapılan, bulanık kümelerin kesişimi işlemidir (Bkz. Bölüm 2.1). Minimum operatörünün kullanımında ilgili kuralın koşul niteliğindeki tüm sözel değişkenlerinin ilişkili bulanık

küme üyelik fonksiyonunu tetikleme dereceleri içerisinde en küçük olanı sonuç bulanık kümenin tetiklenme derecesi olarak aktarılırken, bu durum çarpım operatörü için girdi bulanık kümelerinin tetiklenme derecelerinin çarpımının sonuç bulanık kümeye aktarımı olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda minimum yöntemi, en küçük aidiyet değerinin aktarımını sağlarken çarpım yöntemi ile bir ölçeklendirme yapılmış olur.



Şekil 2.4. Mamdani Tipi Bulanık Çıkarsamanın Genel Yapısı [23]

Birleştirme: Birleştirme aşamasında sistemdeki çıktı bulanık kümesinin tüm kurallara ait tetiklenme dereceleri göz önüne alınarak, belirli bir operatör (maksimum, toplam vb.) yardımıyla birleştirilmesi işlemi yapılır. Bu aşamada da temel olarak yapılan bulanık kümelerin birleşiminin hesaplanmasıdır (Bkz. Bölüm 2.1). Çıkarsama ve birleştirme adımları için genel kabul görmüş yöntemler, minimum çıkarsama yönteminin seçilmesi halinde maksimum birleştirme yönteminin tercih edilmesi; çarpım çıkarsama yönteminin kullanımı halinde ise toplam yönteminin birleştirme adımında uygulanmasıdır [15]. Bazı durumlarda çarpım yönteminin maksimum birleştirme yöntemi ile de kullanımı ile karşılaşılabilmektedir [24].



Şekil 2.5. Sıklıkla Kullanılan Durulaştırma Yöntemleri [15]

Durulaştırma: Birleştirme işlemi sonucunda elde edilen sonuç bulanık kümesi, çıktının bulanık hali olarak düşünülebilir. Durulaştırma aşamasında bu sonuç bulanık kümesinin keskin bir değere dönüştürülmesi sağlanır. Bu adım, durulaştırma için kullanılan yönteme karşı çok duyarlı bir çıktı ürettiğinden üzerinde önemle durulması gereken bir aşamadır. Çünkü bulanık verinin kendisine uygun bir durulaştırma tekniği ile tek bir değere indirgenmesi, sistem başarısını doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.5’ te ilerleyen kısımlarda açıklamalarına da yer verilecek olan temel durulaştırma yöntemlerine ait örnekler sunulmuştur.

Maksimum üyelik prensibinde sonuç bulanık kümesini maksimum yapan değer hesaplanarak durulaştırma yapılır.

Yaygın kullanıma sahip merkezi yöntemde (alanın merkezi veya ağırlık merkezi yöntemi) sonuç bulanık kümesinin ağırlık merkezini gösteren değer durulaştırmanın çıktısıdır.

Ağırlıklı ortalama yönteminde, sonuç bulanık kümesini etkileyen her üyelik fonksiyonunun ağırlık merkezi hesaplanır. Ardından her bir üyelik fonksiyonundaki tetiklenme derecelerine göre ağırlıklı ortalama hesabı yapılır. Ağırlıklı ortalama yöntemi, yalnızca üyelik fonksiyonlarının simetrik olması halinde önerilmektedir.

Ortalama-maksimum yönteminde, sonuç bulanık kümesinin en büyük değerlerinin ortalaması alınarak bu değer durulaştırılmış çıktı olarak sunulur.

Toplamların merkezi yönteminde sonuç bulanık kümesini oluşturan her bir üyelik fonksiyonunun cebirsel toplamının merkezi durulaştırma sonucudur. Üyelik fonksiyonlarının simetrik olup olmamasına karşı kararlı olan bu yöntem, kesişen bölgelerin iki kere toplama işlemine katılmasından kaynaklı bir güçlüğü sahiptir.

En geniş bölgenin merkezi yönteminde sonuç bulanık kümesinin birden fazla dış bükey alan içermesi durumunda geniş olan alanın ağırlık merkezinin hesaplanması ile durulaştırma yapılır.

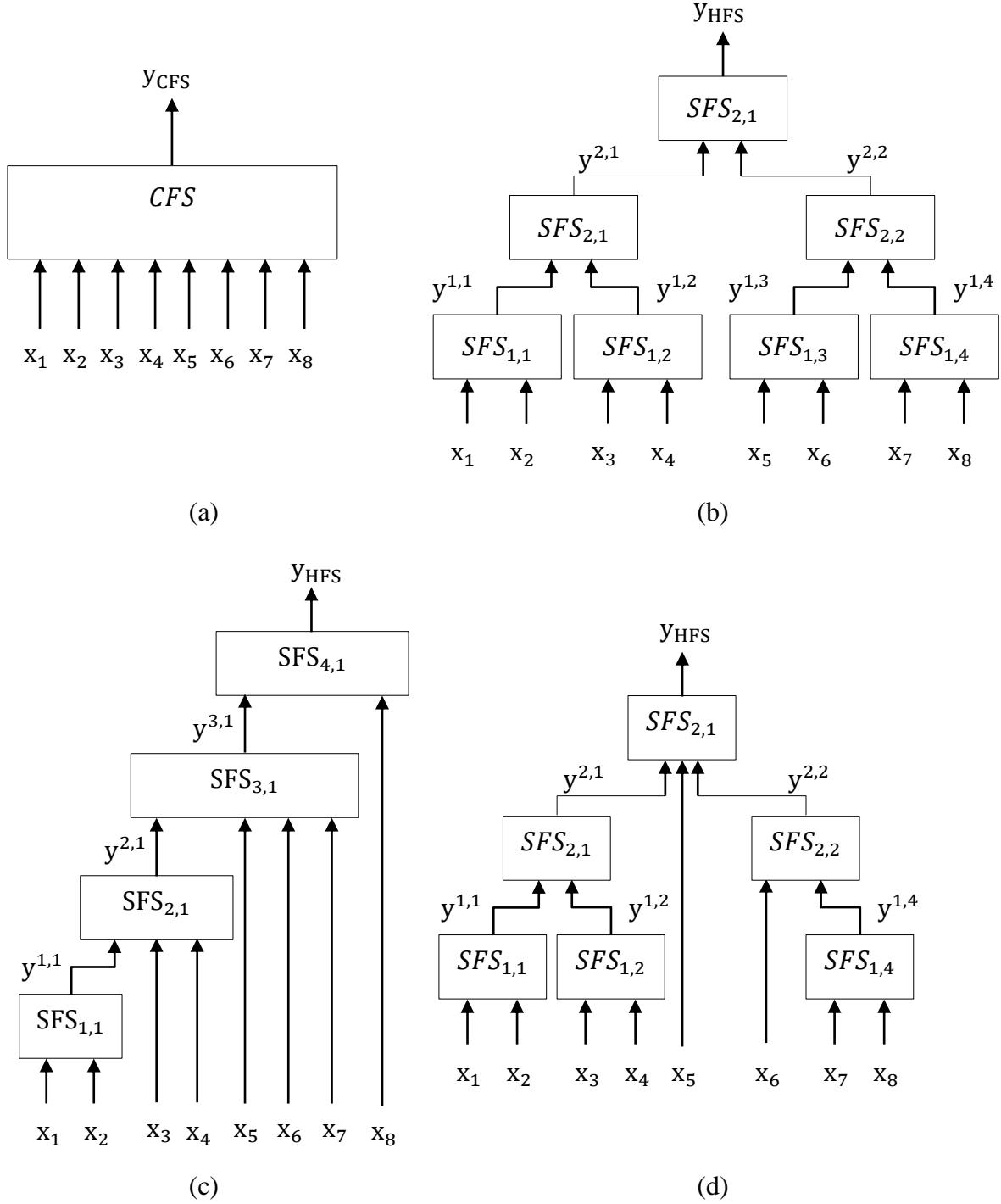
2.3. Hiyerarşik Bulanık Sistemler

Bulanık çıkarsama sistemleri, farklı araştırma konularından meydana gelmiş çok sayıda problemin çözümüne sezgisel yaklaşımlar getirmektedirler. Bu sistemlerin performansı, ürettikleri sonucun doğruluğunun yanında sistemin karmaşıklığıyla da doğrudan ilişkilidir. Çalışmada, sistem karmaşıklığı terimi, çıkarsama sürecinde maliyeti direkt etkileyen hesaplama karmaşıklığının yanı sıra modelin yapısal ve mantıksal karmaşıklığını da kapsayan bir karmaşıklık tanımı ile örtüştürülmüştür. Bunun sonucu olarak sistemdeki sözel değişkenlerin çok sayıda olması veya bu sözel değişkenleri yansıtan bulanık kümelerin kontrol edilemeyecek ölçüde fazla olması modelin karmaşıklığını arttıran sebeplerdir. Bu durumdan farklı olarak artan sözel değişken veya bulanık küme sayısı, uzman kişilerin kuralları yazmada güçlük çekmesine sebep olmaktadır. Üstelik bazı

durumlarda bir problemin çözümünü tek bir sistemle modellemek için gerekli kuralları yazmak imkânsız hale gelmektedir. Böyle bir durum, girdilerin birbirinden veya nihai sonuçtan bağımsız olduğu durumlarda gözlenmektedir. Birbirleri ile mantıksal ilişki kurulamayan ve sonucun değişiminde birbirlerindeki değişimlerden etkilenmeyen bu sözel değişkenlerin tek bir yapıdaki kural ile modellenebilmeleri mümkün olmamaktadır. Ayrıca sözel değişkenler arasında ilişki kurulabilse dahi oluşturulması gereken kural sayısındaki fazlalık ve bu kuralların bir sistematığe bağlanamaması tam bir kural veritabanı oluşturmayı güçleştirmektedir. Bu problemler doğrultusunda bulanık çıkarsamanın tek bir bulanık sistem yerine daha küçük boyutlu alt sistemlerce çözülmesi yaklaşımı geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip bir çözümde, karmaşık sistemi gerektiren problem tek başına anlam ifade edebilen ya da edemeyen alt problemlere ayrılmakta ve bu alt problemler için daha basit bulanık sistemler tasarlanmaktadır. Tasarlanan bu sistemler, hiyerarşik bir yapıda birbirine bağlanarak bütün bir hiyerarşik sistemi oluşturmaktadır.

Çalışmada, herhangi bir problemin geleneksel olarak tek bir bulanık sistem ile çözülmesi yaklaşımı, Geleneksel Bulanık Sistem, CFS (Conventional Fuzzy System) olarak ifade edilecektir. Ayrıca, Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemleri HFS (Hierarchical Fuzzy System); bu sistemi oluşturan her bir alt bulanık sistem ise kullanılan metriklerde ve görsellerde SFS (Sub-Fuzzy System) olarak adlandırılacaktır.

CFS' ler basit ya da çok karmaşık problemlerin çözümü için kullanılıyor olabilir. Ancak alt sistemler oluşturulmaması dolayısıyla çekirdek yapıdadırlar. Bu yapıdan farklı olarak HFS' ler birden çok alt sistemin belirli bir modele göre bağlanması ile oluşturulduğundan bütünleşik bir yapıya sahiptirler. Şekil 2.6' da 8 adet girdi, 1 adet çıktı değerine sahip olan, sözel değişkenlerin her biri 5 adet bulanık kümeye sahip CFS ve HFS sunulmuştur. Burada, bir SFS' nin tanımlanmasında L içerisinde bulunduğu katman numarası ve S ilgili SFS çıktısının bir üst katmandaki SFS' deki girdi sıra numarası olmak üzere $SFS_{L,S}$ kısaltması kullanılmıştır. Aynı tanımlama şekli $SFS_{L,S}$ ' nin çıktı değeri olan keskin $y^{L,S}$ için de geçerlidir.



Şekil 2.6. CFS ve Farklı Yapılardaki Hiyerarşik Bulanık Sistemler (a) CFS (b) Kümelenmiş HFS (c) Artımlı HFS (d) Kademeli HFS

Bir bulanık sistemde m her bir sözel değişken için tanımlanan bulanık küme sayısı ve n girdi olarak kullanılan sözel değişken sayısı olmak üzere m^n adet kuralın tanımlanması gerektiğinden Şekil 2.6.a' da yer alan CFS için tanımlanması gereken kural sayısı 390625 (5^8) iken bu değer Şekil 2.6.b' deki HFS için 175 ($7 \cdot 5^2$), Şekil 2.6.c' deki HFS için 800

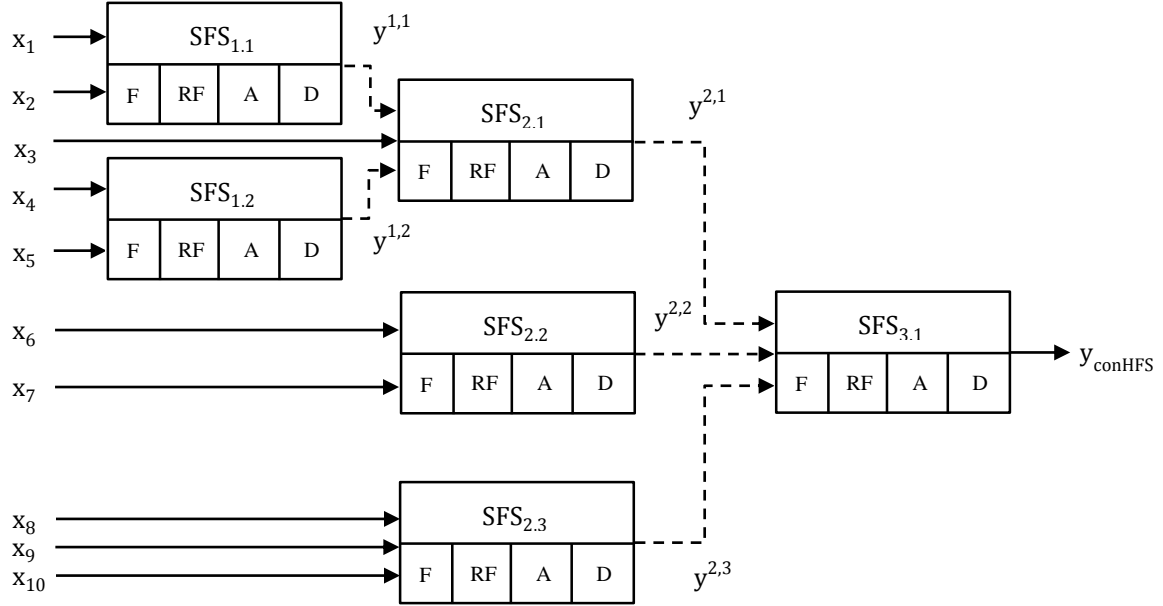
$(2 \cdot 5^2 + 5^3 + 5^4)$ ve Şekil 2.6.d' deki HFS için $250 (5 \cdot 5^2 + 5^3)$ olarak hesaplanır. Buna göre üzerinde durulan problemin çözümü için CFS yerine HFS kullanımının, kural sayısındaki ciddi azalış sayesinde hesaplama zamanının kısılması kaçınılmazdır. Ayrıca CFS' deki kuralların yapısı ve mantıksal olarak oluşturulmasındaki engeller düşünüldüğünde, HFS kullanımı ile girdi değişkenlerinin doğru bir yapıda gruplanabildiği senaryolarda uzman kişinin kuralları oluşturması kolaylaşacaktır. Bunlara ek olarak Şekil 2.6' da yer alan HFS örnekleri kendi içlerinde düşünüldüğünde alt sistemlerdeki girdi sayısı azalışının kural sayısını yine önemli miktarda düşürdüğü görülmektedir. Bu da hiyerarşik sistemlerin değişen mimarilerinin çıkarsama maliyetinde değişimlere sebep olacağını göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında iki farklı açıdan HFS sınıflandırmasına değinilmiştir. Bunlardan ilki hiyerarşik yapının temel alındığı mimariye dayalı yapılan sınıflandırmadır. Bu tür sınıflandırmayı Chung ve Duan [7] yaptıkları bir çalışmada üç kategoride incelenmişlerdir: Kümelenmiş HFS (Şekil 2.6.b), Artımlı HFS (Şekil 2.6.c) ve kümelenmiş ve artımlı yapının birlikte mevcut olduğu Kademeli HFS (Şekil 2.6.d). Bunların haricinde yine bu mimariler temel alınarak hazırlanan farklı ve özelleşmiş yapılar da söz konusudur: Zincirleme Kurallar Mimarisi [8], AHFS [10] (Alternative Model of HFS). Daha önce de belirtildiği gibi bu mimarilerin ortaya çıkarılmasındaki başlıca sebep, değişen girdi parametre sırası ve alt sistem yapısına karşı en büyük direnci gösteren ve en kararlı sonuçları ortaya çıkaran mimariyi keşfetmektir. Ancak farklı problemler için farklı mimariler en kararlı sonuçları üretebileceğinden bu alanda bir standartlaşmaya gitmek mümkün görünmemektedir. Çünkü bu kararsız yapının sebebi kullanılan çıkarsama akışıdır. Bu sebeple tez çalışması kapsamında hiyerarşik çıkarsama akışları ikinci bir sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Bu amaç doğrultusunda üç farklı çıkarsama akışı incelenmiştir: Geleneksel Hiyerarşik Çıkarsama Sistemleri (conHFS) [2], Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemler (HCTFS) [24] ve tez çalışması kapsamında önerilen Durulaştırmasız Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemleri (DF-HFS). Tez metninin ilerleyen kısımlarında bu çıkarsama akışları ile ilgili ayrıntılı bilgiye yer verilmiştir.

2.3.1. Geleneksel Hiyerarşik Bulanık Sistemler (conHFS)

Geleneksel yolla çözülen bir Mamdani tipi HFS' den elde edilen sonuç değişkeninin değeri, alt sistemlerde Mamdani tipi bir çıkarsamanın tüm adımları (durulaştırma, çıkarsama, birleştirme ve durulaştırma) gerçekleştirilerek hesaplanmaktadır. Şekil 2.7' de,

F bulanıklaştırma, I çıkarsama, A birleştirme, D durulaştırma adımlarını sembolize etmek üzere, örnek bir hiyerarşik sistem üzerindeki conHFS çıkarsama akışına yer verilmiştir. Bu akışın doğal bir sonucu olarak bir conHFS modelinde iç katmanlarda yer alan alt sistemlerde durulaştırma adımı uygulanmakta ve bir üst katmana aktarılan keskin değer üst katmandaki alt sistem tarafından tekrar bulanıklaştırılmaktadır. Söz konusu durulaştırma ve ardından yapılan bulanıklaştırma adımları, verinin bulanıklık derecesini değiştirdiğinden bulanık veride kayıplara sebep olmaktadır. Çünkü bir katmandaki alt sistemde gerçekleştirilen durulaştırma adımında, bulanık veriden keskin değere bir indirgeme yapılır. Bu da bulanıklığı yok eder. Elde edilen keskin değer bir üst katmanda yeniden bulanıklaştırılıyor olsa da alt katmandaki durulaştırma öncesi bulanık kümenin özdeşinin üst katmanda gerçekleştirilen bulanıklaştırma işlemi sonucunda tekrar elde edilmesi, girdi setlerinin birçoğu için mümkün değildir. Gerekli olmadığı halde tekrarlanan ve bozulan bulanık verinin üst katmandaki alt sistemlerde yeniden oluşturulabilmesini garanti edemediğinden yanılıcı niteliğe sahip olan bu durulaştırma-bulanıklaştırma ikilisi, her katmanda daha büyük oranda ortaya çıkan veri kaybının sebebi olmakla birlikte sistemin çıkarsama maliyetini de olumsuz etkilemektedir.



Şekil 2.7. conHFS

Hiyerarşik çıkarsama kullanımının temel başarı ölçütlerinden bir tanesi sistemin doğruluğunun CFS performansında olmasıdır. Bir başka deyişle bir problemin HFS ile çözümünde, gerekli sebeplerle daha az maliyetli ve kolay modelleme sağlanırken, sistem

çıkışının CFS çıktısı ile olabildiğince yakın olması beklenir. Diğer durumlarda CFS kullanımından HFS kullanımına geçmek sistem doğruluğu ve kararlılığı açısından riskler üretecektir. Gereksiz tekrarlanan durulaştırma adımlarından kaynaklı olarak, conHFS akışı ile CFS performansını elde etmenin teminatını vermek, katman geçişlerindeki bulanıklığın seviyesindeki bozulmaya bağlı veri kaybından ötürü mümkün olmamaktadır.

2.3.2. Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemler (HCTFS)

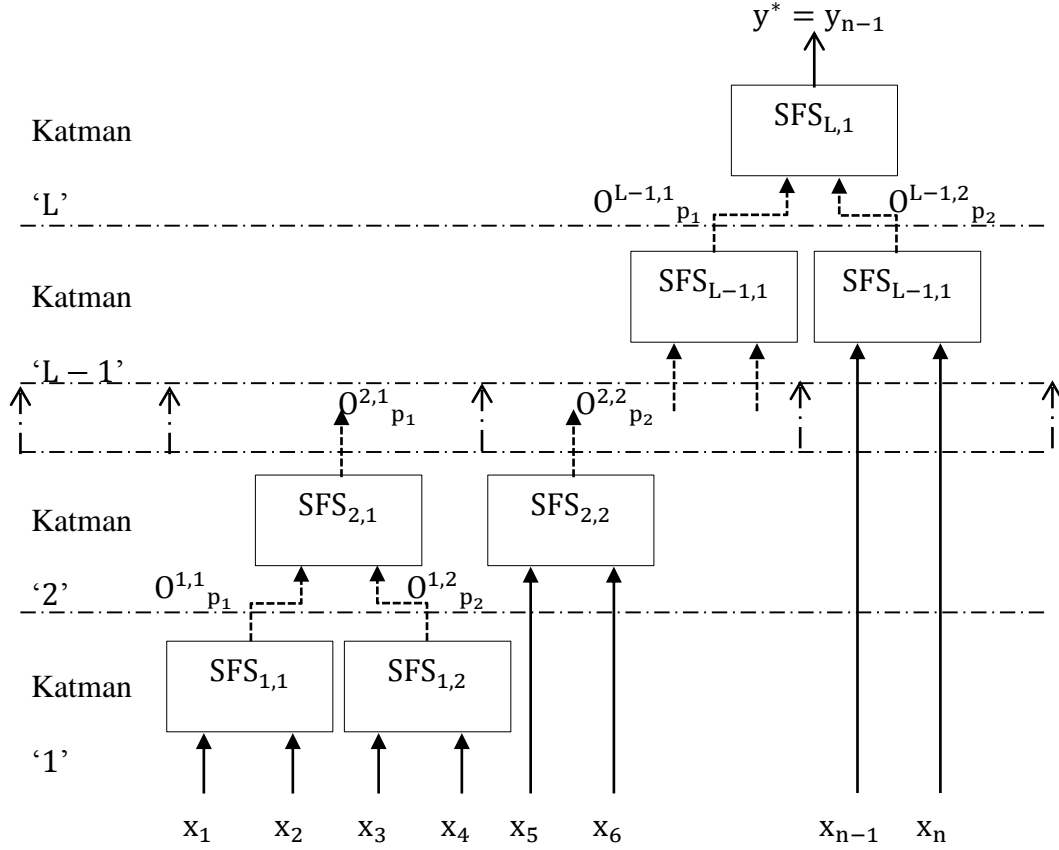
Rattasiri ve Halgamuge tarafından 2003 yılında önerilen Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemler (HCTFS) [24], conHFS türü çıkarsama akışında yinelenen durulaştırma adımları sonucu meydana gelen bilgi kaybını adresleyen öncü çalışmalardan bir tanesidir. Yazarlar, daha önce önerdikleri ve girdi sözel değişkenlerinin değişen sırasına karşı birçok hiyerarşik mimariden daha kararlı çalışan, Şekil 2.8' deki AHFS (Alternative Model of HFS) mimarisini [10] kullanarak oluşturdukları hiyerarşik çıkarsama tekniğinde ara adımlardaki durulaştırma adımlarını ortadan kaldırmışlardır.

HCTFS akışı, AHFS mimarisi ile bir bütündür. Mimarinin en temel özelliklerinden birisi modeli oluşturmada ikili ağaç yapısındaki kademeli bir tasarım stratejisini kullanılıyor olmasıdır. Burada birbiri ile ilişkili girdi değişkenleri ikiyeşerli olarak gruplanır ve alt sistemlere girdi olarak gönderilir. Geliştirilen çözümde $O_{p_i}^{L,S}$ olarak isimlendirilen ve ara adımlarda bir üst katmana girdi olarak gönderilen değer, tek bir keskin değer değil, ilgili sonuç sözel değişkenine ait her bir bulanık kümeyi belirli bir derece ile ifade eden değerler bütünüdür.

HCTFS yapısında alt sistemler, ara sistemler ve kök sistem olmak üzere üç farklı alt sistem türü mevcuttur ve her tür alt sistem içerisinde farklı işlemler yapılmaktadır. Alt sistemler, girdi değişkenlerinin doğrudan bağlandığı sistemlerdir. Bu sistemlerde, sonuç değişkeninin her bir bulanık kümesi için tanımlanan kurallara göre sistem girdilerinin tetiklenme dereceleri hesaplanır.

Şekil 2.8' de yer alan örnek AHFS mimarisinde $SFS_{1,1}$ ve $SFS_{1,2}$ alt sistemlerinin HCTFS ile çözümü Eşitlik 1 ve 2 içerisinde sunulmuştur. Buna göre $A_i^{c_1}$ ile ifade edilen değer, i. girdi için sonuç sözel değişkeninin $O_1^{1,1}$ olduğu kuralları, $\mu_{A_i^{c_1}}(x_i)$ o kurala göre x_i sözel

değişkeninin aidiyet derecesini ve $\mu'_{A_i c'_i}(x)$ tetiklenen kuraldaki minimum aidiyet derecesini tanımlamaktadır.



Şekil 2.8. Çift Sayıdaki Girdi Değişkeni için AHFS [10]

HCTFS modelinde ara katmanlarda yer alan sistemlerin girdisi ve çıktısı bulanık bir yapıdadır. Bu sistemlerin girdisi, alt sistemlerde veya diğer ara sistemlerde hesaplanmış olarak geldiğinden burada yapılan, Eşitlik 3' teki gibi çarpım yöntemi kullanılarak yapılan çıkarsama ve maksimum tekniği ile gerçekleştirilen birleştirmedir.

Kök sistem, HCTFS modelinde en üst katmanda yer alan, girdisi bulanık olan ve durulaştırma adımı ile keskin bir sonuç üreten alt sistemdir. Burada girdi bulanık olduğundan bulanıklaştırma adımına ihtiyaç duyulmaz. Bulanık olan girdi direkt olarak çarpım operatörü kullanımı ile çıkarsama ve toplam operatörü yardımı ile birleştirmeye tabi tutulur. Ardından ağırlıklı ortalama metodu ile gerçekleştirilen durulaştırma yapılır. Ağırlıklı ortalama yönteminde sonuç değişkenine ait bulanık kümeleri ifade etmek için kullanılan üyelik fonksiyonlarının, çarpımların toplamına göre hesaplanan tetiklenme

dereceleri de dikkate alınarak ağırlık merkezleri hesaplanır. Ardından bu merkez değerleri, tetiklenme dereceleri ağırlık kabul edilerek ortalama bir değer hesaplanır ve keskin çıktı elde edilir.

Katman '1' SFS_{1,1}: (1)

$$O_1^{1,1} = \max \left\{ K_1^{1,1} = \left[\mu_{A_1^{c'_1}}(x) \cdot \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{c_1}}(x_i) \right] \right\}$$

$$O_2^{1,1} = \max \left\{ K_2^{1,1} = \left[\mu_{A_1^{c'_2}}(x) \cdot \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{c_2}}(x_i) \right] \right\}$$

$$\vdots$$

$$O_{p_1}^{1,1} = \max \left\{ K_{l_{1,1}}^{1,1} = \left[\mu_{A_1^{c'_{1,1}}}(x) \cdot \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{c_{1,1}}}(x_i) \right] \right\}$$

Katman '1' SFS_{1,2}: (2)

$$O_1^{1,2} = \max \left\{ K_1^{1,2} = \left[\mu_{A_1^{c'_1}}(x) \cdot \prod_{i=3}^4 \mu_{A_i^{c_1}}(x_i) \right] \right\}$$

$$O_2^{1,2} = \max \left\{ K_2^{1,2} = \left[\mu_{A_1^{c'_2}}(x) \cdot \prod_{i=3}^4 \mu_{A_i^{c_2}}(x_i) \right] \right\}$$

$$\vdots$$

$$O_{p_2}^{1,2} = \max \left\{ K_{l_{1,2}}^{1,2} = \left[\mu_{A_1^{c'_{1,2}}}(x) \cdot \prod_{i=3}^4 \mu_{A_i^{c_{1,2}}}(x_i) \right] \right\}$$

Katman '2' SFS_{2,1}: (3)

$$O_1^{2,1} = \max \{ K_{c_1}^{2,3} = O_1^{1,1} \cdot O_1^{1,2} \}$$

$$O_2^{2,1} = \max \{ K_{c_2}^{2,3} = O_1^{1,1} \cdot O_1^{1,2} \}$$

$$\vdots$$

$$O_{p_1}^{2,3} = \max \{ K_{c_{1,2,3}}^{2,3} = O_{p_1}^{1,1} \cdot O_{p_2}^{1,2} \}$$

Yazarlar, geliştirdikleri HCTFS modelinin kararlılığını ölçmek için bir kararlılık analizi gerçekleştirmişler ve ortaya çıkan keskin çıktının, sonuç bulanık kümelere ait üyelik fonksiyonlarının ağırlık merkezlerinden, en küçük değere sahip olan ile en büyük değere sahip olan arasında hesaplanması halinde, sistemi kararlı olarak nitelendirmişlerdir. Bu değerlendirme ölçütü, gerekli bir koşulu kontrol ediyor olsa da yeterli değildir. Çünkü hiyerarşik modellerden beklenen, karmaşık CFS'leri her anlamda basitleştirirken, sistem çıktısının doğruluğu açısından CFS performansından mümkün olduğunca uzaklaşmamalarıdır. Çünkü hiyerarşik yapının çıktısı, kendisine kurallar ve iç adımlardaki

yöntemler açısından eş olan CFS çıktısından farklı olduğu sürece ortamda bulanıklığın doğru taşınamamasından kaynaklı bir bilgi kaybı mevcuttur. Bu doğrultuda, ilgili tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde, problemlerin HCTFS ile de çözümü gerçekleştirilmiş ve HCTFS' nin sistem doğruluğu açısından değerlendirmesine de yer verilmiştir.

HCTFS modelinin uygulanma biçimindeki çekincelerden bir diğeri sistem girdilerini ikişerli olarak sınıflandırıyor olmasıdır. Bu mimari kimi senaryo için kullanışlı iken birbiri ile kural yazılamayacak kadar ilişkisiz olan girdileri aynı sistemde değerlendirme altına almaya zorlar. Hâlbuki hiyerarşik sistemin modellenmesinde dikkat edilecek unsurlardan bir tanesi, alt sistemlerde kural yazımının mümkün olduğunca basit olmasıdır. İkili sınıflandırmaya yönelik mimarinin kullanılması durumunda ise alt sistemlerin bir veya birkaçı için kural oluşturulamayabilir veya bir şekilde oluşturulmuş olsa dahi iç katman kurallarının yazımı başka bir zorluğu doğuracaktır. Bu yüzden doğruluk ve kararlılık garantisi verilemeyeceğinden, modelin performansı direkt olarak olumsuz etkilenebilir ve CFS doğruluğunda modeller oluşturmak mümkün olmayabilir.

3. ALANYAZIN ÖZETİ

Hiyerarşik bulanık sistemlerinin genel yaklaşımı, tek bir bulanık çıkarsama sistemi ile gerçekleştirimi ve kontrolü, gerek kural sayısı, gerekse algoritma karmaşıklığı dolayısıyla güç olan bulanık çıkarsama sistemlerinin, daha küçük çaplı, çok sayıda alt bulanık çıkarsama sistemi ile modellenmesidir. Bu tür bir çıkarsama yaklaşımının öncü çalışması Raju ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [2]. Bu yaklaşım doğrultusunda oluşturulan hiyerarşik bulanık çıkarsama modelinin kullanımı ile çok sayıda girdisi olan tek bir bulanık çıkarsama modeli için oluşturulması gereken kurallar, alt sistemler için daha az girdi verisi tanımlandığından çok daha az sayıda ve yapısal olarak daha basittir [2]. Ayrıca bu sistemler, hesaplama karmaşıklığı açısından tek bir sistemden oluşan geleneksel bulanık çıkarsama modellerine göre daha avantajlıdır [24][12][25].

Hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemlerinin, etkili bir şekilde modellenmesi ve girdi verilerinin dizilimi, üzerinde çalışılan ayrı bir araştırma konusudur. Chung ve Duan [7], sundukları bir çalışmada hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemlerini, modellenme yaklaşımlarına göre artımlı, kümelenmiş, kademeli olmak üzere kategorize etmişlerdir. Bunun yanında sonuç değerini etkileme miktarı açısından önemli olan girdilerin daha alt katmanlarda yer alması gerekliliğini savunmuşlardır. Belirtilen kategoriler içerisinde özelleşmiş farklı mimarilere de rastlamak mümkündür. Örneğin Domingo ve Sierra [8] tarafından önerilen zincirleme kurallar mimarisi artımlı yapının bir çeşididir. Rattasiri ve Halgamuge [10] ise bir çalışmalarında çıkarsamanın tutarlılığını sağlamak adına basamaklı yapının özelleşmiş bir versiyonu olan Hiyerarşik Bulanık Sistem için Alternatif Model (Alternative Model of Hierarchical Fuzzy System, AHFS) isimli Şekil 2.8' deki ağaç benzeri bir yapıyı önermişlerdir. Rattasiri ve arkadaşları [12], bir diğer çalışmalarında, alt sistemlere gönderilen girdi parametrelerinin sırasının sistem çıktısına büyük etkisinin olduğuna bir kez daha değinmişlerdir. Ayrıca AHFS mimarisi üzerinde girdi değerleri için frekans tepki analizi yöntemiyle yapılan hassasiyet ölçümü ile farklı formlardaki hiyerarşik modellerin tasarımında hassasiyet odaklı sıralamanın sistem başarısı üzerindeki etkisini tartışmışlardır.

Hiyerarşik bulanık çıkarsama modellerinde genel uygulama yöntemi, her bir alt sistemin mevcut bulanık çıkarsama yaklaşımları (Mamdani [1], Takagi Sugeno Kang (TSK) [16][17] veya Tsukamoto [18]) ile çözülmesi ve bu sistemlerden elde edilen keskin değer

bir üst katmandaki sisteme girdi olarak verilmesidir. Gerçekleştirilen alanyazın taramasında, farklı alanlardaki birçok problemin çözümü için bu yaklaşımın kullanılıyor olduğu görülmüştür.

Bulanık sistemlerin kümelenmiş yapıda kullanıldığı bir çalışmada Oh ve arkadaşları [26] döner ters sarkaç için ve top ve çubuk sistemleri için bulanık oransal-türevsel (PD) yöntemini uygulamış ve performansı tartışmışlardır. Akyüz ve arkadaşları [3] tek link esnek bağlantılı robot manipülatörün tasarımında ve yörünge takip kontrolünde hızlı yörünge takibini sağlamak ve bağlantı titreşimlerini ortadan kaldırmak adına, kümelenmiş ağaç modelini, hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemlerinde uygulamışlardır. Yapılan deneylerde, tasarlanmış olan hiyerarşik bulanık çıkarsama sisteminin Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Denetleyici' den daha iyi sonuçlar verdiği ve sistem parametrelerinin değişimi ile dış faktörlerden kaynaklı bozulmalara karşı daha kararlı davrandığı üzerine tartışılmıştır. Takacs [27], yaptığı çalışmada, risk ve felaket yönetimi konusunda ayrıntılara yer vermiş ve risk seviyesinin belirlenmesinde bulanık mantık yaklaşımlarının kullanılması konusunda tartışmıştır. Takacs, bu çalışmada seyahat riskini ölçmeye yönelik senaryoyu, ilişkili girdi değerleri aynı alt sisteme sahip olacak şekilde kurguladığı, kümelenmiş ağaç yapısındaki hiyerarşik bulanık çıkarsama modeli ile gerçeklemiştir. Risk seviyesinin ölçülmesi problemindeki girdi değerlerindeki fazlalık ve kural çıkarmadaki karmaşıklıklar, hiyerarşik modelin avantajlarını ortaya koyma konusunda iyi bir örnek olarak düşünülmektedir.

Hacıömeroğlu ve arkadaşları [28] kalabalık benzetiminde, sosyal grupların davranışlarını modellemeye yönelik yaptıkları çalışmada, sanal bireylerin hızlarını artımlı yapıdaki üç katmanlı hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemi ile hesaplamakta ve daha gerçekçi benzetim senaryoları ortaya çıkarmaktadır. Neogi ve arkadaşları [4] üniversite personelinin işteki performans değerlendirmesi için artımlı hiyerarşik bulanık sistemin kullanımını önermişlerdir. Bunun için performansı etkileyen faktörler gruplanmış ve bu gruplarla ilişkili girdi değerleri aynı alt sistem içerisinde modellenmiştir. Bir başka çalışmada, Ramirez ve Mayorga [29] ilk katmanı müşterileri sınıflandırmaya; ikinci katmanı ise müşterilerin ilgi alanlarını tanımlamaya yönelik olarak oluşturulan, iki katmanlı karmaşık yapıyı bir hiyerarşik bulanık çıkarsama modeli ile akıllı, dinamik web portaller geliştirmeye yönelik bir çalışma yapmıştır.

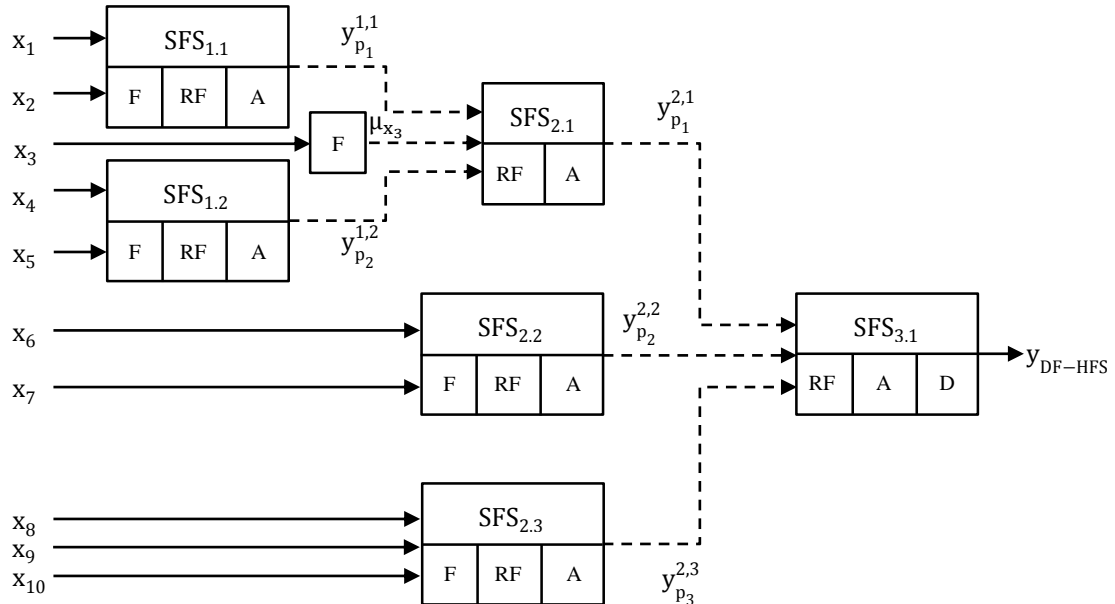
Hiyerarşik bulanık çıkarsama sistemlerinin kabul görmüş çıkarsama akışı bu mantığa dayalı olduğundan, ismi geçen ve farklı bilim dallarından farklı problemlerin çözümü için yapılmış örnek çalışmaların tamamında conHFS yaklaşımı ile bir katmandaki keskin sonuç değeri bir sonraki katmanda yer alan çıkarsama sistemine girdi olarak atanmaktadır. Ancak alt bulanık sistemlerin çıktılarının bir üst kademedeki bulanık sisteme girdi olarak verilmesinde, her katmanda tekrarlanan durulaştırma adımları, veride kayıplara sebep olmaktadır [24][10][30]. Ayrıca katman sayısındaki artış, bu kaybın daha da büyümesine yol açmaktadır.

Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama sistemlerinde katmanlar arasındaki bilgi geçişinde meydana gelen veri kaybı problemini çözmeyi hedefleyen az sayıda çalışma mevcuttur. Rattasiri ve Halgamuge [24] ara katmanlardaki durulaştırma aşamalarını ortadan kaldırarak ara katmanlara farklı hesaplamalar geliştirmiş ve bulanık bilgiyi taşımaya yönelik bir model olan Hiyerarşik Sınıflandırma-Tipi Bulanık Sistemleri (Hierarchical Classifying-Type Fuzzy Systems, HCTFS) önermiştir. HCTFS tipi bulanık çıkarsamada ara adımlardaki çıkarsamada modifiye edilmiş çarpım yöntemi ile çıkarsama ve maksimum yöntemi ile birleştirme yapılırken bu birleştirme adımı sonucu üst katmana aktarılır. Ara adımların tümünde yalnızca bu iki işlem uygulanır. En üst katmana gelindiğinde ise yine modifiye edilmiş çarpım yönteminin yanında birleştirme tekniği olarak toplam operatörü devreye girer ve ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulaştırma yapılarak keskin bir çıktı elde edilir. Geliştirilen sistemde mimari yapı için AHFS [10] önerilmiş ve bu yapı ile geliştirilen çözümlere yer verilmiştir. AHFS mimarisine olan bağlılığı bu tip hiyerarşik modelin tasarlanamadığı durumlarda kullanım güçlüğü yaratmaktadır. Önerilen modelin benzetimi ve deneysel olarak değerlendirilmesi, aktif süspansiyon kontrolü için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, temel olarak HCTFS modelinin tek bir sistemden oluşan geleneksel yaklaşım ile hesaplama karmaşıklığı, kural sayısı ve kuralların basit yapısı açılarından kıyaslaması yapılmış ve çıktının belirli bir aralıkta olup olmamasını kontrol eden bir kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Ancak gerek seçilen deney problemi gerekse gerçekleştirilen ölçümlerde katmanlar arasındaki bilgi kaybını ne düzeyde ortadan kaldırıldığına dair çalışmalar yürütülmemiştir. Tez çalışması kapsamında HCTFS tipi çıkarsama, deneylerde konu alınan problemler üzerinde uygulanmış ve geniş bir değerlendirilmeye tabi tutulmuştur.

4. DURULAŞTIRMASIZ HİYERARŞİK BULANIK ÇIKARSAMA SİSTEMİ

Geleneksel yöntem olarak ifade edilen conHFS, ara adımlarda gerekli olmadığı halde tekrarlanan, birleştirme adımının sonuç bulanık kümesini durulaştırma ve ardından gerçekleştirilen bulanıklaştırma adımları dolayısıyla bulanık verinin derecesinin bozulmasına ve buna bağlı veri kaybına sebep olmaktadır. Çünkü durulaştırma adımında kullanılan durulaştırma stratejisiyle bağlantılı olarak veride bir daralma yaşanır. Ardından tekrar bir bulanıklaştırma adımı gerçekleştirildiğinde bile başlangıçtaki bulanık kümenin elde edilmesi güç ve birçok girdi seti için imkânsızdır. Bu yüzden katmanlar arasında veri aktarımındaki bu kaybın önüne geçebilmek için bulanıklığın üst katmanlara doğru bir şekilde taşınması elzemdir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen DF-HFS ara katmanlarda bulunan alt sistemlerin çözümü için Mamdani tipi çıkarsamanın durulaştırma adımını ortadan kaldırmakta, bunun yerine ilgili alt sistemdeki birleştirme adımı çıktısını doğrudan bir üst katmana taşımaktadır. Bu durumda üst katmana taşınan veri keskin bir değer değil sonuç sözel değişkenindeki bulanık kümelerin her birinin tetiklenme derecelerini içeren bir seridir.



Şekil 4.1. DF-HFS

Şekil 4.1' de, F bulanıklaştırma, I çıkarsama, A birleştirme, D durulaştırma adımlarını sembolize etmek üzere, DF-HFS çıkarsama akışına yer verilmiştir. Önerilen bu çıkarsama akışında bir üst katmana geçen verinin oluşturulması için alt katmandaki alt sistemde çıkarsama adımı için minimum metodu kullanılırken, birleştirme adımında maksimum yöntemi kullanılır ve birleştirme adımının sonucunda oluşan ve sonuç değişkenindeki her bir bulanık kümenin maksimuma göre tetiklenme derecelerini içeren set, üst katmana taşınır.

Şekil 4.1' de yer alan hiyerarşik bulanık sistemin birinci katmanında yer alan ve sonuç sözel değişkenleri sırasıyla üç ve iki bulanık kümeyle sahip olan SFS_{1,1} ve SFS_{1,2} alt bulanık sistemlerinin DF-HFS ile çözümüne Eşitlik 4 ve 5' te yer verilmiştir. Buna göre R(c_{p₁}) olarak gösterilen ifade sonuç değişkeninde p₁ bulanık kümesini işaret eden kuralları, μ_{R(c₁)}(x₁, x₂) ise o kuralların her birine göre gerçekleştirilen bulanıklaştırma adımı sonucunda elde edilen aidiyet derecelerini tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Katman '1' SFS}_{1,1}: & \tag{4} \\ y_1^{1,1} &= \max\{K_{R(c_1)}^{1,1} = \min\{\mu_{R(c_1)}(x_1, x_2)\}\} \\ y_2^{1,1} &= \max\{K_{R(c_2)}^{1,1} = \min\{\mu_{R(c_2)}(x_1, x_2)\}\} \\ y_{p_1}^{1,1} &= \{y_1^{1,1}, y_2^{1,1}\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Katman '1' SFS}_{1,2}: & \tag{5} \\ y_1^{1,2} &= \max\{K_{R(c_1)}^{1,2} = \min\{\mu_{R(c_1)}(x_3, x_4, x_5)\}\} \\ y_2^{1,2} &= \max\{K_{R(c_2)}^{1,2} = \min\{\mu_{R(c_2)}(x_3, x_4, x_5)\}\} \\ y_{p_2}^{1,2} &= \{y_1^{1,2}, y_2^{1,2}\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Katman '2' SFS}_{2,1} & \tag{6} \\ y_1^{2,1} &= \max\{K_{R(c_1)}^{2,1} = \min\{y_{p_1}^{1,1}, \mu_{x_3}, y_{p_2}^{1,2}\}\} \\ y_2^{2,1} &= \max\{K_{R(c_2)}^{2,1} = \min\{y_{p_1}^{1,1}, \mu_{x_3}, y_{p_2}^{1,2}\}\} \\ y_{p_1}^{2,1} &= \{y_1^{2,1}, y_2^{2,1}\} \end{aligned}$$

Gerçekleştirilen bulanıklaştırma adımlarının ardından minimum yöntemine göre her bir kuralın sonuç sözel değişkeninin ilgili bulanık kümesinin tetiklenme dereceleri bulunmuş olur. Her bir kural için ayrı ayrı hesaplanan bu derecelerin maksimum yöntemine göre birleştirme adımına tabi tutulması sonucunda ise sonuç değişkenindeki tüm bulanık kümelerin aidiyet dereceleri hesaplanmış olunur. Bu bulanık kümelerin sayısı SFS_{1,1} ve SFS_{1,2} için 2 olarak belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak y_{p₁}^{1,1} değişkeni üç, y_{p₂}^{1,2} değişkeni

iki tetiklenme derecesinden oluşan seriyi ifade eder ve üst katmana bu iki seri doğrudan taşınır.

Şekil 4.1' de ikinci katmanında yer alan $SFS_{2,1}$ ' in çözümü için Eşitlik 6 kullanılmaktadır. Burada bir alt katmanda gerçekleştirilen işlemlerden farklı olarak aidiyet derecelerinin hesaplanmadığı yani bulanıklaştırma işleminin yapılmadığı dikkati çekmektedir. Çünkü bu alt sistemin girdisi, sözel değişkenin her bir bulanık kümesi için tetiklenme dereceleri bir alt katmanda hesaplanmış olduğundan zaten bulanık bir değerdir ve sistemin çözümü minimum yöntemini kullanan çıkarsama adımından başlar, maksimum yöntemini kullanan birleştirme adımı ile sonlanır. Hiyerarşideki tüm ara alt sistemlerin çözümü bu şekilde yapılarak son katmandaki kök alt sistemine kadar ilerlenir. Son katmanda yine bulanık olan girdi verisi minimum yöntemi ile çıkarsama ve maksimum yöntemi ile birleştirmeye tabi tutulur. Ara katmanlardan farklı olarak bu noktada keskin bir çıktı elde edilmesi gerektiğinden durulaştırma da yapılır. Çalışmada durulaştırma yöntemi olarak Merkezi Yöntem kullanılmaktadır. Buna göre son katmandaki sonuç üyelik fonksiyonununun ağırlık merkezi keskin çıktıyı verir.

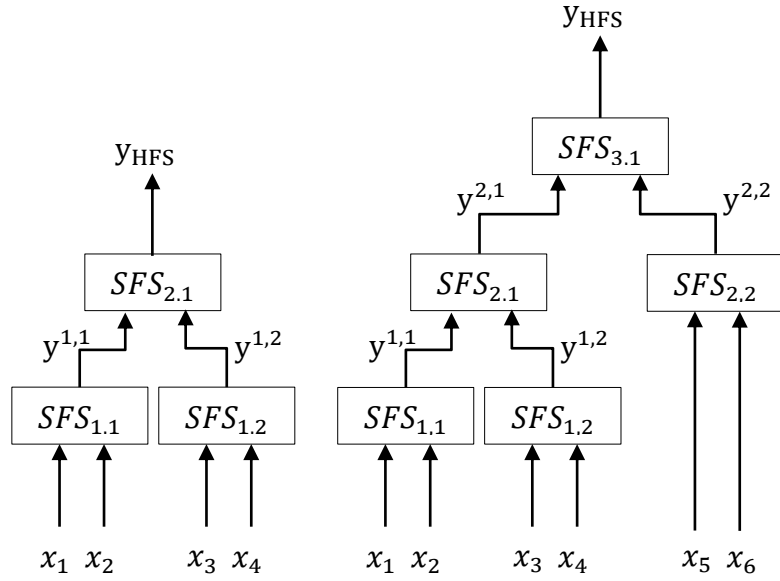
Hiyerarşik bulanık sistemlerden beklenen, karmaşık bulanık sistemlerin oluşturulmasını ve kullanımını zorlaştıran etkenlerin üstesinden gelmektir. Bu etkenler çıkarsamadaki hesaplama karmaşıklığının yanında çok sayıda sözel değişkene ve/veya bulanık kümeye sahip problemlerin çözümü için gerekli kuralların oluşturulmasında yaşanan güçlüklerdir. Ayrıca birçok karmaşık problem için tek bir sistem ile çözüme erişmek kural oluşturulamaması veya kurallar oluşturulsa bile maliyet açısından uygulanabilir bir sistem geliştirilememesi açısından olası değildir. Ancak, bu gereksinimler karşılanırken tek bir sistemin ürettiği çıktıyı üreten yani CFS ile eşdeğer olan HFS' lerin kurulması gerekmektedir. Hiyerarşik sistemlerin geleneksel çözümü olan conHFS akışı düşünüldüğünde, bu geleneksel akışın CFS ile eşdeğer kuralları içerdiği halde ara adımlarda yaptığı durulaştırmadan kaynaklı bilgi kaybından ötürü CFS çıktılarından farklı çıktılar üreteceği kolaylıkla öngörülebilir. Ancak CFS ile eşdeğer alt sistem kurallarının oluşturulması halinde önerilen çıkarsama akışı olan DF-HFS, CFS performansı ile çalışmaktadır. Bu durumun sebebi en alt katmandan başlamak üzere her durumda minimum ile elde edilen çıkarsama adımı sonunda maksimum yöntemi ile birleştirme yapılıyor olmasıdır. Bu durumda, en alt katmandan başlamak üzere, her katmanda, sonuç sözel değişkenindeki her bir bulanık kümenin maksimum tetiklenme derecesi üst katmana

taşınır. Bu durum, tek katmanlı sistem olan CFS çözümü ile dolaylı olarak aynı süreci işletmekte ve CFS' nin sonuç değişkeninin birleştirme adımı çıktısının, DF-HFS' nin en üst katmandaki alt sisteminin sonuç değişkeninin birleştirme adımı çıktısı ile eşdeğer olmasını sağlamaktadır. Ayrıca farklı durulaştırma yöntemleri ile de çözüme ulaşmak mümkündür. Bunlara ek olarak DF-HFS değişen mimarilere ve girdi parametrelerinin sırasına karşı kararlı bir davranış sergilenmesini de sağlamaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi bu eşitliğin sağlanabilmesi için gerekli koşul, CFS ve HFS kurallarının özdeş olmasıdır. Eğer bu özdeşlik sağlanamazsa DF-HFS' den beklenen, diğer HFS teknikleri ile karşılaştırıldığında CFS çıktılarına en yakın çıktıları üretmektir.

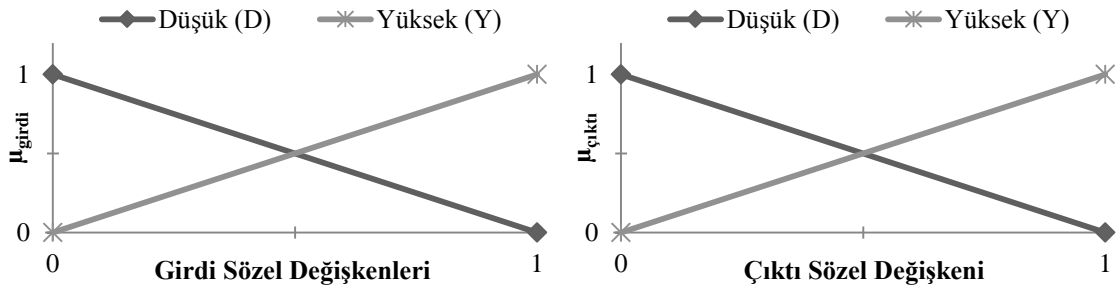
Tez çalışması kapsamında önerilmiş olan DF-HFS hiyerarşik çıkarsama yaklaşımında, hiyerarşik sistemlerdeki katmanlar arası bilgi aktarımını adresleyen HCTFS [24] yaklaşımına nazaran daha esnek bir çözüm söz konusudur. Çünkü HCTFS' de kullanılan AHFS [10] mimarisine göre girdi değişkenlerinin ikili olarak sınıflandırılması, bulanık kuralların bu ikili gruplara göre yazılması ve ara adım kurallarının da aynı şekilde ilişkilendirilerek oluşturulması gerekmektedir. Bu durum teoride mümkün olsa da uygulamada sorunlar yaratabilmektedir. Çünkü birçok senaryoda ikili olarak gruplanmış girdilerin uygun olarak ilişkilendirilmesi ve bu ilişkilere bağlı kuralların etkili bir şekilde oluşturulabilmesi mümkün olmamaktadır. Bu yaklaşımdan farklı olarak DF-HFS, hiyerarşinin inşası için kullanılan teknik ne olursa olsun katmanlar arasındaki bulanıklığı etkili ve doğru bir şekilde taşıyabilmektedir. Ancak yine de conHFS, HCTFS ve DF-HFS arasında tutarlı ve adil bir yöntem karşılaştırması yapmak adına performans değerlendirmesi için yapılan deneylerde hiyerarşik sistemler AHFS ile de modellenmiştir.

5. DENEYLER VE SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında önerilen DF-HFS tipi hiyerarşik çıkarsamanın performans açısından değerlendirilmesi amacıyla Intel Core2 Duo CPU T6500 2.10 GHz işlemci üzerinde üç farklı deney senaryosu üzerinde çalışılmıştır. Bunlar mantıksal 'VE' kapısı, 'Dışlayan VEYA' kapısı ve RMR problemleridir. Bu problemlerin çözümü için kullanılan CFS ve HFS yapılarına Şekil 5.1' de, girdi ve çıktı sözel değişkenlerinin bulanık kümelerini ifade eden üyelik fonksiyonlarına ise Şekil 5.2' de yer verilmiştir.



Şekil 5.1. Mantıksal Problemler için Geliştirilen 4 (solda) ve 6 (sağda) Girdi Parametresine Sahip Hiyerarşik Bulanık Sistemler



Şekil 5.2. Mantıksal Problemlerde Kullanılan Girdi (solda) ve Çıktı (sağda) Sözel Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları

5.1. Mantıksal ‘VE’ Problemi için Deneyler

Çalışmada, geleneksel olarak kullanılan CFS çözümü ve bu çözümün sakıncalarını ve eksikliklerini ortadan kaldırmayı hedefleyen üç çeşit HFS çözümü için mantıksal ‘VE’ kapısının bulanık mantık yaklaşımı ile gerçekleştirimi yapılmıştır. Bu problemin seçimindeki başlıca neden, yöntem tartışmasının yapıldığı bu çalışmada, bu problemin kontrol edilebilir, yönetilebilir, izlenebilir ve basit olmasıdır. Ayrıca bu problem için oluşturulan kuralların genel kabul görmüş olması, yoruma dayalı olmaması ve CFS ile HFS’ ler için özdeş kuralların yazımını mümkün kılması, sağlıklı bir yöntem karşılaştırması yapılması için önemlidir. Çünkü DF-HFS’ nin CFS performansı ile çalışmasının tek sınırlaması CFS kuralları ile eşdeğer hiyerarşik kurallarının oluşturulması gereksinimidir.

Problem için gerçekleştirilen deneyler, girdi sayıları 4 ve 6 olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Girdi sayılarındaki farklılıkların sonucu olarak sistem mimarileri de farklılık göstermektedir. Bu sayede yöntem karşılaştırması yapılırken yöntemlerin değişen mimarilere ne kadar duyarlı oldukları da ölçülmeye çalışılmıştır. Problemin çözümü için kullanılacak olan bulanık sistemlerin mimarisi [0,1] aralığındaki 4 ve 6 girdi değişkeni için Şekil 5.1’ de görülmektedir. Hiyerarşik sistemlerin karşılaştırmalarının adil bir şekilde yapılabilmesi için hiyerarşideki mimariler ve bu mimari içerisindeki alt sistemlere ait kurallar özdeştir. Bu bölümün alt başlıkları altında, yöntemler arasında tutarlı bir karşılaştırma yapmak adına tüm sistemler (CFS, conHFS, HCTFS, DF-HFS), örnek niteliğindeki $x_1 = 0.3, x_2 = 0.4, x_3 = 0.7, x_4 = 0.8$ girdi seti için çözülecektir.

5.1.1. Mantıksal ‘VE’ Problemi için CFS Çözümü

Dört girdi değişkenine sahip CFS çözümünde tek bir bulanık sistem bulunmaktadır. Sistem çıktısı bir adettir; girdi ve çıktı sözel değişkenlerinin her birinde D düşük bulanık kümesini ve Y yüksek bulanık kümesini ifade edecek şekilde iki adet bulanık küme tanımlıdır. Bu bulanık kümelerin her biri 0 ile 1 aralığında destek bölgesine sahip olmakta ve Şekil 5.2’ de sunulduğu gibi D için kullanılan üyelik fonksiyonu $f(x) = x$; Y için kullanılan üyelik fonksiyonu ise $f(x) = 1 - x$ tir. Bu sistemin çözümü için Çizelge 5.1’ deki gibi toplam $2^4 = 16$ bulanık kural tanımlanmıştır.

Çizelge 5.1. Dört Girdi Değişkenli Mantıksal ‘VE’ Problemi için CFS Kuralları

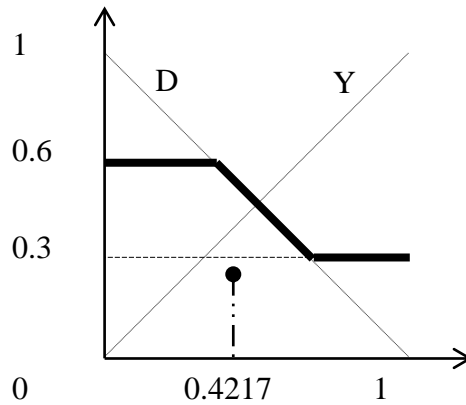
Kural	Koşul	Sonuç
K ₁ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ D ve x ₃ D ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₂ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ D ve x ₃ D ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₃ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ D ve x ₃ Y ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₄ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ D ve x ₃ Y ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₅ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ Y ve x ₃ D ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₆ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ Y ve x ₃ D ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₇ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ Y ve x ₃ Y ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₈ :	EĞER x ₁ D ve x ₂ Y ve x ₃ Y ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₉ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ D ve x ₃ D ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₁₀ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ D ve x ₃ D ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₁₁ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ D ve x ₃ Y ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₁₂ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ D ve x ₃ Y ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₁₃ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ Y ve x ₃ D ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₁₄ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ Y ve x ₃ D ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} D
K ₁₅ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ Y ve x ₃ Y ve x ₄ D	İSE y ^{CFS} D
K ₁₆ :	EĞER x ₁ Y ve x ₂ Y ve x ₃ Y ve x ₄ Y	İSE y ^{CFS} Y

Çizelge 5.2. Dört Girdili ‘VE’ Problemi için CFS Çözümü (Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları)

Kural	$\mu_{A^{ci}}(x_1)$ (x ₁ = 0.3)	$\mu_{A^{ci}}(x_2)$ (x ₂ = 0.4)	$\mu_{A^{ci}}(x_3)$ (x ₃ = 0.7)	$\mu_{A^{ci}}(x_4)$ (x ₄ = 0.8)	$\mu'_{A^{ci}}(x)$
K ₁ :	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2
K ₂ :	0.7	0.6	0.3	0.8	0.3
K ₃ :	0.7	0.6	0.7	0.2	0.2
K ₄ :	0.7	0.6	0.7	0.8	0.6
K ₅ :	0.7	0.4	0.3	0.2	0.2
K ₆ :	0.7	0.4	0.3	0.8	0.3
K ₇ :	0.7	0.4	0.7	0.2	0.2
K ₈ :	0.7	0.4	0.7	0.8	0.4
K ₉ :	0.3	0.6	0.3	0.2	0.2
K ₁₀ :	0.3	0.6	0.3	0.8	0.3
K ₁₁ :	0.3	0.6	0.7	0.2	0.2
K ₁₂ :	0.3	0.6	0.7	0.8	0.3
K ₁₃ :	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
K ₁₄ :	0.3	0.4	0.3	0.8	0.3
K ₁₅ :	0.3	0.4	0.7	0.2	0.2
K ₁₆ :	0.3	0.4	0.7	0.8	0.3

Bulanık sisteme ait, girdi/çıkıtlı bulanık setlerinin ve kuralların tanımlanmasının ardından örnek bir girdi dördlüsünün bulanıklaştırma ve çıkarsama adımları için çözümüne Çizelge

5.2’ de yer verilmiştir. Burada $\mu_{A^{c_i}}(x)$, karşılık gelen kural için ilgili girdi değerinin aidiyet derecesini; $\mu'_{A^{c_i}}(x)$ ise minimum yöntemine göre yapılan çıkarsama adımı sonucunu ($\min\{\mu_{A^{c_i}}(x_1), \mu_{A^{c_i}}(x_2), \mu_{A^{c_i}}(x_3), \mu_{A^{c_i}}(x_4)\}$), ifade etmek için kullanılmaktadır. Çıkarsama adımının ardından gerçekleştirilecek birleştirme adımında maksimum yöntemi kullanılmıştır. Verilen örnek girdi seti için bu işlemler sonucunda sonuç bulanık sette düşük bulanık kümesinin tetiklenme derecesi 0.6 iken yüksek bulanık kümesinin tetiklenme derecesi 0.3 olmaktadır. Bu doğrultuda Şekil 5.3’ teki gibi merkezi yönleme göre yapılacak durulaştırma adımının çıktısı 0.4217’ dir.



Şekil 5.3. CFS Çıkarsama Akışında Birleştirme Adımı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı

5.1.2. Mantıksal ‘VE’ Problemi için conHFS Çözümü

Mantıksal ‘VE’ problemi için conHFS ile gerçekleştirilen hiyerarşik çıkarsamada her bir katmandaki her bir alt sistem, ayrı ayrı Mamdani tipi çıkarsamanın adımlarına tabi tutulmaktadır. Bu durumun sonucu olarak üst sisteme aktarılan bilgi, bir önceki alt sistemin sonucu olan keskin bir değerdir. Problemin çözümü için gerekli HFS kuralları aşağıdadır.

conHFS çözümünde $SFS_{1,1}$ için kurallar:

K_1 : EĞER x_1 D ve x_2 D İSE $y^{1,1}$ D

K_2 : EĞER x_1 D ve x_2 Y İSE $y^{1,1}$ D

K_3 : EĞER x_1 Y ve x_2 D İSE $y^{1,1}$ D

K_4 : EĞER x_1 Y ve x_2 Y İSE $y^{1,1}$ Y

conHFS çözümünde $SFS_{1,2}$ için kurallar:

K_1 : EĞER x_3 D ve x_4 D İSE $y^{1,2}$ D

K_2 : EĞER x_3 D ve x_4 Y İSE $y^{1,2}$ D

K_3 : EĞER x_3 Y ve x_4 D İSE $y^{1,2}$ D

K_4 : EĞER x_3 Y ve x_4 Y İSE $y^{1,2}$ Y

conHFS çözümünde $SFS_{2,1}$ için kurallar:

K_1 : EĞER $y^{1,1}$ D ve $y^{1,2}$ D İSE y^{conHFS} D

K_2 : EĞER $y^{1,1}$ D ve $y^{1,2}$ Y İSE y^{conHFS} D

K_3 : EĞER $y^{1,1}$ Y ve $y^{1,2}$ D İSE y^{conHFS} D

K_4 : EĞER $y^{1,1}$ Y ve $y^{1,2}$ Y İSE y^{conHFS} Y

Çizelge 5.3' te ilgili hiyerarşik sistem için conHFS akışı kullanımı ile $SFS_{1,1}$ ' in çözümüne yer verilmiştir. Burada gerçekleştirilen bulanıklaştırma ve çıkarsama adımlarının ardından maksimum yöntemi ile yapılan birleştirme sonucunda düşük bulanık kümesinin tetiklenme derecesi 0.6, yüksek bulanık kümesinin tetiklenme derecesi ise 0.3' tür. Buna göre yapılan ve merkezi yöntem ile gerçekleştirilen durulaştırma adımı sonrası $SFS_{1,1}$ ' in keskin çıktı değeri 0.423 olacaktır.

Çizelge 5.3. Dört Girdili 'VE' Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

Kural	$\mu_{A_i}(x_1)$ ($x_1 = 0.3$)	$\mu_{A_i}(x_2)$ ($x_2 = 0.4$)	$\mu'_{A_i}(x)$
K_1 :	0.7	0.6	0.6
K_2 :	0.7	0.4	0.4
K_3 :	0.3	0.6	0.3
K_4 :	0.3	0.4	0.3

Çizelge 5.4. Dört Girdili 'VE' Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,2}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

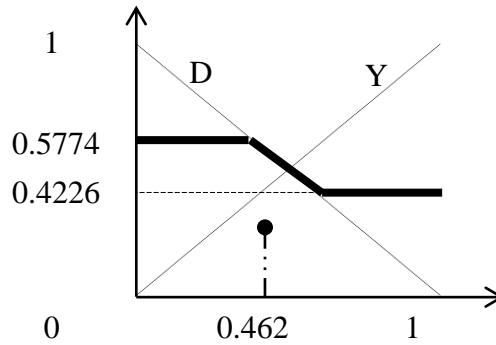
Kural	$\mu_{A_i}(x_3)$ ($x_1 = 0.7$)	$\mu_{A_i}(x_4)$ ($x_2 = 0.8$)	$\mu'_{A_i}(x)$
K_1 :	0.3	0.2	0.2
K_2 :	0.3	0.8	0.3
K_3 :	0.7	0.2	0.2
K_4 :	0.7	0.8	0.7

Çizelge 5.5. Dört Girdili 'VE' Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

Kural	$\mu_{A_i}(y^{1,1})$ $y^{1,1} = 0.423$	$\mu_{A_i}(y^{1,2})$ $y^{1,2} = 0.595$	$\mu'_{A_i}(y)$
K_1 :	0.5774	0.4053	0.4053
K_2 :	0.5774	0.5947	0.5774
K_3 :	0.4226	0.4053	0.4053
K_4 :	0.4226	0.5947	0.4226

Çizelge 5.4’ te $SFS_{1,2}$ için bulanıklaştırma ve çıkarsama adımlarının çözümü gösterilmiştir. Maksimum ile yapılan birleştirme sonucunda bu alt sistemdeki sonuç sözel değişkeninin düşük ve yüksek bulanık kümelerinin tetiklenme dereceleri sırasıyla 0.3 ve 0.7’ dir. Merkezi yöntemle gerçekleştirilen durulaştırma sonucu 0.595’ tir.

Çizelge 5.5’ te $SFS_{1,1}$ ve $SFS_{1,2}$ ile gösterilen alt sistemlerin keskin çıktı değerlerinin $SFS_{2,1}$ kök sisteminde girdi değeri olarak kullanılması sonucunda yapılan bulanıklaştırma ve çıkarsama adımlarına yer verilmiştir. Bu noktada bulanıklaştırma sonucunda elde edilen değerler önceki alt sistemlerin birleştirme sonuçlarından farklılık göstermektedir. Bu farklılık, tez çalışması kapsamında katmanlar arasındaki geçişte bilgi kaybı olarak ifade edilen olumsuzluğun bir göstergesidir. Bu alt sistemde maksimum ile yapılan birleştirme adımı sonucunda sonuç değişkenine ait düşük ve yüksek bulanık kümelerinin tetiklenme dereceleri Şekil 5.4’ teki gibi 0.5774 ve 0.4226’ dır. Merkezi yöntem ile yapılan durulaştırma sonucunda hiyerarşik sistemin çıktısı 0.462 olmuştur.



Şekil 5.4. conHFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı

5.1.3. Mantıksal ‘VE’ Problemi için HCTFS Çözümü

Mantıksal ‘VE’ probleminin HCTFS tipi hiyerarşik bulanık sistemlerle çözümünde gereksiz yere tekrarlanan durulaştırma adımlarının yarattığı bilgi kaybı adreslenmiş ve çözülmeye çalışılmıştır. HCTFS modeli sabit bir mimari [10] kullanır ve ara katmanlardaki SFS’ ler için çıkarsamayı çarpım, birleştirme adımı maksimum yöntemi ile yapılırken, üst katmanda kök alt sistemdeki birleştirme adımında toplam yöntemi kullanılarak ağırlıklı ortalama metodu ile durulaştırma yapılır. Problem için geliştirilen ve HCTFS tipi hiyerarşik sistemde kullanılacak kurallara ilerleyen kısımda yer verilmiştir.

HCTFS çözümünde SFS_{1,1} için kurallar:

$$K_1: \text{EĞER } x_1 \text{ D ve } x_2 \text{ D İSE } O_1^{1,1}$$

$$K_2: \text{EĞER } x_1 \text{ D ve } x_2 \text{ Y İSE } O_1^{1,1}$$

$$K_3: \text{EĞER } x_1 \text{ Y ve } x_2 \text{ D İSE } O_1^{1,1}$$

$$K_4: \text{EĞER } x_1 \text{ Y ve } x_2 \text{ Y İSE } O_2^{1,1}$$

HCTFS çözümünde SFS_{1,2} için kurallar:

$$K_1: \text{EĞER } x_3 \text{ D ve } x_4 \text{ D İSE } O_1^{1,2}$$

$$K_2: \text{EĞER } x_3 \text{ D ve } x_4 \text{ Y İSE } O_1^{1,2}$$

$$K_3: \text{EĞER } x_3 \text{ Y ve } x_4 \text{ D İSE } O_1^{1,2}$$

$$K_4: \text{EĞER } x_3 \text{ Y ve } x_4 \text{ Y İSE } O_2^{1,2}$$

HCTFS çözümünde SFS_{2,1} için kurallar:

$$K_1: \text{EĞER } O_1^{1,1} \text{ ve } O_1^{1,2} \text{ İSE } y^{\text{HCTFS}} \text{ D}$$

$$K_2: \text{EĞER } O_1^{1,1} \text{ ve } O_1^{1,2} \text{ İSE } y^{\text{HCTFS}} \text{ D}$$

$$K_3: \text{EĞER } O_1^{1,1} \text{ ve } O_1^{1,2} \text{ İSE } y^{\text{HCTFS}} \text{ D}$$

$$K_4: \text{EĞER } O_1^{1,1} \text{ ve } O_1^{1,2} \text{ İSE } y^{\text{HCTFS}} \text{ Y}$$

HCTFS için geliştirilmiş bulanık kurallar incelendiğinde bu kuralların mantıksal anlamda conHFS kurallarından farklılık göstermediği yalnızca ara katmandaki kuralların sonuç kısımlarının bir eşitlemeye dayalı olmayarak soyutlaştırıldığı gözlenmiştir. Çünkü bu ara katmanlarda sonuç değişkeni yoktur, sonuç seti vardır.

$$O_1^{1,1} \equiv O_D^{1,1} \text{ değerinin hesaplanması:} \quad (7)$$

$$K_1^{1,1} = \frac{\mu_{A_1'}(x)}{0.6} \left[\frac{\mu_{A_1}(x_1)}{0.7} \cdot \frac{\mu_{A_2}(x_2)}{0.6} \right] = 0.252$$

$$K_2^{1,1} = \frac{\mu_{A_2'}(x)}{0.4} \left[\frac{\mu_{A_1}(x_1)}{0.7} \cdot \frac{\mu_{A_2}(x_2)}{0.4} \right] = 0.112$$

$$K_3^{1,1} = \frac{\mu_{A_3'}(x)}{0.3} \left[\frac{\mu_{A_1}(x_1)}{0.3} \cdot \frac{\mu_{A_2}(x_2)}{0.6} \right] = 0.054$$

$$O_1^{1,1} = \max\{K_1^{1,1}, K_2^{1,1}, K_3^{1,1}\} = 0.252$$

$$O_2^{1,1} \equiv O_Y^{1,1} \text{ değerinin hesaplanması:} \quad (8)$$

$$K_4^{1,1} = \frac{\mu_{A_4'}(x)}{0.3} \left[\frac{\mu_{A_1}(x_1)}{0.3} \cdot \frac{\mu_{A_2}(x_2)}{0.4} \right] = 0.036$$

$$O_2^{1,1} = \max\{K_4^{1,1}\} = 0.036$$

$$O_{p_1}^{1,1} = \{O_1^{1,1}, O_2^{1,1}\} = \{0.252, 0.036\} \quad (9)$$

HCTFS modelinde SFS_{1,1} çözümü için gerçekleştirilen çıkarsama akışı, $x_1 = 0.3$, $x_2 = 0.4$ ve $O_{p_1}^{1,1} = \{O_1^{1,1}, O_2^{1,1}\}$ olmak üzere $O_1^{1,1}$ ve $O_2^{1,1}$ değerlerinin hesaplanmasını kapsamaktadır. Bunun için girdi değerlerinin bulanıklaştırılması ve çarpım yöntemi ile çıkarsama adımına tabi tutulması gerekmektedir. Burada kullanılan çarpım metodu yalnızca ilgili bulanık kümelerin aidiyet derecelerinin çarpımı şeklinde kullanılmamıştır. Bu çarpıma bir de bu aidiyet derecelerinin en küçüğü olan $\mu_{A_i'}(x)$ eklenmiştir. Birleştirme işlemi ise klasik maksimum yöntemi ile yapılmaktadır. Bu sürecin matematiksel ifadesine Eşitlik 7 ve 8' de yer verilmiştir. Eşitlik 9' da ise bulanık özellikteki $O_{p_1}^{1,1}$ değeri sunulmuştur.

HCTFS modelinde SFS_{1,2} çözümü için gerçekleştirilen çıkarsama akışı, $x_1 = 0.7$, $x_2 = 0.8$ ve $O_{p_1}^{1,2} = \{O_1^{1,2}, O_2^{1,2}\}$ olmak üzere $O_1^{1,2}$ ve $O_2^{1,2}$ değerlerinin hesaplanmasını kapsamaktadır ve çözümü SFS_{1,1} alt sisteminin çözümüne benzer şekilde Eşitlik 10 ve 11' deki gibi gerçekleştirilir. Eşitlik 12' de ise bulanık özellikteki $O_{p_2}^{1,2}$ değeri sunulmuştur. Bu noktada dikkate alınması gereken husus SFS_{1,1} ve SFS_{1,2} alt sistemlerinin çıktısının keskin veri değil bulanık kümelere ait dereceler içeren bir seri olduğudur. Bu seriler bir üst katmandaki alt sisteme bulanık veri olarak aktarılmaktadır.

$O_1^{1,2} \equiv O_D^{1,2}$ değerinin hesaplanması: (10)

$$K_1^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_1'}(x)}_{0.2} \left[\underbrace{\mu_{A_1^1}(x_3)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^1}(x_4)}_{0.2} \right] = 0.012$$

$$K_2^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_2'}(x)}_{0.3} \left[\underbrace{\mu_{A_1^2}(x_3)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^2}(x_4)}_{0.8} \right] = 0.072$$

$$K_3^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_3'}(x)}_{0.2} \left[\underbrace{\mu_{A_1^3}(x_3)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^3}(x_4)}_{0.2} \right] = 0.028$$

$$O_1^{1,2} = \max\{K_1^{1,2}, K_2^{1,2}, K_3^{1,2}\} = 0.072$$

$O_2^{1,2} \equiv O_Y^{1,2}$ değerinin hesaplanması: (11)

$$K_4^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_4'}(x)}_{0.7} \left[\underbrace{\mu_{A_1^4}(x_3)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^4}(x_4)}_{0.8} \right] = 0.392$$

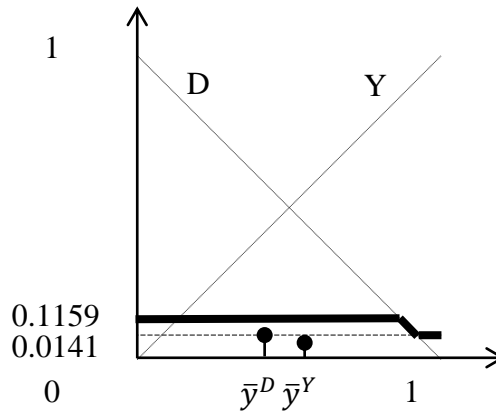
$$O_2^{1,2} = \max\{K_4^{1,2}\} = 0.392$$

$O_{p_2}^{1,2} = \{O_1^{1,2}, O_2^{1,2}\} = \{0.072, 0.392\}$ (12)

Çizelge 5.6. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde HCTFS Çözümündeki SFS_{2,1} için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları ile (\bar{y}^D ve \bar{y}^Y) Değerleri

K_i	$O_{p_1}^{1,1}$	$O_{p_2}^{1,2}$	$(O_{p_1}^{1,1} \cdot O_{p_2}^{1,2})$	$O_1^{2,1}$	\bar{y}^D	$O_2^{2,1}$	\bar{y}^Y
K_1	0.252	0.072	0.0181	0.1195	0.4707	0.0141	0.5036
K_2	0.252	0.392	0.0988				
K_3	0.036	0.072	0.0026				
K_4	0.036	0.392	0.0141				

HCTFS modelinde SFS_{2,1} sistemi, en üst katmandaki kök sistemdir ve burada yapılan işlem bulanıklaştırma adımına gerek duyulmadan, çarpım yöntemi ile yapılan çıkarsama, toplam yöntemi ile yapılan birleştirme ve ağırlıklı ortalama metodu ile yapılacak olan durulaştırma işlemidir. Gerçekleştirilen bu çıkarsama ve birleştirme adımları ve elde edilen çıktılar Çizelge 5.6’ da sunulmuştur. Bunun için her bir sonuç bulanık kümesinin ağırlık merkezi (\bar{y}^D ve \bar{y}^Y) alınır ve tetiklenme derecesi ağırlık kabul edilmek üzere Şekil 5.5’ teki gibi Ağırlık Merkezi Yöntemi ile durulaştırılır.



Şekil 5.5. Dört girdili ‘VE’ Problemi için HCTFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Bu kümenin Durulaştırılması

5.1.4. Mantıksal ‘VE’ Problemi için DF-HFS Çözümü

Tez çalışması kapsamında geliştirilen DF-HFS modelinde ara adımlarda gerçekleştirilen durulaştırma ve ardından gelen bulanıklaştırma işlemleri ortadan kaldırılmaktadır. Bu çözüm kapsamında çıkarsama yöntemi olarak minimum, birleştirme yöntemi olarak ise maksimum kullanılır. Bu sayede sonuç değişkenlerinin her bir bulanık kümesi için maksimum tetiklenme dereceleri üst katmana taşınmış olur.

Bu başlık altında mantıksal ‘VE’ problemi için $x_1 = 0.3$, $x_2 = 0.4$, $x_3 = 0.7$, $x_4 = 0.8$ olmak üzere örnek bir DF-HFS tipi hiyerarşik çıkararsama akışının uygulanışına yer verilecektir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan kurallar conHFS ve HCTFS’ den mantıksal olarak farklılık göstermez. Ancak kuralların sonuç kısımları HCTFS’ de olduğu gibi conHFS kurallarının sonuç kısımlarından şeklen daha farklıdır. Çünkü sonuç sözel değişkenini herhangi bir bulanık kümeye eşitlemek yerine sonuç bulanık kümeleri çıktı olarak kurgular.

DF-HFS çözümünde $SFS_{1,1}$ için kurallar:

- K_1 : EĞER x_1 D ve x_2 D İSE $y_1^{1,1}$
- K_2 : EĞER x_1 D ve x_2 Y İSE $y_1^{1,1}$
- K_3 : EĞER x_1 Y ve x_2 D İSE $y_1^{1,1}$
- K_4 : EĞER x_1 Y ve x_2 Y İSE $y_2^{1,1}$

DF-HFS çözümünde $SFS_{1,2}$ için kurallar:

- K_1 : EĞER x_3 D ve x_4 D İSE $y_1^{1,2}$
- K_2 : EĞER x_3 D ve x_4 Y İSE $y_1^{1,2}$
- K_3 : EĞER x_3 Y ve x_4 D İSE $y_1^{1,2}$
- K_4 : EĞER x_3 Y ve x_4 Y İSE $y_2^{1,2}$

DF-HFS çözümünde $SFS_{1,2}$ için kurallar:

- K_1 : EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE $y^{DF-HFS} D$
- K_2 : EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE $y^{DF-HFS} D$
- K_3 : EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE $y^{DF-HFS} D$
- K_4 : EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE $y^{DF-HFS} Y$

Çizelge 5.7’ de $SFS_{1,1}$ için gerçekleştirilen bulanıklaştırma ve çıkararsama işlemlerine yer verilmiştir. Buna göre $SFS_{1,1}$ alt sistemi için birleştirme sonucunda düşük bulanık kümesi için 0.6 ve yüksek bulanık kümesi için 0.3 değerleri bir set olarak ($y_{p_1}^{1,1}$) hesaplanıp üst katmana taşınır. Benzer şekilde Çizelge 5.8’ e göre de $SFS_{1,2}$ düşük bulanık kümesi için 0.3 ve yüksek bulanık kümesi için 0.7 tetiklenme değerleri elde edilip bu değerler ($y_{p_2}^{1,2}$) üst katmandaki alt sisteme aktarılır.

Çizelde 5.9’ da kök sistemin çıkararsama akışına yer verilmiştir. Buna göre en üst katmanda kök sistem olan $SFS_{2,1}$ ’ de durulaştırma adımına ihtiyaç duyulmaksızın çıkararsama adımı başlar. Çıkararsama akışının ardından gerçekleştirilen birleştirme sonucunda Şekil 5.6’ da yer alan bulanık küme grafikleri elde edilmektedir. Bu grafiğin Şekil 5.3’ te CFS

sonucunda elde edilen ile aynı olması, aynı durulaştırma tekniği kullanılması halinde DF-HFS' nin CFS çıktılarını elde etmesini sağlamaktadır.

Çizelge 5.7. Dört Girdili 'VE' Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{1,1} için

Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{c_i}}(x_1)$ ($x_1 = 0.3$)	$\mu_{A^{c_i}}(x_2)$ ($x_2 = 0.4$)	$\mu'_{A^{c_i}}(x)$
K_1 :	0.7	0.6	0.6
K_2 :	0.7	0.4	0.4
K_3 :	0.3	0.6	0.3
K_4 :	0.3	0.4	0.3

Çizelge 5.8. Dört Girdili 'VE' Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{1,2} için

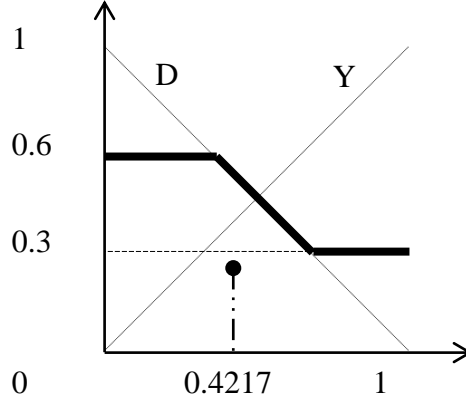
Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{c_i}}(x_3)$ ($x_1 = 0.7$)	$\mu_{A^{c_i}}(x_4)$ ($x_2 = 0.8$)	$\mu'_{A^{c_i}}(x)$
K_1 :	0.3	0.2	0.2
K_2 :	0.3	0.8	0.3
K_3 :	0.7	0.2	0.2
K_4 :	0.7	0.8	0.7

Çizelge 5.9. Dört Girdili 'VE' Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{2,1} için Çıkarsama

ve Birleştirme Aşamaları

K_i	$y_{p_1}^{1,1}$	$y_{p_2}^{1,2}$	$\min\{y_{p_1}^{1,1}, y_{p_2}^{1,2}\}$
K_1 :	0.6	0.3	0.3
K_2 :	0.6	0.7	0.6
K_3 :	0.3	0.3	0.3
K_4 :	0.3	0.7	0.3



Şekil 5.6. DF-HFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı

5.2. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için Deneyler

Çalışmada mantıksal ‘VE’ probleminde olduğu gibi mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ problemi için de CFS, conHFS, HCTFS ve DF-HFS yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu problem mantıksal ‘VE’ problemine benzer şekilde anlaşılması ve kural yazımı kolay bir problemdir. Ayrıca DF-HFS’ nin en büyük gereksinimi olan CFS kuralları ile özdeş kurallar üretilebilmesi şartını da sağladığı için katmanlar arasındaki bilgi aktarımının gözlenmesi için iyi bir örnek teşkil eder.

Mantıksal ‘VE’ deneylerinde olduğu gibi, bu deneylerde de mimarideki değişimin sebep olduğu farklılıkları gözleyebilmek adına girdi sayısı 4 ve 6 olmak üzere iki tip hiyerarşik yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sistem mimarisi Şekil 5.1’ de yer almaktadır. Kullanılan sözel değişkenlere ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 5.2’ de sunulmuştur. Bu bölümün alt başlıkları altında ‘Dışlayan VEYA’ probleminin dört girdili örnek bir set için ($x_1 = 0.3$, $x_2 = 0.4$, $x_3 = 0.7$, $x_4 = 0.8$) CFS, conHFS, HCTFS ve DF-HFS çözümüne yer verilecektir.

5.2.1. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için CFS Çözümü

Dört girdi değişkenine sahip CFS çözümünde tek bir bulanık sistem bulunmaktadır. Sistem çıktısı bir adettir; girdi ve çıktı sözel değişkenlerinin her birinde D düşük bulanık kümesini ve Y yüksek bulanık kümesini ifade edecek şekilde iki adet bulanık küme tanımlıdır ve bu sistemin çözümü için toplam $2^4 = 16$ bulanık kural tanımlanmıştır. Tanımlanan bulanık kurallara Çizelge 5.10’ da yer verilmiştir.

Çizelge 5.10. Dört Girdi Değişkenli Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ için CFS Kuralları

K_i	Koşul								Sonuç						
K_1 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	D	ve	x_3	D	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	D
K_2 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	D	ve	x_3	D	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	Y
K_3 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	D	ve	x_3	Y	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	Y
K_4 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	D	ve	x_3	Y	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	D
K_5 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	Y	ve	x_3	D	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	Y
K_6 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	Y	ve	x_3	D	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	D
K_7 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	Y	ve	x_3	Y	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	D
K_8 :	EĞER	x_1	D	ve	x_2	Y	ve	x_3	Y	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	Y
K_9 :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	D	ve	x_3	D	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	Y
K_{10} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	D	ve	x_3	D	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	D
K_{11} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	D	ve	x_3	Y	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	D
K_{12} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	D	ve	x_3	Y	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	Y
K_{13} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	Y	ve	x_3	D	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	D
K_{14} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	Y	ve	x_3	D	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	Y
K_{15} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	Y	ve	x_3	Y	ve	x_4	D	İSE	y^{CFS}	Y
K_{16} :	EĞER	x_1	Y	ve	x_2	Y	ve	x_3	Y	ve	x_4	Y	İSE	y^{CFS}	D

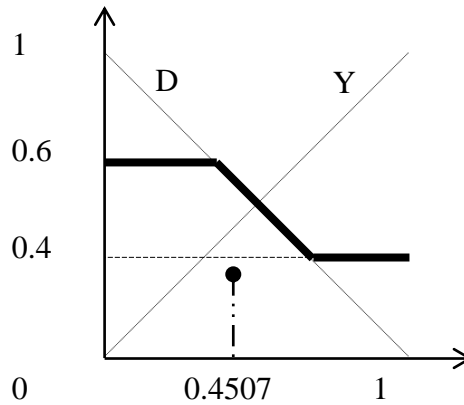
Çizelge 5.11. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için CFS Çözümü (Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları)

K_i	$\mu_{A_i}(x_1)$ ($x_1 = 0.3$)	$\mu_{A_i}(x_2)$ ($x_2 = 0.4$)	$\mu_{A_i}(x_3)$ ($x_3 = 0.7$)	$\mu_{A_i}(x_4)$ ($x_4 = 0.8$)	$\mu'_{A_i}(x)$
K_1 :	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2
K_2 :	0.7	0.6	0.3	0.8	0.3
K_3 :	0.7	0.6	0.7	0.2	0.2
K_4 :	0.7	0.6	0.7	0.8	0.6
K_5 :	0.7	0.4	0.3	0.2	0.2
K_6 :	0.7	0.4	0.3	0.8	0.3
K_7 :	0.7	0.4	0.7	0.2	0.2
K_8 :	0.7	0.4	0.7	0.8	0.4
K_9 :	0.3	0.6	0.3	0.2	0.2
K_{10} :	0.3	0.6	0.3	0.8	0.3
K_{11} :	0.3	0.6	0.7	0.2	0.2
K_{12} :	0.3	0.6	0.7	0.8	0.3
K_{13} :	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
K_{14} :	0.3	0.4	0.3	0.8	0.3
K_{15} :	0.3	0.4	0.7	0.2	0.2
K_{16} :	0.3	0.4	0.7	0.8	0.3

Bulanık kuralların ve girdi/çıktı bulanık setlerinin ve kuralların tanımlanmasının ardından örnek bir girdi dördlüsünün çözümü Çizelge 5.11’ deki gibidir. Burada $\mu_{A_i}(x)$, karşılık gelen kural için ilgili girdi değerinin ilgili bulanık kümeye aidiyet derecesini, $\mu'_{A_i}(x)$ ise

minimum yöntemi kullanarak yapılan çıkarsama adımının gereği olarak karşılık gelen bulanık kural için her bir girdi değişkeni için hesaplanan aidiyet derecelerinden en küçüğünü ifade etmek için kullanılmaktadır. Çıkarsama adımının ardından maksimum yöntemine göre birleştirilen bulanık kümelerden elde edilen sonuç üyelik fonksiyonu Şekil 5.7' deki gibidir. Buna göre, gerçekleştirilen CFS içerisinde birleştirme adımı sonucunda, sonuç sözel değişkenindeki düşük bulanık kümesi 0.6 derecesinde, yüksek bulanık kümesi ise 0.4 derecesinde tetiklenmiştir.

Mantıksal 'Dışlayan VEYA' probleminin CFS ile çözümü için yapılan ve maksimum metodu ile çözülen birleştirme aşamasının ardından, merkezi yonteme göre gerçekleştirilen durulaştırma adımı sonrası sistem çıktısı Şekil 5.7' de görüldüğü üzere 0.4507 olarak hesaplanmıştır. Bu değer sonraki aşamalarda uygulanacak olan hiyerarşik sistem çıktılarının doğruluğunu ölçmede referans alınacaktır. Çünkü daha önce de üzerinde tartışıldığı gibi tez çalışması kapsamında odaklanan konu hiyerarşik sistem çıktılarının CFS çıktılarına göre farklılıklarını incelemek ve CFS davranışına en yakın davranış sergileyen hiyerarşik çıkarsama akışını oluşturmaktır.



Şekil 5.7. CFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı

5.2.2. Mantıksal 'Dışlayan VEYA' Problemi için conHFS Çözümü

Mantıksal 'Dışlayan VEYA' problemi için conHFS ile gerçekleştirilen hiyerarşik çıkarsamada her bir katmandaki her bir alt sistem, ayrı ayrı Mamdani tipi çıkarsamaya tabi tutulmaktadır. Hiyerarşik sistemde kullanılacak kurallara ilerleyen kısımda yer verilmiştir.

conHFS çözümünde $SFS_{1,1}$ için kurallar:

K_1 : EĞER x_1 D ve x_2 D İSE $y^{1,1}$ D

K_2 : EĞER x_1 D ve x_2 Y İSE $y^{1,1}$ Y

K_3 : EĞER x_1 Y ve x_2 D İSE $y^{1,1}$ Y

K_4 : EĞER x_1 Y ve x_2 Y İSE $y^{1,1}$ D

conHFS çözümünde $SFS_{1,2}$ için kurallar:

K_1 : EĞER x_3 D ve x_4 D İSE $y^{1,2}$ D

K_2 : EĞER x_3 D ve x_4 Y İSE $y^{1,2}$ Y

K_3 : EĞER x_3 Y ve x_4 D İSE $y^{1,2}$ Y

K_4 : EĞER x_3 Y ve x_4 Y İSE $y^{1,2}$ D

conHFS çözümünde $SFS_{2,1}$ için kurallar:

K_1 : EĞER $y^{1,1}$ D ve $y^{1,2}$ D İSE y^{conHFS} D

K_2 : EĞER $y^{1,1}$ D ve $y^{1,2}$ Y İSE y^{conHFS} Y

K_3 : EĞER $y^{1,1}$ Y ve $y^{1,2}$ D İSE y^{conHFS} Y

K_4 : EĞER $y^{1,1}$ Y ve $y^{1,2}$ Y İSE y^{conHFS} D

Geleneksel hiyerarşik çıkarsama çözümü olan conHFS' nin örnek set üzerindeki uygulaması ilk katmanda yer alan $SFS_{1,1}$ ve $SFS_{1,2}$ için Çizelge 5.12 ve 5.13' de her bir kurala göre oluşturulan matris yapısında gösterilmiştir. Buna göre $SFS_{1,1}$ ' in birleştirme ve durulaştırma sonucu elde ettiği keskin çıktı 0.4507 iken bu değer $SFS_{1,2}$ için 0.4053 olarak hesaplanmıştır. Bu iki keskin değer üst katmana aktarılır. Üst katmanda yer alan kök sistem $SFS_{2,1}$ ' in çözümü ise Çizelge 5.14' de sunulmuştur.

Çizelge 5.14' te dikkat edilmesi gereken husus, kök sistemde gerçekleştiren bulanıklaştırma adımı sonrasında elde edilen verinin önceki sistemlerin birleştirme adımı çıktılarını ile özdeş olmayışdır. Katmanlar arasındaki bilgi kaybı bu noktada açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 5.12. Dört Girdili 'Dışlayan VEYA' Probleminde conHFS Çözümündeki $SFS_{1,1}$ için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{G_1}}(x_1)$ ($x_1 = 0.3$)	$\mu_{A^{G_1}}(x_2)$ ($x_2 = 0.4$)	$\mu'_{A^{G_1}}(x)$
K_1 :	0.7	0.6	0.6
K_2 :	0.7	0.4	0.4
K_3 :	0.3	0.6	0.3
K_4 :	0.3	0.4	0.3

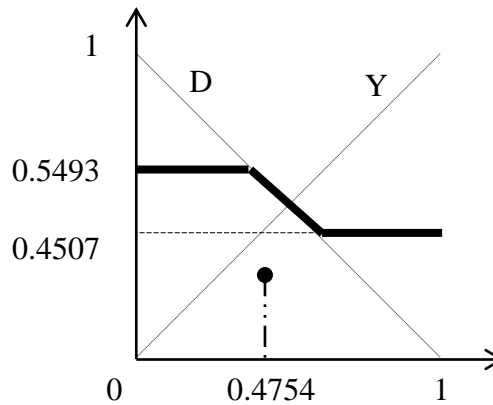
Çizelge 5.13. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde conHFS Çözümündeki SFS_{1,2} için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{ci}}(x_3)$ ($x_1 = 0.7$)	$\mu_{A^{ci}}(x_4)$ ($x_2 = 0.8$)	$\mu'_{A^{ci}}(x)$
K_1 :	0.3	0.2	0.2
K_2 :	0.3	0.8	0.3
K_3 :	0.7	0.2	0.2
K_4 :	0.7	0.8	0.7

Çizelge 5.14. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde conHFS Çözümündeki SFS_{2,1} için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{ci}}(y^{1,1})$ $y^{1,1} = 0.4507$	$\mu_{A^{ci}}(y^{1,2})$ $y^{1,2} = 0.4053$	$\mu'_{A^{ci}}(y)$
K_1 :	0.5493	0.5947	0.5493
K_2 :	0.5493	0.4053	0.4053
K_3 :	0.4507	0.5947	0.4507
K_4 :	0.4507	0.4053	0.4053

Kök sistemin birleştirme adımı sonrasında meydana gelen üyelik fonksiyonlarına ait grafik Şekil 5.8’ deki gibidir. Grafik incelendiğinde, sonuç değişkenindeki bulanık kümelerin tetiklenme derecelerinin Şekil 5.7’ deki CFS çözümündekine nazaran farklılık gösterdiği gözlenebilir. Buna göre sistemin çıktısı CFS çözümü ile 0.4507 iken bu çıktı, ilgili CFS ile eş hiyerarşide olan ve özdeş kurullarla oluşturulan conHFS için 0.4754’ tür.



Şekil 5.8. conHFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Durulaştırma Çıktısı

5.2.3. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için HCTFS Çözümü

Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ probleminin HCTFS tipi hiyerarşik bulanık sistemlerle çözümünde katmanlar arası geçişteki durulaştırma adımı ortadan kaldırılmaktadır. AHFS mimarisi ile bağımlı çalışan HCTFS tipi hiyerarşik çıkarsamaya göre alt sistemlerin çözümünde çıkarsama için çarpım birleştirme içinse maksimum yöntemi kullanılırken; bu teknikler kök sistemde sırasıyla çarpım ve toplamdır. Kullanılacak kurallar aşağıdadır.

HCTFS çözümünde SFS_{1,1} için kurallar:

- K₁: EĞER x₁ D ve x₂ D İSE O₁^{1,1}
- K₂: EĞER x₁ D ve x₂ Y İSE O₂^{1,1}
- K₃: EĞER x₁ Y ve x₂ D İSE O₂^{1,1}
- K₄: EĞER x₁ Y ve x₂ Y İSE O₁^{1,1}

HCTFS çözümünde SFS_{1,2} için kurallar:

- K₁: EĞER x₃ D ve x₄ D İSE O₁^{1,2}
- K₂: EĞER x₃ D ve x₄ Y İSE O₂^{1,2}
- K₃: EĞER x₃ Y ve x₄ D İSE O₂^{1,2}
- K₄: EĞER x₃ Y ve x₄ Y İSE O₁^{1,2}

HCTFS çözümünde SFS_{1,2} için kurallar:

- K₁: EĞER O₁^{1,1} ve O₁^{1,2} İSE y^{HCTFS} D
- K₂: EĞER O₁^{1,1} ve O₁^{1,2} İSE y^{HCTFS} Y
- K₃: EĞER O₁^{1,1} ve O₁^{1,2} İSE y^{HCTFS} Y
- K₄: EĞER O₁^{1,1} ve O₁^{1,2} İSE y^{HCTFS} D

HCTFS modelinde SFS_{1,1} alt sisteminde x₁ = 0.3, x₂ = 0.4 ve O_{p₁}^{1,1} = {O₁^{1,1}, O₂^{1,1}} olmak üzere bu değere ait hesaplamalara Eşitlik 13 ve 14’ de yer verilmiştir. İşlemler sonucunda elde edilen bulanık küme ise Eşitlik 15’ te görüldüğü gibi üst katmana aktarılmaktadır.

O₁^{1,1} ≡ O_D^{1,1} değerinin hesaplanması: (13)

$$K_1^{1,1} = \underbrace{\mu_{A_1'}(x)}_{0.6} \left[\underbrace{\mu_{A_1^1}(x_1)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^1}(x_2)}_{0.6} \right] = 0.252$$

$$K_4^{1,1} = \underbrace{\mu_{A_4'}(x)}_{0.3} \left[\underbrace{\mu_{A_1^4}(x_1)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^4}(x_2)}_{0.4} \right] = 0.036$$

$$O_1^{1,1} = \max\{K_1^{1,1}, K_4^{1,1}\} = 0.252$$

$$O_2^{1,1} \equiv O_Y^{1,1} \text{ değerinin hesaplanması:} \quad (14)$$

$$K_2^{1,1} = \underbrace{\mu_{A_2'}(x)}_{0.4} \left[\underbrace{\mu_{A_1^2}(x_1)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^2}(x_2)}_{0.4} \right] = 0.112$$

$$K_3^{1,1} = \underbrace{\mu_{A_3'}(x)}_{0.3} \left[\underbrace{\mu_{A_1^3}(x_1)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^3}(x_2)}_{0.6} \right] = 0.054$$

$$O_2^{1,1} = \max\{K_2^{1,1}, K_3^{1,1}\} = 0.112$$

$$O_{p_1}^{1,1} = \{O_1^{1,1}, O_2^{1,1}\} = \{0.252, 0.112\} \quad (15)$$

HCTFS modelinde SFS_{1,2} çözümü için gerçekleştirilen hesaplamalar, $x_1 = 0.7$, $x_2 = 0.8$ ve $O_{p_2}^{1,2} = \{O_1^{1,2}, O_2^{1,2}\}$ olmak üzere $O_1^{1,2}$ ve $O_2^{1,2}$ değerlerinin hesaplanmasını kapsamaktadır ve ilgili hesaplamalara Eşitlik 16 ve 17' de yer verilmiştir. İşlemler sonucunda elde edilen bulanık küme ise Eşitlik 18' de görüldüğü gibi üst katmana aktarılmaktadır.

$$O_1^{1,2} \equiv O_D^{1,2} \text{ değerinin hesaplanması:} \quad (16)$$

$$K_1^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_1'}(x)}_{0.2} \left[\underbrace{\mu_{A_1^1}(x_3)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^1}(x_4)}_{0.2} \right] = 0.012$$

$$K_4^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_4'}(x)}_{0.7} \left[\underbrace{\mu_{A_1^4}(x_3)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^4}(x_4)}_{0.8} \right] = 0.392$$

$$O_1^{1,2} = \max\{K_1^{1,2}, K_4^{1,2}\} = 0.392$$

$$O_2^{1,2} \equiv O_Y^{1,2} \text{ değerinin hesaplanması:} \quad (17)$$

$$K_2^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_2'}(x)}_{0.3} \left[\underbrace{\mu_{A_1^2}(x_3)}_{0.3} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^2}(x_4)}_{0.8} \right] = 0.072$$

$$K_3^{1,2} = \underbrace{\mu_{A_3'}(x)}_{0.2} \left[\underbrace{\mu_{A_1^3}(x_3)}_{0.7} \cdot \underbrace{\mu_{A_2^3}(x_4)}_{0.2} \right] = 0.028$$

$$O_2^{1,2} = \max\{K_2^{1,2}, K_3^{1,2}\} = 0.072$$

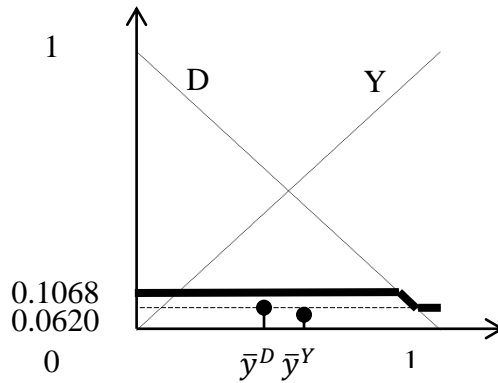
$$O_{p_2}^{1,2} = \{O_1^{1,2}, O_2^{1,2}\} = \{0.392, 0.072\} \quad (18)$$

HCTFS modelinde en üst katmanda yer alan ve kök sistem olan SFS_{2,1} içerisinde temelde yapılan, bulanıklaştırma adımına gerek duyulmadan doğrudan yapılan çıkarsama, birleştirme ve durulaştırma işlemleridir.

Çizelge 5.15. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde HCTFS Çözümündeki $SFS_{2,1}$ için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları ile $(\bar{y}^D$ ve \bar{y}^Y) Değerleri

K_i	$O_{p_1}^{1,1}$	$O_{p_2}^{1,2}$	$(O_{p_1}^{1,1} \cdot O_{p_2}^{1,2})$	$O_1^{2,1}$	\bar{y}^D	$O_2^{2,1}$	\bar{y}^Y
K_1 :	0.252	0.392	0.0988	0.1068	0.4738	0.0620	0.5154
K_2 :	0.252	0.072	0.0181				
K_3 :	0.112	0.392	0.0439				
K_4 :	0.112	0.072	0.0080				

Kök sistemde öncelikle çıkarsama adımında çarpım ve ara adımlardan farklı olarak birleştirme aşamasında toplam yöntemleri Çizelge 5.15’ deki gibi uygulanmış ve ağırlıklı ortalama durulaştırma tekniğini kullanmak üzere Şekil 5.9’ daki bulanık kümeler elde edilmiştir. Bu bulanık kümelerin herbiri için ağırlık merkezleri hesaplanarak kısmen bir yerel durulaştırma işlemi yapılmış ve buradan elde edilen değerler \bar{y}^D ve \bar{y}^Y olarak kaydedilmiştir. Ardından bu her bir bulanık kümenin tetiklenme dereceleri ağırlık kabul edilerek bu değerlerin ağırlıklı ortalaması alınmış ve nihai çıktı elde edilmiştir. Buna göre Şekil 5.9’ da birleştirme aşaması sonrasında oluşan bulanık küme ve ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulaştırmayı sağlayacak olan yerel ağırlık merkezleri sunulmuştur. Sonuçta elde edilen sistem çıktısı 0.4891 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.9. HCTFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi ve Bu Kümenin Durulaştırılması

5.2.4. Mantıksal ‘Dışlayan VEYA’ Problemi için DF-HFS Çözümü

Tez çalışması kapsamında geliştirilen DF-HFS modelinde ara adımlarda gerçekleştirilen durulaştırma ve ardından gelen bulanıklaştırma işlemleri ortadan kaldırılmaktadır. Bu çözüm kapsamında her bir alt sistemde, çıkarsama yöntemi olarak minimum, birleştirme

yöntemi olarak ise maksimum kullanılır. Bu sayede sonuç değişkenlerinin her bir bulanık kümesi için maksimum tetiklenme dereceleri üst katmana taşınmış olur. Dört girdili ($x_1 = 0.3$, $x_2 = 0.4$, $x_3 = 0.7$, $x_4 = 0.8$) ‘Dışlayan VEYA’ deneyinin DF-HFS ile çözümü için kullanılan kurallara ve her bir alt sistemde gerçekleştirilen işlemlere aşağıda yer verilmiştir.

DF-HFS çözümünde SFS_{1,1} için kurallar:

K₁: EĞER x_1 D ve x_2 D İSE $y_1^{1,1}$

K₂: EĞER x_1 D ve x_2 Y İSE $y_2^{1,1}$

K₃: EĞER x_1 Y ve x_2 D İSE $y_2^{1,1}$

K₄: EĞER x_1 Y ve x_2 Y İSE $y_1^{1,1}$

DF-HFS çözümünde SFS_{1,2} için kurallar:

K₁: EĞER x_3 D ve x_4 D İSE $y_1^{1,2}$

K₂: EĞER x_3 D ve x_4 Y İSE $y_2^{1,2}$

K₃: EĞER x_3 Y ve x_4 D İSE $y_2^{1,2}$

K₄: EĞER x_3 Y ve x_4 Y İSE $y_1^{1,2}$

DF-HFS çözümünde SFS_{1,2} için kurallar:

K₁: EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE y^{DF-HFS} D

K₂: EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE y^{DF-HFS} Y

K₃: EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE y^{DF-HFS} Y

K₄: EĞER $y_1^{1,1}$ ve $y_1^{1,2}$ İSE y^{DF-HFS} D

Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17’ de en alt katmanda yer alan SFS_{1,1} ve SFS_{1,2} sistemlerinde gerçekleştirilen bulanıklaştırma ve çıkarsama aşamalarına yer verilmiştir. Bu sistemlerde $y_{p_1}^{1,1}$ ve $y_{p_2}^{1,2}$ değerleri sonuç bulanık kümelerinin maksimum tetiklenme derecelerine göre birleştirilmesiyle hesaplanır ve üst katmana iletilir. Buna göre $y_{p_1}^{1,1} = \{0.6, 0.4\}$ ve $y_{p_2}^{1,2} = \{0.7, 0.3\}$ olacak şekilde kök alt sisteme doğrudan aktarılmaktadır. Bu durumda conHFS ve HCTFS’ de karşılaşılan ve katmanlar arası geçişteki bilgi kaybına temel teşkil eden, alt katmanlardaki birleştirme sonucunun üst katmandaki bulanıklaştırma adımı ardından tekrar elde edilememesi sorunu, aradaki yanılıcı çıkarsama aşamaları ortadan kaldırıldığı için doğrudan çözülmüş olur.

DF-HFS akışına göre geliştirilen hiyerarşik yapıda en üst katmanda yer alan kök alt sistem çözümü (SFS_{2,1}) Çizelge 5.18’ deki gibi bulanıklaştırma adımına ihtiyaç duyulmaksızın çıkarsama adımı başlar. Çıkarsama akışının ardından gerçekleştirilen birleştirme

sonucunda Şekil 5.10’ da yer alan bulanık küme elde edilmektedir. Elde edilen bu bulanık küme özdeş problem için geliştirilmiş ve Şekil 5.7’ de sunulmuş olan CFS çözümündeki bulanık küme ile aynıdır ve sistemin çıktısı CFS için de olduğu gibi 0.4507 olarak hesaplanmıştır. Bu eşitliğin sebebi, her iki sistemin de sonuç sözel değişkenindeki her bir bulanık küme için maksimum tetiklenme derecesini en üst katmana kadar taşıyor olmalarıdır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi bu eşitliğin sağlanmasındaki koşul CFS ile HFS’ nin özdeş kurallara sahip olmasıdır. Aksi durumlarda DF-HFS’ nin amacı, ilişkili CFS’ ye en yakın çıktıları üretebilmek olacaktır.

Çizelge 5.16. Dört Girdili ‘Dışlayan VEYA’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{1,1} için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

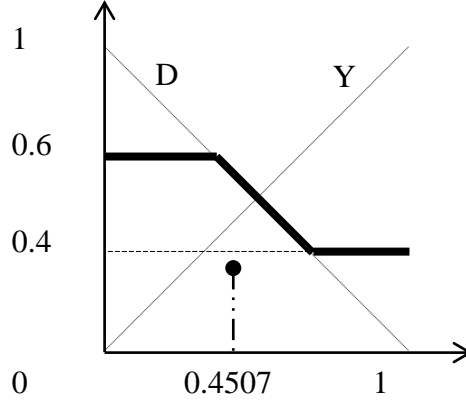
K_i	$\mu_{A^{c_i}}(x_1)$ ($x_1 = 0.3$)	$\mu_{A^{c_i}}(x_2)$ ($x_2 = 0.4$)	$\mu'_{A^{c_i}}(x)$
K_1 :	0.7	0.6	0.6
K_2 :	0.7	0.4	0.4
K_3 :	0.3	0.6	0.3
K_4 :	0.3	0.4	0.3

Çizelge 5.17. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{1,2} için Bulanıklaştırma ve Çıkarsama Aşamaları

K_i	$\mu_{A^{c_i}}(x_3)$ ($x_1 = 0.7$)	$\mu_{A^{c_i}}(x_4)$ ($x_2 = 0.8$)	$\mu'_{A^{c_i}}(x)$
K_1 :	0.3	0.2	0.2
K_2 :	0.3	0.8	0.3
K_3 :	0.7	0.2	0.2
K_4 :	0.7	0.8	0.7

Çizelge 5.18. Dört Girdili ‘VE’ Probleminde DF-HFS Çözümündeki SFS_{2,1} için Çıkarsama ve Birleştirme Aşamaları

K_i	$y_{p_1}^{1,1}$	$y_{p_2}^{1,2}$	$\min\{y_{p_1}^{1,1}, y_{p_2}^{1,2}\}$
K_1 :	0.6	0.7	0.6
K_2 :	0.6	0.3	0.3
K_3 :	0.4	0.7	0.4
K_4 :	0.4	0.3	0.3



Şekil 5.10. DF-HFS Çıkarsama Akışı Sonucunda Elde Edilen Sonuç Bulanık Kümesi

5.3. Mantıksal ‘VE’ ve ‘Dışlayan VEYA’ için Deney Sonuçları

Mantıksal ‘VE’ ve ‘Dışlayan VEYA’ problemleri için kullanılan dört bulanık çıkarsama yöntemi (CFS, conHFS, HCTFS, DF-HFS) 4 ve 6 girdi değişkenini ayrı ayrı ele alacak şekilde değerlendirilmiştir. Bunun için oluşturulan değerlendirme kümesinde her bir girdi değişkeni, 0.1’ er artışla 0.1 ile 0.9 arasında 9 adet değer almaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen değerlendirme kümesi boyutu 4 girdili deneyler için 9^4 ve 6 girdili deneyler için 9^6 kadardır. Ayrıca sistemlerin çözümü için CFS kullanımında 4 girdili deneylerde 2^4 ve 6 girdili deneylerde 2^6 adet kural tanımlanırken, bu değer hiyerarşik yaklaşımlarda 4 girdili-3 alt sistemli ve 6 girdili-5 alt sistemli deneyler için sırasıyla $3 \cdot 2^2$ ve $5 \cdot 2^2$ kadardır.

Daha önce de üzerinde durulduğu gibi, hiyerarşik sistemlerin temel amacı CFS ile gerek kural oluşturmadaki gerekse hesaplama karmaşıklığındaki zorlukların üstesinden gelmektir. Ancak bu amacı gerçekleştirirken, CFS sonuçlarına olabildiğince yakın değerler elde edilmesi önemli bir koşuldur. Aksi durumlarda, yani hiyerarşik sistemin CFS doğruluğu ile çalıştırılmadığı hallerde karmaşık CFS’lerin alt sistemlere ayrıştırılmasında, sistem başarısının ölçülememesinden kaynaklı çekinceler meydana gelmektedir.

Çizelge 5.19’ da gerçekleştirilen üç farklı türdeki hiyerarşik sistemin her bir girdi seti için oluşturduğu sonuç değerinin bunlara eşdeğer CFS sonucu ile karşılaştırmasına yer verilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak RMSE değerinden yararlanılmıştır. Buna göre conHFS ve HCTFS’ den elde edilen çıktıların CFS’ den bir miktar farklılık gösterdiği

ancak DF-HFS' nin CFS çıktıları ile eş sonuçlar elde edebildiği görülmektedir. Bundan farklı olarak conHFS ve HCTFS için geliştirilen çözümlerde katmanlar arasındaki veri kaybı probleminin üstesinden gelinemediği ve katman sayısı arttıkça bu kayba bağlı bozulmanın da arttığı gözlenmektedir.

Çizelge 5.19. Hiyerarşik Sistemlerin CFS' ye Kıyasla RMSE Değerleri

Problem	Girdi Adedi	conHFS	HCTFS	DF-HFS
VE	4	0.00278862	0.06060485	0
VE	6	0.00465178	0.08626227	0
Dışlayan VEYA	4	0.00096322	0.03414557	0
Dışlayan VEYA	6	0.00117153	0.03665665	0

Gerçekleştirilen deneylerde DF-HFS' nin CFS performansı ile çalışmasının sebebi, alt katmanlarda, çıktının her bir bulanık kümesi için maksimum metoduna göre birleştirme işlemi sonucunda hesaplanan tetiklenme derecesinin üst katmanlara kadar varlığını korumasıdır. Bu durum, CFS için gerçekleştirilen birleştirme aşaması sonuç bulanık kümesinin DF-HFS ile eşdeğer olmasını sağlamakta ve keskin sonuç değerinin mümkün olduğunca birbirine yakın ve hatta eşit olmasını sağlamaktadır. Ancak böyle bir yöntemin uygulanmasında CFS ve hiyerarşik sistemlerin kurallarının birbirleri ile denk olması önemli bir koşuldur. CFS kuralları ile eşdeğer alt sistem kuralları oluşturulmadığı durumlarda bu eşitlik bir miktar bozulabilmektedir. Ancak mantıksal 'VE' ve 'Dışlayan VEYA' problemlerinde CFS kuralları ile hiyerarşik mimaride tanımlanan alt sistem kurallarının eşdeğer oluşu bu problemi ortaya çıkarmayacağından sağlıklı ve adil bir yöntem karşılaştırmasını olası kılmaktadır.

5.4. RMR Problemi için Deneyler

Çalışmada Kaya Kütle Puanı (Rock Mass Rating-RMR) hesaplama probleminin CFS, conHFS, HCTFS ve DF-HFS ile çözümü gerçekleştirilmiş, bu yöntemler farklı ölçüm tekniklerinin yardımıyla performans açısından değerlendirilmiştir. RMR, Z. T. Bieniawski [31] tarafından geliştirilmiş olan bir kaya kütle sınıflandırma biçimidir. Bu sınıflandırma amprik bir yöntemdir ve büyük bir kısmı tünelcilik olmak üzere madencilik, temel gibi birçok mühendislik uygulamasında tasarım esnasında fikir vermesi açısından önemlidir.

RMR' in hesaplaması iki temel aşamada gerçekleştirilir. Bunların ilki 5 adet parametre yardımı ile hesaplanan Temel RMR, ikincisi ise bu 5 parametreye ek olarak Süreksizlik Yönelimi bilgisinin dikkate alınması ile oluşturulan Düzeltilmiş RMR' dir.

Çizelge 5.20. Süreksizlik Koşulları Sözel Değişkenleri

Süreksizlik devamlılık (l)			
l (m)	Küme	Puan	Açıklama
< 1	K1	6	Süreksizlik izinin gözlenen uzunluğu
1-3	K2	4	
3-10	K3	2	
10-20	K4	1	
> 20	K5	0	
Süreksizlik açıklık (a)			
a (mm)	Küme	Puan	Açıklama
0	K1	6	Bir süreksizliğin komşu iki yüzeyi arasındaki mesafe
< 0.1	K2	5	
0.1-1	K3	4	
1-5	K4	1	
> 5	K5	0	
Süreksizlik pürüzlülük (r)			
r (kategorik)	Küme	Puan	Açıklama
Çok pürüzlü	K1	6	Bir süreksizlik yüzeyinin düzlemsellikten sapma ölçüsü
Pürüzlü	K2	5	
Az pürüzlü	K3	3	
Düz	K4	1	
Kaygan	K5	0	
Süreksizlik dolgu (fill)			
fill (kategorik)	Küme	Puan	Açıklama
Yok	K1	6	Süreksizlik açıklığının içerisini dolduran malzemenin kalınlığı ve yumuşak/sert oluşu
Sert (< 5 mm)	K2	4	
Sert (> 5 mm)	K3	2	
Yumuşak (< 5 mm)	K4	2	
Yumuşak (> 5 mm)	K5	0	
Bozunma (w)			
w (kategorik)	Küme	Puan	Açıklama
Bozunmamış	K1	6	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeyindeki bozunma (renk değişimi, parçalanma, tümüyle toprak yapısına dönüşüm vb.)
Az bozunmuş	K2	5	
Orta bozunmuş	K3	3	
Bozunmuş	K4	1	
Çok bozunmuş	K5	0	

Temel RMR hesaplamalarında kullanılan parametreler Süreksizlik Koşulları (Conditions of Discontinuities) (Çizelge 5.20), Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength, UCS), Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designation, RQD), Süreksizlik Aralığı (Spacing of Discontinuities, x) ve Yeraltı Suyu Koşulu (Groundwater, YAS) olmak üzere Çizelge 5.21’ de sunulmuştur. Süreksizlik Koşulları parametresi beş adet alt parametreye ayrılır. Bunlar Süreksizlik Devamlılık (Persistence of Discontinuities/Trace Length, l), Süreksizlik Açıklık (Aperture, a), Süreksizlik Pürüzlülük (Roughness of Discontinuities, r), Süreksizlik Dolgu (Filling Material, fill) ve Bozunma (Weathering, w) olarak isimlendirilirler.

Çizelge 5.21. RMR Parametrelerine Karşılık Gelen Sözel Değişkenler

Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS)			
UCS (MPa)	Küme	Puan	Açıklama
> 250	K1	15	Kaya kütesinde elde edilen silindirik karotun tek eksek üzerinde iki yüzeyinden basınç uygulanması halinde kırılmadan kalabildiği en büyük basınç değeri
100-250	K2	12	
50-100	K3	7	
25-50	K4	4	
< 25	K5	2	
Kaya kalite göstergesi (RQD)			
RQD (%)	Küme	Puan	Açıklama
90-100	K1	20	Doğal süreksizliklerle birbirinden ayrılmış karot parçalarından boyu on cm ve daha uzun olanlarının toplam uzunluğunun, toplam manevra boyuna oranının yüzde cinsinden değeri
75-90	K2	17	
50-75	K3	13	
25-50	K4	8	
<25	K5	3	
Süreksizlik aralığı (x)			
x (mm)	Küme	Puan	Açıklama
> 2000	K1	20	Komşu süreksizlikler arasındaki dik uzaklık
600-2000	K2	15	
200-600	K3	10	
60-200	K4	8	
< 60	K5	5	
Yeraltı suyu koşulu (YAS)			
YAS (lt/dak)	Küme	Puan	Açıklama
0	K1	15	Bir süreksizlik boyunca iletilen suyun miktarının bir ölçüsü
< 10	K2	10	
10-25	K3	7	
25-125	K4	4	
> 125	K5	0	

Tüm parametrelere ait tüm sınıfların aralıkları ve puan değerleri Bieniawski' nin çalışmasında [31] standart bir abakta toplanmıştır. Geleneksel RMR hesaplamaları bir kaya kütlesi için o kütlenin her bir parametre için uyduğu alt sınıflara ait puanların abaktan bulunması ve toplamının alınması ile hesaplanır. Temel RMR hesaplamalarında bu toplamın maksimum değeri 100' dür. Süreksizlik Yönelimi parametresinin de dâhil edilmesiyle oluşturulan Düzeltilmiş RMR değeri ise yönelim değerinin bağlı olduğu sınıfa göre ("çok uygun" sınıfı hariç) bu değeri düşürmektedir. Bu durumda temel RMR değeri aynı olan farklı kaya kütlelerinin farklı yönelimlere sahip olması halinde Düzeltilmiş RMR değerlerinin farklılık göstermesi söz konusudur. Tez çalışması kapsamında Süreksizlik Yönelimi parametresi, RMR değerinde değişimlere sebep olmasını engellemek adına "çok uygun" olarak kabul edilmiştir.

1973' te 49 adet RMR vakası geliştirme ve doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Ardından 1984' te kömür madenciliği alanında yapılan çalışmaların etkisi ile RMR vaka veritabanındaki vaka sayısı 62' ye ve 1987' de tünel ve madencilik çalışmalarının sonucunda ise 78' e erişmiştir [31]. Tez çalışması kapsamında el ile oluşturulmuş 41 adet vaka, doğrulama ve performans değerlendirme çalışmalarında kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen bulanık sistemler için RMR problemi kullanımındaki başlıca sebeplerden birisi bu alandaki öncü çalışmaların yarattığı teşviktir. Örneğin RMR' ın öncü çalışmalarının sahibi olan Bieniawski, çalışmalarında RMR için kullanılan parametrelerin belirsizlik içerdiğine ve bu belirsizliği etkili kullanmak adına sezgisel yaklaşımlardan yararlanılabileceğine değinmiştir [31]. Daha sonraları bu problem için gerçekleştirilen sezgisel yaklaşımlar içerisinde bulanık sistemlerin kullanımına rastlamak mümkündür [32][33][34]. Çünkü RMR vakalarındaki belirsizlik göz önüne alındığında bir veriyi bir parametreye ait bir sınıf ile birebir eşleştirmek doğru olmamaktadır. Ayrıca farklı koşullarda aynı parametre sınıflarına ait kaya kütlelerinden farklı anlamlar çıkarmak mümkün olmalıdır. Geleneksel RMR hesaplaması ile bu belirsizliğin üstesinden gelinemediğinden, bir dizi bulanık sistem arasındaki performans değerlendirmesine odaklanan bu tez çalışmasında RMR probleminin kullanımı oldukça uygundur.

RMR probleminin bu tez kapsamında inceleniyor olmasının bir başka nedeni bu problemi tek bir bulanık sistem ile çözmenin gerek oluşturulması gereken kural sayısındaki fazlalık gerekse bilgisayar sistemindeki hesaplama maliyeti açısından uygulanabilir olmayışıdır.

Ancak bu CFS' nin oluşturulması RMR' ın geleneksel hesaplanma yöntemi, standart bir abağa bağlı işletiliyor olması dolayısıyla etkili bir çözüm olmasa da mümkün bir çözümdür. Bu problem için kuralları el ile yazmak mümkün olmasa da çözüm için kullanılan standart abağın varlığı otomatik kural oluşturmayı olası kılmıştır. Yani kurallar, geleneksel RMR hesaplamasının kullandığı yaklaşıma paralel olacak şekilde oluşturulabilmiştir. Bu kuralların oluşturulması Bölüm 5.4.1' de ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bu aşamadan sonra gerek CFS gerekse HFS' ler bu kural oluşturma stratejisine bağlı kalınarak modellenmiştir.

Tez çalışması kapsamındaki deneylerde kullanılan RMR problemi için CFS çözümü sağlanabildiği için, uygulanan ve önerilen HFS tekniklerinin CFS ile kıyaslanması ve CFS performansına en yakın performansı sergileyen HFS' nin bulunması mümkün olmuştur. Bu durum RMR problemini, tez çalışması kapsamında adil ve etkili bir performans karşılaştırması yapmak anlamında güçlü kılmaktadır. Çünkü bir abak ile tanımlanamayan ve bu yüzden de CFS kuralları oluşturulamayan bir problemin kullanılması halinde bu karşılaştırmayı yapmak mümkün olmayacaktır.

5.4.1. RMR Problemi için Bulanık Kuralların Oluşturulması

Tez çalışması kapsamında RMR çıkarsamada kullanılacak olan kurallar deterministik bir yaklaşımla otomatik olarak oluşturulmuştur. Bunun için Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21' de yer alan ve her bir sözel değişkenin her bir kümesi için oluşturulmuş puanlar kullanılmıştır. Geleneksel RMR hesaplamasında bir girdi seti için kendisine karşılık gelen puan değerleri toplanmakta ve ortaya çıkan değer RMR çıktısı olarak sunulmaktadır. Bu problemi çözmeye yönelik CFS ve HFS çözümlerinde bu stratejiden yararlanılmıştır.

Temel RMR hesaplamasında yer alan 5 adet parametre süreksizlik koşulları isimli parametrenin kendi içerisinde 5 alt parametre (l, a, r, fill, w) içeriyor olması dolayısıyla ayrı ayrı ele alınarak 9 sözel değişken olarak tanımlanmıştır. Sözel değişkenlere ait bulanık kümeler ise her bir sözel değişken için 5 adet olmak üzere K1-K5 aralığında sembolize edilmiştir. Sözel değişkenlerin üyelik fonksiyonları bulanık kümelerin orta noktalarında bulanıklığın maksimum olacağı şekilde tasarlanmış ve Ek 1' de sunulmuştur. Kategorik değişkenler için ise yine bulanık kümelerin orta noktaları kullanılmış, program arayüzü ile etkileşimlerde de yine bu orta noktalar işleme tabi tutulmuştur. Örneğin süreksizlik

pürüzlülük (r) sözel değişkeni için çok kaygan (K5) isimli bulanık küme değeri 0.1 iken düz (K4) bulanık kümesi için işleme tabi tutulan değer 0.3' tür.

Kuralların oluşturulması için öncelikle m adet girdi ve bir adet çıktı sözel değişkenine sahip olan bir sistem/alt sistem için bulanık kuralların oluşturulmasında bahsedilen m adet girdinin en yüksek puan getiren bulanık kümeleri bulunmakta ve bu puanlar toplanmaktadır. Ardından o sistemin tüm girdilerinin tüm bulanık kümelerinin puanları önceden hesaplanan toplam sonucuna bölünerek normalize edilmektedir. Kuralların şart kısımları tüm girdilerin tüm bulanık kümelerine ait muhtemel tüm formların yazılacağı şekilde oluşturulur ve her bir sözel değişken beş adet bulanık küme içerdiğinde 5^m adet bulanık kural ortaya çıkar. Bu kuralların sonuç kısımlarının yazılması içinse ilgili kuralın her bir sözel değişkeni için kuralda yazılı olan bulanık kümenin normalize edilmiş puanları toplanır. Bu toplam her durumda 0 ile 1 aralığında olmaktadır. Bu nümerik değerlerin hangi sonuç bulanık kümesine denk geldiğine dair karar verilmesinde ve bu sonuç kümesinin hiyerarşik sistemlerde sonraki katmanlarda kullanılmak üzere puanlanmasında Çizelge 5.22' den yararlanılmaktadır.

Çizelge 5.22. RMR Çıktı Sözel Değişkenleri

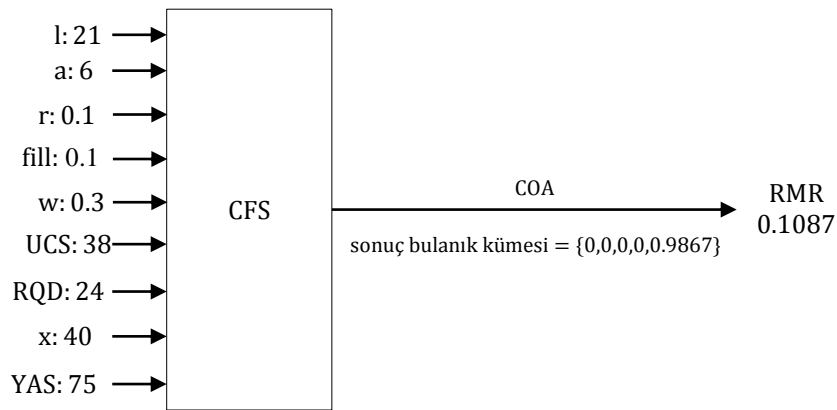
Ara Adım Çıktıları (HFS' ler için)			
Değer	Küme	Puan	Açıklama
0.8-1.0	K1	0.9	HFS' lerin en üst katman alt sistemi haricindeki alt sistemlerine ait çıktı bulanık sözel değişkeni
0.6-0.8	K2	0.7	
0.4-0.6	K3	0.5	
0.2-0.4	K4	0.3	
0.0-0.2	K5	0.1	
RMR			
Değer	Küme	Puan	Açıklama
> 0.8	K1	-	Kaya kütle sınıfı [0-1] normalize formu
0.6-0.8	K2	-	
0.4-0.6	K3	-	
0.2-0.4	K4	-	
< 0.2	K5	-	

Bu bölüme ait alt başlıklarda, belirli bir girdi seti için, CFS çözümü çıktılarına ve bu çalışmada incelenen üç tip hiyerarşik sistemin çözümüne yer verilecektir. Ancak burada verilecek çözümler girdi sayısının ve buna bağlı olarak kural sayısının çokluğundan ötürü

mantıksal problemlerin uygulanışındaki gibi her bir alt sistem için ayrı ayrı çözülmek yerine genel bir çerçeve sunacak şekilde aktarılacaktır. Bunun için belirlenen girdi seti girdi sözel değişkenleri sıra ile verilmek üzere $l = 21, a = 6, r = \text{Kaygan} (0.1), \text{fill} = \text{Yumuşak} > 5 (0.1), w = \text{Bozunmuş} (0.3), \text{UCS} = 38, \text{RQD} = 24, x = 40, \text{YAS} = 75$ ' dir. Daha önce de değinildiği gibi bu girdiler ile sistem çözümünde geleneksel yöntem Bieniawski' nin RMR çizelgesinin kullanılması ve her bir girdi değişkeni için karşılık gelen bulanık kümeye ait puan değerlerinin toplanmasıdır. Belirtilen RMR çizelgesi Ek 2' de sunulmuştur.

5.4.2. RMR Problemi için CFS Çözümü

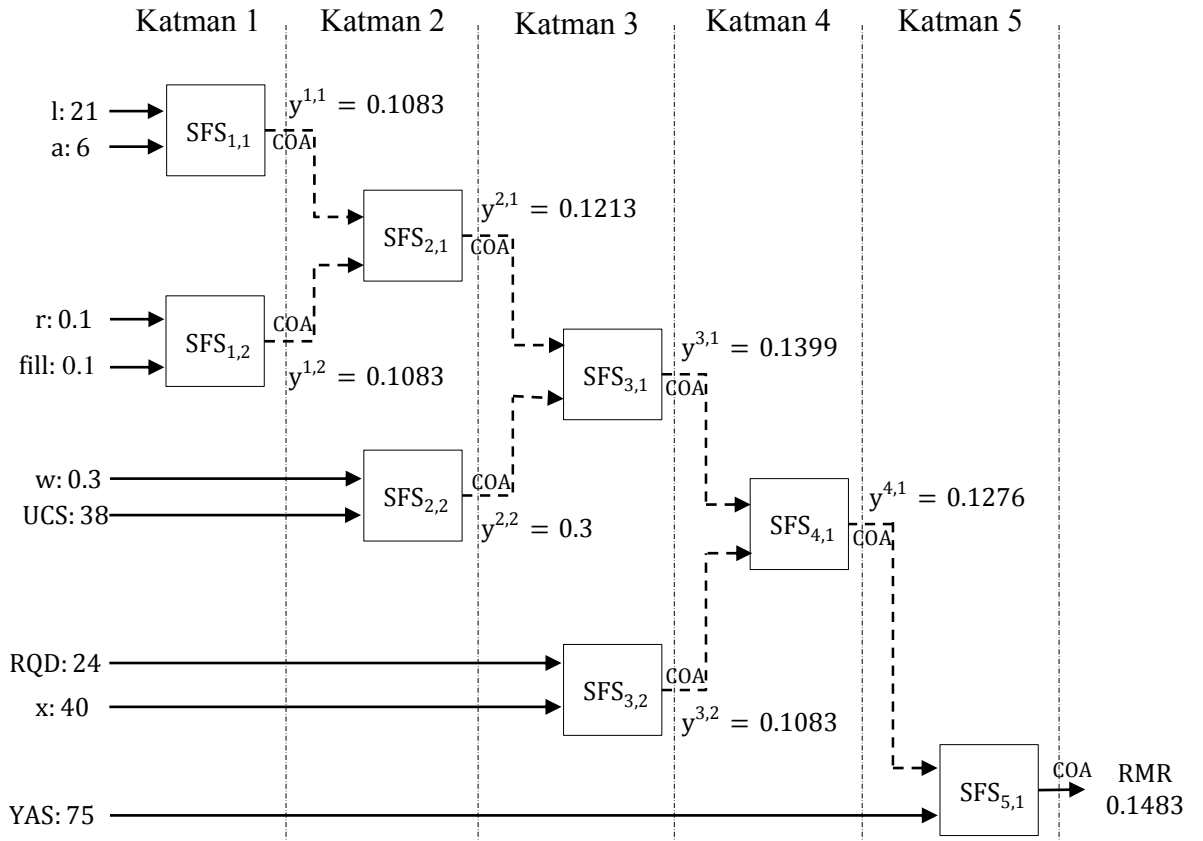
RMR probleminin CFS ile çözümü için 9 girdi ve 1 çıktı değişkeni olan bulanık sistemin tasarımı Şekil 5.11' deki gibi yapılmıştır. Her bir sözel değişken için beş adet bulanık küme tanımlandığından Bölüm 5.4.1' de anlatıldığı şekilde otomatik olarak oluşturulan bulanık küme sayısı 5^9 adettir. Bu tür bir sistemi modellemek ve işletmek kural sayısının çok fazla olmasından dolayı yüksek maliyet gerektirir. Bu yüzden bu tür karmaşık problemler için CFS çözümünün gerçekleştirilmesi mümkün olsa dahi saha çalışmalarında uygulanabilir ve izlenebilir değildir. RMR için gerçekleştirilen CFS çözümü incelendiğinde birleştirme adımı sonrasında K1, K2, K3, K4 ve K5 sonuç bulanık kümelerinin tetiklenme dereceleri Şekil 5.11' de görüldüğü gibi sırasıyla, 0, 0, 0, 0, 0.9867' dir. Bu durumda yalnızca K5 bulanık kümesi tetiklenmiş ve merkezi yöntemle (COA) yapılan durulaştırma sonucu 0.1087 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.11. RMR Çıkarılma Problemi için CFS Mimarisi

5.4.3. RMR Problemi için HFS Çözümü

RMR çıkarsamanın tek bir sistem ile çözümü mümkün olsa da bu problem, kural oluşturmadaki güçlükler ve kural sayısındaki fazlalık dolayısıyla uygulanabilir ve izlenebilir değildir. Bu durumun sonucu olarak bu problemin çözümü için hiyerarşik yöntemlere başvurulmuş ve CFS performansına en yakın çalışan hiyerarşik çıkarsama akışı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda tasarlanan hiyerarşik sistemler conHFS, HCTFS ve DF-HFS ile ayrı ayrı gerçekleştirilerek, bu tekniklerin CFS davranışına yakınlığını temel alan yöntem karşılaştırmaları yapılmıştır.

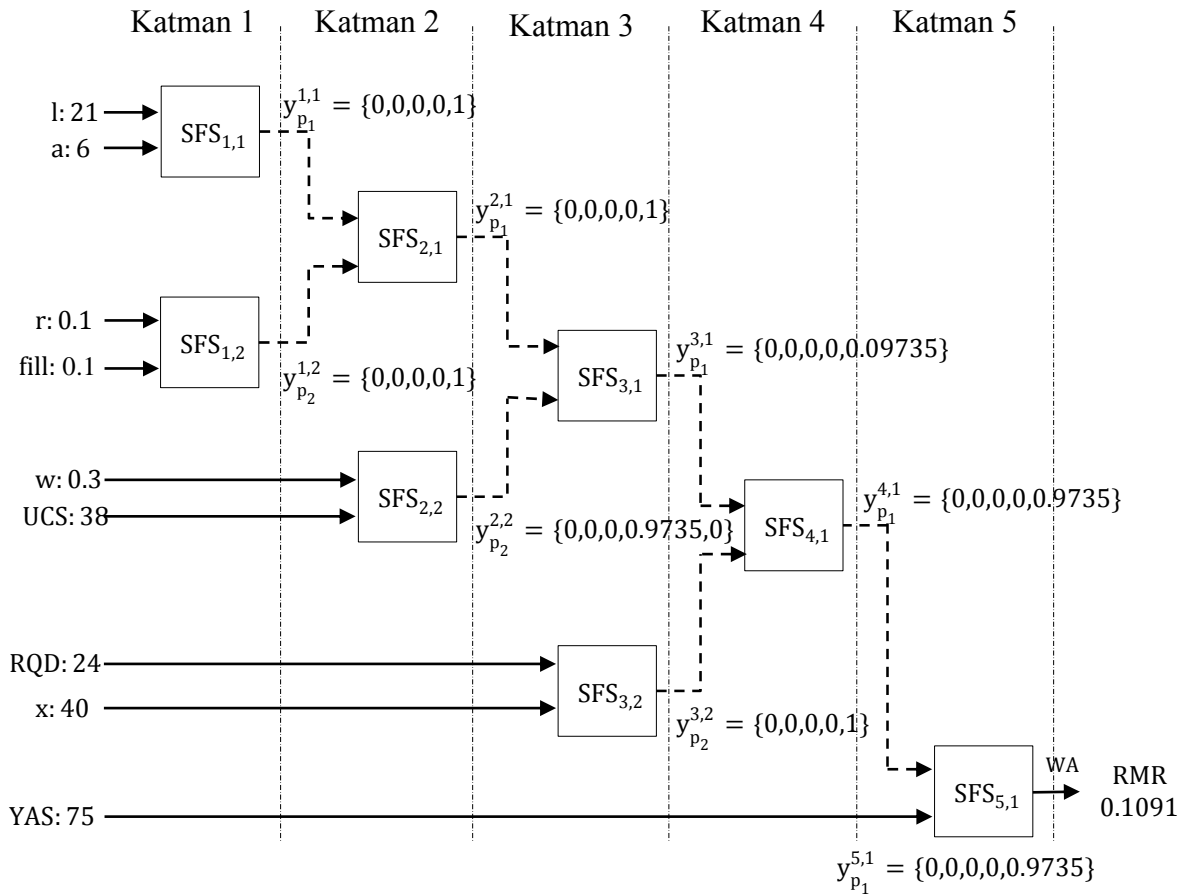


Şekil 5.12. RMR Çıkarsama Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde conHFS

RMR problemi için sunulan hiyerarşik bulanık sistemlerde, tez çalışması kapsamında uygulanan mimari, yöntem karşılaştırmasının en sağlıklı ve adil yapılmasına imkân veren AHFS [10] mimarisidir. Çünkü conHFS ve DF-HFS' de mimari kısıtı koyulmamışken HCTFS, AHFS mimarisi üzerinde önerilmiş bir modeldir. Bu bağlamda hiyerarşi bağımsız olan conHFS ve DF-HFS akışları AHFS tasarımının üzerinde değerlendirilmeye alınmıştır. Şekil 5.12' de belirtilen problemin hiyerarşik sistemlerle çözümü için geliştirilmiş olan

AHFS' ye yer verilmiştir. Buna göre her bir alt sistem için Bölüm 5.4.1' de incelendiği gibi 5^2 kural oluşturulmuş ve sistem toplam 8×5^2 kural ile tasarlanmıştır.

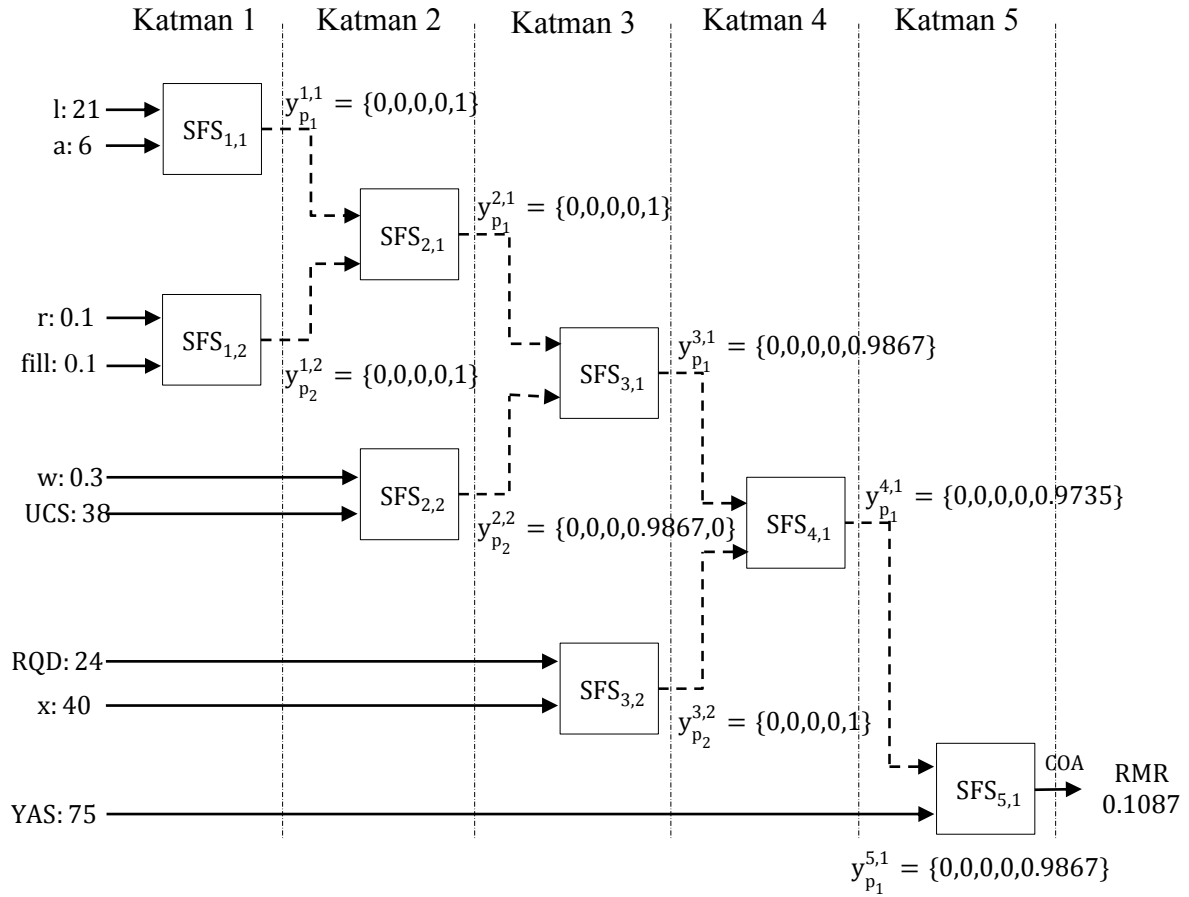
RMR probleminin conHFS ile çözümünde AHFS mimarisi ile oluşturulan sistemin her alt sistemi Mamdani tipi çıkarsamanın adımlarına tabi tutulmakta ve elde edilen keskin veriler bir üst katman alt sistemine iletilmektedir. Şekil 5.12' de örnek girdi seti için conHFS akışı kullanımı ile elde edilen ara çıktılara yer verilmiştir. Buna göre 0.1483 olarak hesaplanan sistem çıktısı CFS çıktısından oldukça büyük farklılık göstermektedir.



Şekil 5.13. RMR Çıkarsama Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde HCTFS

Şekil 5.13' te RMR probleminin verilen girdi seti için HCTFS çözümüne yer verilmiştir. Burada görüldüğü gibi bu tekniğin kullanımında katmanlar arasında transfer edilen bilgi her bir sonuç değişkeninin bulanık kümelerinin tetiklenme derecelerini içeren serilerdir. Ara adımlarda bu seriler doğrudan bulanık girdi olarak kullanıldığından sonraki alt sistemde bulanıklaştırma adımına gerek duyulmaz. Kök sisteme gelindiğinde ise ağırlıklı

ortalama metodu ile yapılan durulaştırma adımı sonrasında elde edilen keskin çıktı değeri CFS çıktısından farklı olarak 0.1091 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.14. RMR Çıkarılma Problemi için AHFS Mimarisi Üzerinde DF-HFS

Şekil 5.14' te DF-HFS' nin RMR problemi üzerindeki uygulamasına yer verilmiştir. Buna göre HCTFS yaklaşımında olduğu gibi ara adımlarda gerekli olmadığı halde tekrarlanan ve yanıltıcı sonuçlar doğuran durulaştırma adımları ortadan kaldırılıp, alt sistemlerin birleştirme adımları sonucunda elde edilen bulanık çıktısı bir üst katmandaki alt sisteme bulanık girdi olarak aktarılmıştır. Örnek girdi seti çözümünde son katmana gelindiğinde kök alt sistemindeki birleştirme adımının çıktısı CFS ile benzer şekilde K1, K2, K3, K4 ve K5 sonuç bulanık kümeleri için sırasıyla 0, 0, 0, 0, 0.9867 olarak bulunmuş ve merkezi yöntem ile yapılan durulaştırma sonucu CFS ile eşdeğer olmak üzere 0.1087 olarak hesaplanmıştır. Bu durumun sebebi en alt katmandan elde edilen ve bulanıklaştırma adımında ortaya çıkan maksimum tetiklenme derecesinin doğru bir şekilde üst sistemlere aktarılıyor olmasıdır. Ayrıca bu girdi seti için tetiklenen kuralların CFS çözümünde

tetiklenen kurallarla (bir bütün olarak düşünülduğünde) eşdeğer olması DF-HFS' nin hata değerini sıfıra düşürmüştür. Ancak bu özdeş kurallar her durum için oluşturulamamıştır. Çünkü ara adımlarda kullanılan sonuç sözel değişkenlerinin birleştirilip bir sisteme girdi olarak sunulduğu sistemlerin kural yazımında bulanık kümelerin orta noktalarının referans alınması bazı vakalar için özdeş kuralların oluşturulamamasını sağlamaktadır. Bu olumsuzluk DF-HFS' nin bazı vakalar için CFS performansında çalışmasına engel olması vesilesiyle fark edilmiştir. Ancak conHFS, HCTFS ve DF-HFS için aynı kurallar kullanıldığından bu olumsuzluk tüm hiyerarşik sistemlerin karşısına çıkan bir sorundur ve adil bir yöntem karşılaştırmasına gölge düşürmez.

5.4.4. RMR Problemi için Deney Sonuçları

RMR deneylerinde 41 farklı girdi vakasından oluşan bir değerlendirme kümesi üzerinde performans ölçümü yapılmıştır. Buna göre iki farklı referans değer temel alınarak, uygulanan farklı türlerdeki bulanık sistemlerin RMSE, R^2 ve VAF değerleri hesaplanmıştır. Bu referans değerlerden ilki RMR' in geleneksel yolla çözümünün sonucudur. Buna göre Çizelge 5.23' de sunulduğu gibi geleneksel RMR çözümüne en yakın çıktılar CFS tarafından oluşturulmaktadır. Bu durumun sebebi CFS kurallarının geleneksel RMR çözümü ile örtüşecek şekilde oluşturulmuş olmasıdır. Ancak daha önce de belirtilen maliyet hususundan ötürü bu problem için CFS kullanımı uygulanabilir değildir. Bu noktada CFS sonuçlarına en yakın çıktıları üretecek bir hiyerarşik sistem geliştirilmesi gerekliliği daha anlamlı hale gelmiştir.

Çizelge 5.23' de AHFS mimarisi ile sınanmış üç farklı hiyerarşik akışa ait RMSE, R^2 ve VAF değerlerine bakıldığında CFS ile en yakın davranış gösteren sistemin DF-HFS olduğu görülmektedir. Ancak DF-HFS, daha önce gerçekleştirilen ve sonuçları tartışılan mantıksal problemlerde olduğu gibi CFS ile eş çıktılar üretilmesini sağlayamamıştır. Bu durumun sebebi RMR problemi için gerekli CFS ve HFS' lerin bulanık kurallarının özdeş olarak oluşturulamamasıdır. Ancak bu dezavantaj tüm HFS' ler için aynı oranda söz konusu olduğundan, yöntemler arasında karşılaştırma yapılmasına engel oluşturmamaktadır. Bu durum yalnızca DF-HFS' nin güçlü bir tarafı olan 'CFS performansı sergilemek' işlevinin gözlenmesine engel olmaktadır. Ancak yine de CFS çıktılarına en yakın çıktıları üreten hiyerarşik sistem akışı DF-HFS' dir.

Çizelge 5.23. Hiyerarşik Modellerin AHFS ile Modellenmesi Durumunda Geleneksel RMR Hesaplama Yöntemi ve CFS' in Ayrı Ayrı Referans Alınması Sonucunda Yapılan Karşılaştırma Sonuçları

AHFS	RMSE		R ²		VAF	
	Gel. RMR	CFS	Gel. RMR	CFS	Gel. RMR	CFS
CFS	0.06698	-	0.93802	-	92.27524	-
conHFS	0.10866	0.09791	0.86075	0.85922	86.03935	85.56171
HCTFS	0.11098	0.09572	0.89179	0.88262	88.67554	88.25262
DF-HFS	0.10700	0.09262	0.89651	0.88647	89.22947	88.62432

RMR problemi için geliştirilen çözümlerde yöntemler arası karşılaştırmayı mümkün ve adil kılmak için AHFS mimarisinden yararlanılmış ve sonuçlar bu mimari ile değerlendirilmiştir. Ancak AHFS mimarisi üzerinde önerilen HCTFS tipi çıkarsamanın yöntem karşılaştırmalarına dâhil edilmesine gerek duyulmayan durumlarda conHFS ve DF-HFS her tür bulanık sistem mimarisine uygulanabilir. Bu hipotezi uygulamada da gösterebilmek adına bu iki tip hiyerarşik sistem iki katman ve üç alt sistemden oluşan hiyerarşik yapı üzerinde uygulanmıştır. Buna göre alt katmanda yer alan iki alt sistemin ilkinde beş ve ikincisine dört adet girdi sözel değişkeni bağlanmış ve üst katmanda bu iki alt sistemin çıktısını girdi kabul eden bir sistem tasarlanmıştır. Bu sayede bu yapılaşma ile süreksizlik koşullarının kendi aralarında gruplanması sağlanmıştır. Diğer parametreler ise alt katmandaki diğer alt sistemde modellenmiştir. Çizelge 5.24' deki karşılaştırma tablosu bu mimarinin kullanımı ile oluşturulmuştur. Çizelge 5.24' de geleneksel RMR çözümü çıktıları temel alındığında conHFS' nin R² ve VAF değerlerinin CFS' den daha iyi olduğu görülmektedir. Buna göre conHFS, DF-HFS' den de daha iyi sonuçlar vermiş olarak düşünülebilir. Ancak bu durum aslında conHFS' deki gereksiz yere tekrarlanan durulaştırma adımlarının sonuçları nasıl yanlış yönlendirdiğinin bir göstergesidir. Ayrıca hiyerarşik sistemlerin değerlendirilmesinde asıl olarak temel alınacak çıktı CFS çıktılarıdır. CFS çıktıları temel alan karşılaştırmalara bakıldığında ise yine en yakın CFS davranışını HCTFS' nin gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24 farklı bir açıdan daha değerlendirilmeye alınabilir. Mimarinin değişimi hiyerarşik sistemlerin çıktıları direkt olarak etkilemektedir. Çizelge 5.23 ve 5.24' te yer alan değerler incelendiğinden katman sayısı arttıkça CFS temelli hata oranının ciddi bir artışla karşılaştığı görülmektedir. Hatta mantıksal 'VE' ve 'Dışlayan VEYA' deneylerinde olduğu gibi hiyerarşik sistemlerin CFS ile eş kurallar ile oluşturulabilmesi

halinde DF-HFS, CFS ile eş çıktılar üretebileceği için mimarideki değişimlerden de hiç etkilenmeyecektir.

Çizelge 5.24. Hiyerarşik Modellerin İki Katman ve Üç Alt Sistem ile Modellenmesi Durumunda Geleneksel RMR Hesaplama Yöntemi ve CFS' in Ayrı Ayrı Referans Alınması Sonucunda Yapılan Karşılaştırma Sonuçları

2 Katman	RMSE		R ²		VAF	
	Gel. RMR	CFS	Gel. RMR	CFS	Gel. RMR	CFS
CFS	0.06698	-	0.93802	-	92.27524	-
conHFS	0.08766	0.06456	0.93895	0.94569	92.87156	94.56329
DF-HFS	0.09079	0.06383	0.93653	0.94892	91.48967	94.67422

Çizelge 5.25. RMR Problemi Üzerinde Uygulanan Bulanık Sistemlerin Hesaplama Zamanları

Sistem	Katman Adedi	Alt Sistem Adedi	Kural Adedi	Zaman (ms)
CFS	1	1	5 ⁹	65512
conHFS	2	3	5 ⁵ + 5 ⁴ + 5 ²	433
DF-HFS	2	3	5 ⁵ + 5 ⁴ + 5 ²	321
conHFS	5	8	8 × 5 ²	58
HCTFS	5	8	8 × 5 ²	8
DF-HFS	5	8	8 × 5 ²	10

Tek bir bulanık sistem kullanımının ve farklı mimarilerdeki hiyerarşik sistemlerin hesaplama zamanı açısından değerlendirilmesine Çizelge 5.25' te yer verilmiştir. Buna göre katman sayısının artışı, bilgi kaybı açısından olumsuz etki yaratsa da her bir alt sistemin girdi parametre sayılarını azalttığından çıkarsamanın gerçekleştirilmesinin zamansal maliyetini büyük ölçüde düşürmektedir. Bu durumun sebebi kural sayısındaki büyük değişimdir. Katman sayısı arttıkça kural sayısı azalacağından çıkarsama için geçen süre de azalmaktadır. DF-HFS çözümü hesaplama zamanı açısından mevcut çözümlerin yanında kabul edilebilir karmaşıklıktadır. Ayrıca bilgi kaybı açısından da en avantajlı sistem olması karmaşık problemlerin çözümü için uygulanabilir, kolay ve izlenebilir bir çözüm üretmesini sağlamıştır.

6. SONUÇ

Bulanık mantık bilim dalının modellenmesinde kullanılan bulanık çıkarsama sistemleri artan girdi parametreleri, girdi parametrelerine ait bulanık kümelerin fazlalığı ve bu girdi parametreleri arasında mantıksal ilişkilerin oturtulamaması gibi sebeplerle karmaşıklaşmaktadır. Karmaşıklaşan bulanık çıkarsama sistemleri teorik olarak oluşturulabilir olsa dahi saha çalışmalarında verimli bir şekilde uygulanamaz olmuştur. Çünkü bulanık kuralların artması ve karmaşıklaşması sistemin kurgulanmasının önünde büyük bir engel yaratmaktadır. Bu kurallar bir şekilde doğru ve makul oluşturulmuş olsa dahi bu denli fazla kurala sahip bir sistemin çıkarsama süreci, algoritma karmaşıklığı açısından verimsiz olmaktadır. Bu duruma bir çözüm olarak önerilen hiyerarşik bulanık sistemler sistemin karmaşıklığını daha küçük boyutlu alt sistemler oluşturarak ve bunları hiyerarşik bir yapıda birleştirerek çözüyor olsa bile bulanıklığın bu hiyerarşideki katmanlar arasında verimli ve doğru taşınmasına yönelik çekinceler doğurmaktadır. Çünkü Mamdani tipi bir bulanık çıkarsamanın geleneksel yöntem ile hiyerarşik sistemlere uygulanması halinde hiyerarşik sistemin yapı taşlarını oluşturan alt sistemlerin tümü kendi içlerinde tek bir sistemmiş gibi çözülmekte ve elde edilen keskin veri sonraki alt sisteme girdi olarak sunulmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında bu akış eleştirilmiş ve ara katmanlarda keskin çıktı elde etmenin yanıltıcı ve gereksiz olduğu savunulmuştur. Bu öngörü doğrultusunda gerçekleştirilen deneylerde de geleneksel yolla çözülen hiyerarşik sistemlerin mimarideki değişimlere karşı dirençsiz ve kararsız sonuçlar ürettiği, kendisine eş tek sistemli karmaşık yapıdan da farklı davranışlar sergilediği görülmüştür. Bu gözlemlerin yapılabilmesi için deney senaryolarına dahil edilecek problemler de özel olarak seçilmiştir. Bu problemler mantıksal 'VE', 'Dışlayan VEYA' ve bunlardan farklı olarak Kaya Kütle Puanı (RMR) hesaplama problemi. Birbirinden kısmen bağımsız görünen bu üç problemin kullanılmış olmasındaki başlıca sebep bu problemlerin üçü için de bir tek sistemden oluşan bulanık yapının teorik olarak kurgulanabiliyor olmasıdır. Çünkü bulanık bilgideki kaybın ölçülmesi için referans alınan değer aynı girdi değerleri ve çıkarsama teknikleri kullanılmak üzere bir tek bulanık sistemden elde edilen çıktıdır. Yani geliştirilen ve mevcut hiyerarşik sistemlerin çıktıları bu değer ile karşılaştırılarak bilgede meydana gelen deformasyon ölçülmüştür. Bu ölçümlerin bir tek sistemle çözümü mümkün olmayan problemler üzerinde sağlıklı bir şekilde sonuçlandırılabilmesi olanaksızdır. Mantıksal problemlerin kullanımı basit, anlaşılabilir ve el ile işletilebilir olması sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca bu problemi çözen, farklı mimarilerde de olsa birbirine eş sistemlerin ortaya çıkarılması,

kuralların sabit oluşundan ötürü çok kolaydır ve doğruluğu tartışılmaz niteliktedir. Bu yüzden hiyerarşik sistemlerdeki bilgi kaybının ölçülmesi için en güvenilir sonuçlar bu problemler üzerindeki deneylerden alınmıştır. RMR çıkarsama probleminin güçlü yönü ise tek bir bulanık sistem veya hiyerarşik sistemler için kullanılacak kuralların Bieniawski RMR çizelgesinin yardımı ile sistematik bir yaklaşımla otomatik olarak oluşturulmuş olmasıdır. Ayrıca bu problem tek bir sistem ile çözülebiliyor olsa dahi bu sistemin saha çalışmalarında uygulanabilir olmadığı tez çalışması kapsamında gösterilmiştir. Bu durumda hiyerarşik yaklaşımlardan yararlanmanın avantajları daha dikkat çekici bir hal almış ve ihtiyaç haline gelmiştir.

Katmanlar arasında veri aktarımının geleneksel yöntemlerle sağlanmasındaki bozukluğun giderilmesi için tez çalışması kapsamında Durulaştırmasız Hiyerarşik Bulanık Çıkarsama Sistemi isimindeki bir hiyerarşik çıkarsama akışı önerilmiştir. Önerilen bu çıkarsama akışı katmanlar arası bilgi kaybının sebebi olan yanıltıcı durulaştırma adımlarını ortadan kaldırarak katmanlar arasında bulanık verinin aktarımını sağlamıştır. Bu yöntemin bilgi transferini başarılı bir şekilde gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin ölçümünde yine mantıksal ‘VE’ ve ‘Dışlayan VEYA’ problemleri için yapılan deneylerden faydalanılmış ve bu deneyler sonucunda DF-HFS akışının değişen mimari ve girdi sayısından etkilenmeksizin tek bir sistemin performansı ile çalıştığı gözlenmiştir. RMR deneyleri için ise tek bir sistemin kuralları ile eş kurallar oluşturulmadığından tek bir sistem ile eş sonuçlar üretilmesi de bu sisteme en yakın davranışı gösteren hiyerarşik akış olmayı başarmıştır.

Sonuç olarak hiyerarşik sistemler özelleşmiş yapılardır ve hiyerarşiyi oluşturan alt sistemlerin içerisinde buldukları katmana göre özelleşmiş çözümlerinin olması gerekmektedir. Bu alt sistemler standart bir bulanık çıkarsama sistemiymiş gibi işletilirse alt katmanlarda girdi değerlerine göre hesaplanan bulanık bilgi üst katmanlara taşınırken bozulmalar meydana gelir. Bu bozulma artan katman sayısı ile daha da büyük problemler doğuracaktır. Bu akış ile geliştirilen hiçbir hiyerarşik sistem, tek bir bulanık sistemin performansını sergileme garantisi veremez. Bu yüzden katmanlar arasında verinin bulanık olarak taşınması çok önemlidir. Geliştirilen DF-HFS çözümünde bu bulanıklık doğru bir şekilde taşınmış ve DF-HFS kullanımı ile, tek bir sisteme eş kuralların üretilmesi halinde tek bir sistem ile eş davranış sergilenmediği gösterilmiştir. Gelecekte yapılması arzulanan ise DF-HFS’ yi her durumda tek bir sistem davranışı ile eşitleyecek çözümlerin

retilmesi ve DF-HFS' nin farklı çıkarsama ve birleştirme yöntemleri ile sınınanarak esnekliğinin ölçülmesidir. Ayrıca tez kapsamında yapılan çalışmaları içeren ve Ek 3' te taslağına yer verilmiş olan yayının yapılması da yakın gelecekte ulaşılmak istenen hedefler arasındadır.

KAYNAKLAR

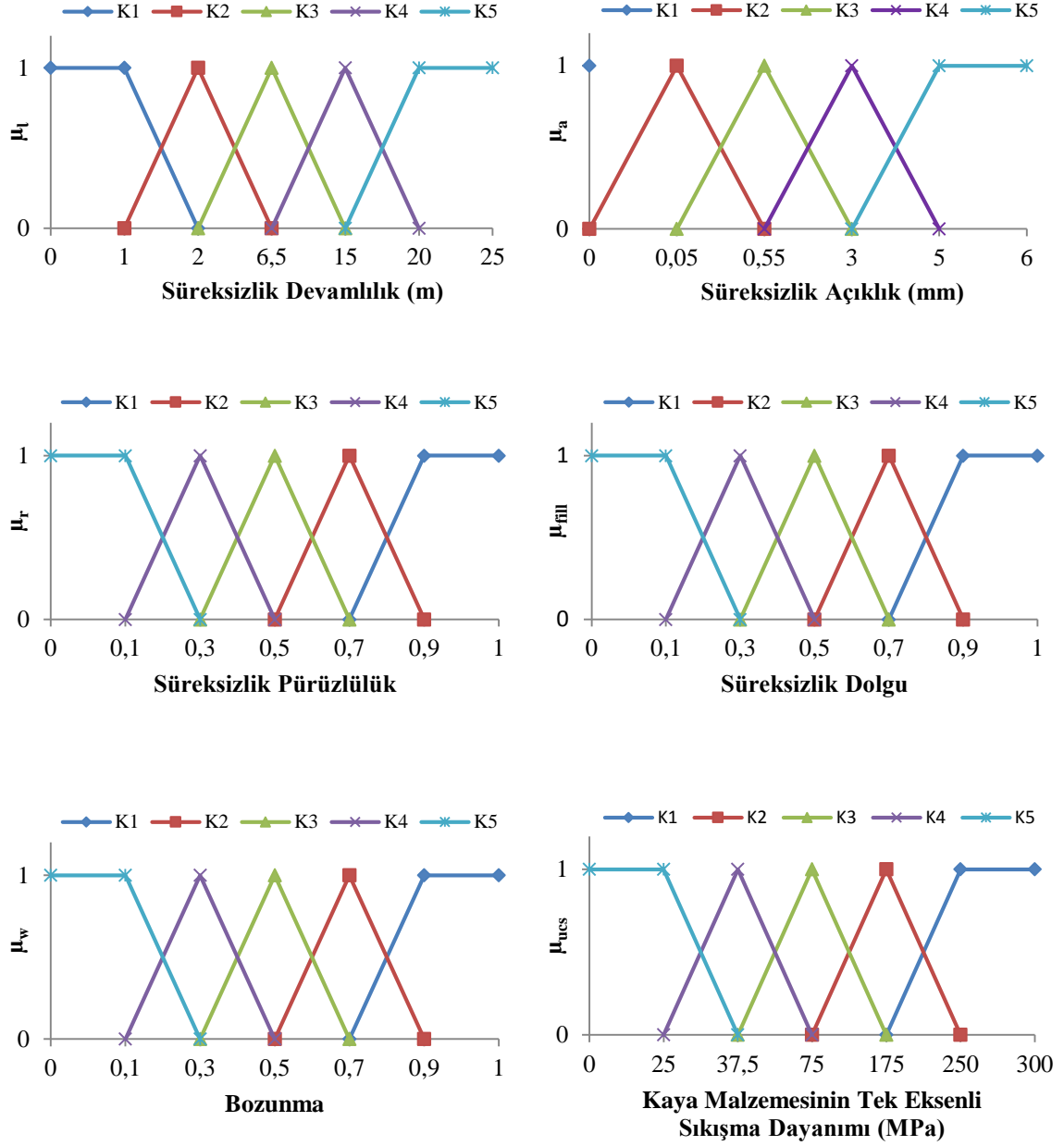
- [1] Mamdani, E. H., Assilian, S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7, 1–13, **1975**.
- [2] Raju, G., Zhou, J., Adaptive hierarchical fuzzy controller, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 23, 973 – 980, **1993**.
- [3] Akyüz, I, Bingül, Z., Kizir, S., Cascade fuzzy logic control of a single-link flexible-joint manipulator, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 20,713–726, **2012**.
- [4] Neogi, A., Mondal, A., Mandal, S., A Cascaded Fuzzy Inference System for University Non-Teaching Staff Performance Appraisal, *Journal of Information Processing Systems*, 7, 595–612, **2011**.
- [5] Mar, J., Lin, H.T., A car-following collision prevention control device based on the cascaded fuzzy inference system, *Fuzzy Sets and Systems*, 150, 457–473, **2005**.
- [6] Wibowo, A., Sutikno, S., Kushartantya, K., Wibawa, H. A., Wibisono, A., Parallel Cascade Fuzzy Inference System at the environment changes, case study: Automated Guide Vehicle Robot using ultrasonic sensor, *International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, 319–324, 2012.
- [7] Chung, F., Duan, J., On multistage fuzzy neural network modeling, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8, 125 – 142, **2000**.
- [8] Domingo, M., Sierra, C., A knowledge level analysis of taxonomic domains, *International journal of intelligent systems*, 12, 105–135, **1997**.
- [9] Wang, L., Analysis and design of hierarchical fuzzy systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7, 617–624, **1999**.
- [10] Rattasiri, W., Halgamuge, S., Computational complexity of hierarchical fuzzy systems, *Fuzzy Information Processing Society, 2000. NAFIPS. 19th International Conference of the North American*, Publ. no. 2, 383–387, **2000**.
- [11] Chaudhari, S., Patil, M., Bambhori, J., Study and Review of Fuzzy Inference Systems for Decision Making and Control, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 88–92, **2014**.
- [12] Rattasiri, W., Wickramarachchi, N., Halgamuge, S.K., Sensitivity-based hierarchical controller architectures for active suspension, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16, 103–112, **2008**.
- [13] Öner, N., *Klasik Mantık*, 5. Baskı, Ankara Üniversitesi Basımevi, **1986**.
- [14] Zadeh, L., Fuzzy sets, *Information and control*, 8, 338–353, **1965**.

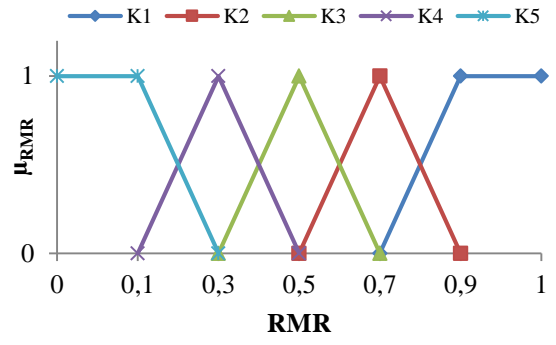
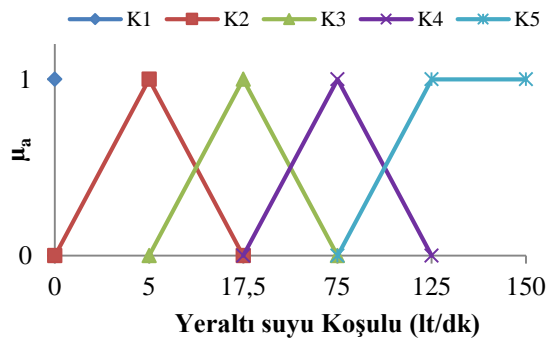
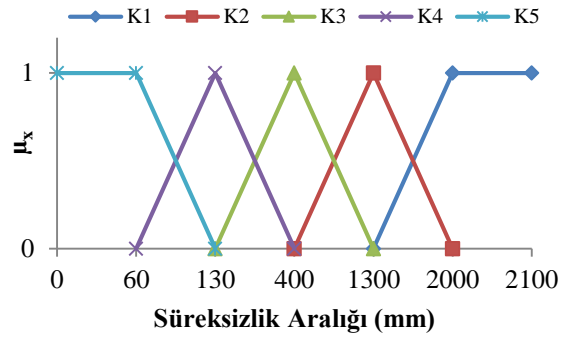
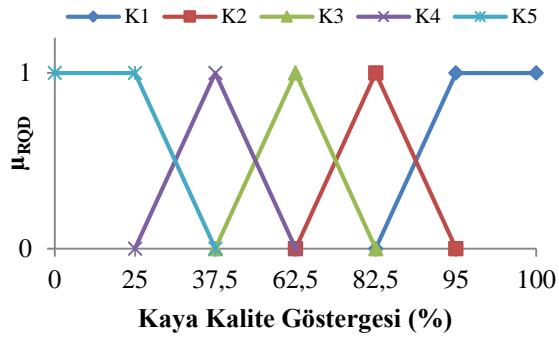
- [15] Ross, T.J., *Fuzzy logic with engineering applications*, 3. Baskı. Chichester: John Wiley & Sons, 117–173, **2010**.
- [16] Takagi, T., Sugeno, M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 15, 116–132, **1985**.
- [17] Sugeno, M., Kang, G., Structure identification of fuzzy model, *Fuzzy Sets and Systems*, 28, 15–33, **1988**.
- [18] Tsukamoto, Y., An approach to fuzzy reasoning method, *Advances in fuzzy set theory and applications*, 137–149, **1979**.
- [19] Shing, J., Jang, R., Sun, C.T., Mizutani, E., *Neuro-fuzzy and soft computing*, New Jersey, US, **1997**.
- [20] Kaur, A. K.A., Comparison of Mamdani Type and Sugeno Type Fuzzy Inference System for Air Conditioning System, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2, 323–325, **2012**.
- [21] Davidson, V., Ryks, J., Chu, T., Fuzzy models to predict consumer ratings for biscuits based on digital image features, *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 9, 62–67, **2001**.
- [22] Chen, Y., *The global analysis of fuzzy dynamical systems*, Doktora Tezi, University of California, Austin, **1989**.
- [23] Lee, M., Wessel, D., Real-time neuro-fuzzy systems for adaptive control of musical processes, *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2061, 464–475, **1993**.
- [24] Rattasiri, W., Halgamuge, S., Computationally advantageous and stable hierarchical fuzzy systems for active suspension, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50, 48–61, **2003**.
- [25] Zeng, X., Keane, J., Approximation capabilities of hierarchical fuzzy systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 13, 659 – 672, **2005**.
- [26] Oh, S.K., Kim, W.D., Pedrycz, W., Design of optimized cascade fuzzy controller based on differential evolution: Simulation studies and practical insights, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 520–532, **2012**.
- [27] Takács, M., Multilevel fuzzy approach to the risk and disaster management, *Acta Polytechnica Hungarica*, 7, 91–102, **2010**.
- [28] Haciomeroglu, M., Laycock, R., Day, A., Fuzzy Logic Controlled Pedestrian Groups in Urban Environments, *ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*, 7660, 326–337, **2012**.

- [29] Ramirez, E., Mayorga, R., A cascaded fuzzy inference system for dynamic online portals customization, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2, 300–313, **2007**.
- [30] Wang, D., Zeng, X., Keane, J., A survey of hierarchical fuzzy systems, *International Journal of Computational Conginon*, 4, 18–29, **2006**.
- [31] Bieniawski, Z., *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. A Wiley-Interscience Puplication, **1989**.
- [32] Fairhurst, C., Lin, D., Fuzzy methodology in tunnel support design, *U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 1, 269–278, **1985**.
- [33] Nguyen, V. U., Ashworth, E., Rock mass classification by fuzzy sets, in *U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 937–946, **1985**.
- [34] Jalalifar, H., Mojedifar, S., Sahebi, A., Prediction of rock mass rating using fuzzy logic and multi-variable RMR regression model, *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 237–244, **2014**.

EKLER

EK1: RMR Problemi için Kullanılan Sözel Değişkenlere Ait Üyelik Fonksiyonları





EK2: Kaya Kütle Puanı Sistemi (Kaya Kütlelerinin Jeomekanik Sınıflandırması)

A. SINIFLANFIRMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI

Parametre		Değerlere Ait Sınırlar							
1	Kaya Malzemesi Dayanımı	Nokta-Yük Dayanım İndeksi (MPa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Bu düşük aralık için tek eksenli sıkışma dayanımı tercih edilir.		
		Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 5	5 – 25	1 – 5	< 1
	Puanlama	15	12	7	4	2	1	0	
2	Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 5	< 25		
	Puanlama		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik Aralığı		> 2 m	0.6 – 2 m	200 – 600 mm	60 – 200 mm	< 60 mm		
	Puanlama		20	15	10	8	5		
4	Süreksizlik Koşulları		Çok pürüzlü Sürekli değil Açıklık Yok Bozunmamış	Az Pürüzlü Açıklık < 1 mm Az Bozunmuş	Az pürüzlü Açıklık < 1 mm Çok bozunmuş	Kaygan Açıklık < 1 mm Dolgu < 5 mm VEYA Açıklık 1 – 5 mm Sürekli	Yumuşak dolgu > 5 mm VEYA Açıklık > 5 mm Sürekli		
	Puanlama		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı Suyu Koşulu	10 m tünel uzunluğu başına akış (l/min)	Yok	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
		Oran $\frac{\text{Ortak Su Basıncı}}{\text{Maksimum Asal Gerilme}}$	VEYA 0	VEYA < 0.1	VEYA 0.1 – 0.2	VEYA 0.2 – 0.5	VEYA > 0.5		
	Genel durumlar		Tamamen kuru	Rutubetli	Islak	Damlama	Akan		
	Puanlama		15	10	7	4	0		

B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİ İÇİN PUANLAMA

Süreksizliğin Doğrultu ve Daldırma Yönelimi	Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç Uygun Değil	
Puanlama	Tüneller ve Madenler	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Yamaçlar	0	-5	-25	-50	-60

C. TOPLAM PUANDAN ELDE EDİLEN KAYA KÜTLE SINIFLARI

Puanlama	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	≤ 20
Sınıf Numarası	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok İyi Kaya	İyi Kaya	Orta İyi Kaya	Kötü Kaya	Çok Kötü Kaya

D. KAYA KÜTLE SINIFLARININ ANLAMLARI

Sınıf Numarası	I	II	III	IV	V
Ortalama Bekleme Süresi	20 yıl (15-m yayılma)	1 yıl (10-m yayılma)	1 hafta (5-m yayılma)	10 saat (2-5 m yayılma)	30 dk (1-m yayılma)
Kaya Kütesinin Kohezyonu (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Kaya Kütesinin Sürtünme Açısı(deg)	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

EK3: Tez Çalışması Sonucunda Yayınlanması Planlanan Makale Taslak Metni

A defuzzification-free hierarchical fuzzy system (DF-HFS): rock mass rating prediction

Begum Mutlu^a, Ebru Akcapinar Sezer^b, Hakan Ahmet Nefeslioglu^c

^aGazi University Department of Computer Engineering06800 Maltepe, Ankara, Turkey
Tel.:+903125823130 Fax: +903122306503 E-Mail Address: begummutlu@gazi.edu.tr

^bHacettepe University Department of Computer Engineering06800 Beytepe, Ankara,
Turkey E-Mail Address: ebruakcapinarsezer@gmail.com

^cHacettepe University Technical Sciences Vocational School06900 Polatlı, Ankara,
Turkey E-Mail Address: hanefeslioglu@hacettepe.edu.tr

Abstract

When use of only a single fuzzy system becomes inapplicable due to the increase of the number of input parameters, Hierarchical Fuzzy Systems (HFS) are commonly used for the solution. This inapplicability arises from both computational cost and the challenging process for the fuzzy rule creation. The conventional application of hierarchical inference system performs the steps from fuzzification to defuzzification one by one in each sub-system and the provided crisp result is transferred to the higher one. The major drawback of this process is that the defuzzification stages performed in the inner layers degenerate the fuzziness level. This drawback causes two outcomes. Firstly, the hierarchical system is not able to provide the same outputs with single system solution. And secondly, the output value varies on the use of different hierarchical structures. The main research problem of the presented study is to design HFSs that can provide the output of a single fuzzy system. This problem may be resolved if the hierarchical flow in the HFS is able to be designed according to the preservation of the fuzziness. Herein, the Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System (DF-HFS) is proposed in which the misleading defuzzification steps are eliminated from the hierarchical flow and the fuzziness is propagated to the higher layer without being exposed to any degeneration. In order to test the accuracy of data transmission, the experiments are performed on two different

problems that are logical XOR gate and Rock Mass Rating (RMR) prediction. Obtained results show that the DF-HFS achieves more accurate data transmission than its alternatives and it provides the closest outputs compared to a single fuzzy system.

Keywords Hierarchical Fuzzy Systems, Mamdani Style Fuzzy Inference, Fuzziness Transmission, Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System, Rock Mass Rating Prediction.

1. Introduction

Learning in computer systems can be performed by using two different strategies: learning from data and learning from an expert. Regarding the former, it may be difficult to ensure the stability if the data set is poor quality. This weakness may occur because of using insufficient, imbalanced or skewed data sets, unfavorable sampling strategy or ineffective data pre-processing. These reasons may be expanded due to the domain specific circumstances. Therefore the heuristic approaches with human knowledge are paid considerable attention in such cases where the data is lack of quality or even does not exist. Fuzzy Inference Systems are robust heuristic solutions which are created to model the fuzzy logic approach (Zadeh, 1965) by operating the fuzzy rules and fuzzy sets. These systems have been used for handling a great number of challenging problems in several research areas (Castillo and Melin, 2008; Hirota and Sugeno, 1995; Mamdani and Assilian, 1975).

In order to construct a fuzzy inference system the linguistic variables and fuzzy sets are used besides the “if-then” rules. Each input or output variable which can be stated by a linguistic expression is called linguistic variable. The fuzzy sets are used to describe each class attribute of each linguistic variable and they are expressed by fuzzy membership functions. The membership functions allow the calculation of the input variables’ membership degrees. Note that a fuzzy set is not restrictive and close as a classical set since its boundary is overlapping with one or more fuzzy sets’ boundaries (Zadeh, 1965).

Although Fuzzy Inference Systems have enough opportunities to use, a vital restriction, curse of dimensionality, may occur. This restriction arises when the solution needs to execute a complex system with a great number of input variables. The complexity in

question becomes a serious concern from the structural, logical and cost basis (Wang et al., 2006). Note that single fuzzy inference system is termed as Conventional Fuzzy System (CFS) in this paper. The increase in the number of the input variables causes a serious growth in the number of the fuzzy rules for a complete rule base system. This situation makes the construction and operation of the inference system difficult and almost inapplicable due to the computational cost. On the other hand this increase complicates the creation of each rule as well. Because establishing a logical association of each linguistic variable becomes challenging for the expert. Thus Hierarchical Fuzzy Systems (HFS) are proposed via separating the high dimensional CFS into lower dimensional sub-systems, and linking these sub-systems in hierarchical manner.

In Mamdani style (Mamdani and Assilian, 1975) conventional hierarchical inference systems (conHFS), each sub-system performs the inference stages and delivers a crisp output to the higher layer. The only thing that has been considered until quite recently is the effective design of the hierarchical system. Because the usage of different hierarchical structures causes differences in the outputs. On the other hand the accuracy of data transmission in conHFS is investigated in this paper. Because it is obvious that the defuzzification stages performed in the inner layers intervene in the fuzziness level of the system via reducing the fuzzy information into a crisp value. This situation causes two drawbacks: inaccuracy and instability. The conHFS is inaccurate because it is not managed to guarantee to provide the corresponding CFS outputs. In fact this is a significant need which should not be compromised. Because the aforementioned reasons which encourage building a HFS does not aim to diverge the CFS accuracy but the difficulties in construction and application of CFS. On the other hand conHFS is instable because it is not robust against the variations in the hierarchical structure. The variation in question may be in the order of the input variables, the connections of the sub-systems, the layers or the overall hierarchical structure (such as incremental, aggregated and cascaded structure (Chung and Duan, 2000)).

In this paper a new strategy which aims to provide accurate data transmission between layers is proposed. The new strategy is called as Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System (DF-HFS). In DF-HFS, the redundantly repeated and mistaken defuzzification stages are removed and the fuzzy result of the aggregation stage is directly

transferred to the higher layer. Thus the fuzzy information is propagated from the first layer to the topmost layer precisely.

Experiments are performed on the logical XOR gate and Rock Mass Rating (RMR) calculation. The logical problem is operated because rule creation is simple and straightforward. More importantly, it is possible to create the hierarchical system rules which are same with the corresponding CFS. In fact this is the most critical point for the measuring of information loss between layers. Therefore the logical XOR problem is a distinguished case in this study. On the other hand the RMR calculation is selected as a second scenario because the conventional RMR calculation does not address the uncertainty of the RMR parameters. Because the conventional RMR measuring is applied by sharp class boundaries and fixed rating scales although this certainty is not able to be reached in the fieldworks (Aydin, 2004). Accordingly RMR problem is worth to be solved by a rule base system (Bieniawski, 1989; Jalalifar et al., 2014). In addition the CFS solution is highly inapplicable because of the great number of input variables and fuzzy rules. Thus a hierarchical solution becomes a significant necessity for the RMR prediction.

DF-HFS, conHFS and Hierarchical Classifying-Type Fuzzy System (HCTFS) (Rattasiri and Halgamuge, 2003) is implemented on logical XOR and RMR scenarios for the quantitative comparison. The comparisons are performed by using the CFS output as the reference point for the current input tuple. Obtained results concludes that among the other hierarchical inference flows, DF-HFS provides the closest outputs to the corresponding CFS. Moreover once the hierarchical system rules is managed to be created equivalently with the related CFS rules, the DF-HFS presents the identical behaviors with CFS unlike the other hierarchical solutions. In this circumstances it becomes flexible and robust against the changes in the hierarchical structure as well.

2. Literature Summary for HFS and RMR

Hierarchical fuzzy systems address the issue that solving a complex problem with a great number of input parameters by a single fuzzy inference system has some logical, structural and cost basis restrictions. One of the pioneering study for hierarchical fuzzy systems is proposed by Raju et al. in (Raju and Zhou, 1993) to overcome these restrictions.

Afterwards the computational and structural advantages of HFSs are discussed in several studies (Rattasiri and Halgamuge, 2003, 2000; Rattasiri et al., 2008; Wang et al., 2006).

The commonly accepted process for the Mamdani style HFSs is solving each sub-system by applying fuzzification, rule-fitting, aggregation and defuzzification respectively. Subsequently the provided crisp output is transferred to the higher layer. This conventional application is called as conHFS in this paper. The conHFS is applied in several studies in different research areas. Mar and Lin (Mar and Lin, 2005), in example, proposed a car-following collision prevention control device based on a HFS that contains a velocity sub-fuzzy controller and acceleration sub-fuzzy controller. Akyuz et al. (Akyüz et al., 2012) utilized from a hierarchical fuzzy logic controller in their cascaded system that is used to remove link vibrations and to obtain fast trajectory tracking performance on a single-link flexible-joint robot manipulator. Takasc (Takács, 2010) examined the risk and disaster management in the study where a four-layer hierarchical fuzzy inference system with 19 input parameters is presented. Hacıomeroglu et al. (Hacıomeroglu et al., 2012) proposed a three layer HFS to calculate the speed of each virtual agent which belongs to a social group in crowd simulation. Neogi et al. (Neogi et al., 2011) used a hierarchical model for the performance evaluation of the university staff. Ramirez and Mayorga (Ramirez and Mayorga, 2007) examined the usage of two-layer hierarchical fuzzy system in order to create customized dynamic web portals designed for the customers' points of interest. Mahapatra et al. (Mahapatra et al., 2011) on the other hand designed a hierarchical system with multi input and multi output to predict the water quality index of Indian River. Nevertheless none of these studies considers the accuracy of data transition between layers.

Since HFSs are paid a remarkable attention of using, the chosen hierarchical structure and ordering issue between linguistic variables becomes another accentuated problem. Because the conHFS is not robust against the changes in the hierarchical structure or the order of input variables. Therefore several structures are proposed to provide the most accurate HFS. These strategies are classified in Chung and Duan's work (Chung and Duan, 2000) as incremental, aggregated and cascaded fuzzy systems. In (Chung and Duan, 2000) it is also suggested to assign the input variables according to their importance on the result variable from the first layer to the higher layers. This ordering issue is addressed in (Mahapatra et al., 2011; Wang, 1992; Wei and Wang, 2000) with similar perspective and explained clearly in (Wang et al., 2006). Briefly the data from the first layer is propagated to the

topmost layer without being affected intensely from the subsequent layers (Wang et al., 2006). This means that the most significant sub-system containing the most important input variables should be located at low layers.

For customized problems special types of hierarchical structures are proposed by several studies (Wang et al., 2006). In example Domingo and Sierra (Domingo and Sierra, 1997) proposed a chaining rule, a special case of incremental strategy, by linking the sub-systems like a chain. Herein all of the input variables are assigned to the single sub-system in the first layer. Since this structure prevents the distribution of input parameters among the existing sub-systems, it does not overcome the curse of dimensionality problem. Rattasiri and Halgamuge (Rattasiri and Halgamuge, 2000) on the other hand, proposed the Alternative Model of Hierarchical Fuzzy System (AHFS) in order to make a profit from the computational complexity and memory space. In addition it is aimed to create more stabilized HFS outputs against the differences in the input variables' order. AHFS structure may be considered as a special type of cascaded system. It aims to separate all of the input parameters as pairs, and to construct a tree-like structure with sub-systems containing these pairs. However the doubly separation of the input variables could be difficult during the rule creation process if the association between the variables is not able to be constructed. In addition the rule creation for the inner layer sub-systems possibly becomes another problem. Because the intermediate outputs to be used as inputs in the subsequent layer may not be logically connected as pairs.

In literature there are few studies address the efficient information transition on HFSs. Wang et al. (Wang et al., 2006), in example, briefly mentioned the information loss arising from the defuzzification stages in the inner layers. Correlatively Rattasiri and Halgamuge (Rattasiri and Halgamuge, 2003) proposed a Hierarchical Classifying-Type Fuzzy System (HCTFS) that relies on AHFS. HCTFS also proposed to eliminate the redundantly repeated defuzzification stages. In the inner layers the applied two stages are rule-fitting with product operation and aggregation with maximum operation. Regarding to topmost layer, the root sub-system, the rule fitting is employed by product operation likewise. Yet the aggregation is performed by sum operation. In addition the weighted-average defuzzification is applied to procure a crisp output from the system. Performance evaluation of HCFTS is achieved by using two different aspects: computational cost as against to the CFS and the stability analysis based on the range of the output value.

However the HCTFS model is not evaluated according to the accuracy of the system's output. In fact the numerical difference between HCTFS and CFS outputs should be considered in order to understand the measure of the information loss which is handled by HCTFS.

The conventional Rock Mass Rating, RMR, calculation aims to operate the ratings for each class which belongs to the current variable. In fact, mapping the value of input variable with a crisp class may not be accurate. The main cause of this peculiarity is inherent uncertainty of rock mass environment in the earth's crust. The reasons for the uncertainty in RMR calculation are given as follows; qualitative criteria, sharp class boundaries, fixed rating scales, and variable input reliability (Aydin, 2004). Even in the pioneer study of conventional RMR calculation (Bieniawski, 1989), the potential advantages of the usage of heuristic approaches is highlighted. Since then the RMR calculation is employed by using fuzzy sets in several studies where high prediction performances are achieved (Aydin, 2004; Daftaribesheli et al., 2011; Jalalifar et al., 2014; Nguyen and Ashworth, 1985).

3. RMR Data Set

Rock Mass Rating (RMR) developed by Z.T. Bieniawski (Bieniawski, 1989) is a strategy for the classification of rock masses which is universally used for tunnels, mines, slopes and foundations in order to provide insight during the planning of the construction. Conventionally there are two stages for the RMR calculation as follows: basic RMR calculation and adjusted RMR calculation. Basic RMR is provided by using 5 parameters which are Uniaxial Compressive Strength of Rock Material (UCS), Rock Quality Designation (RQD), Spacing of Discontinuities (x), Conditions of Discontinuity, and Groundwater Condition (GW). Conditions of Discontinuity contains 5 sub-parameters which are Persistence of Discontinuities (or Trace Length) (l), Aperture (a), Roughness of Discontinuities (r), Filling Material ($fill$), and Weathering (w). Adjusted RMR, on the other hand, is fulfilled after the involvement of Orientation of Discontinuity to the basic RMR. The orientation parameter in question reduces the basic RMR according to the favorability of the rock mass's orientation. If the orientation is "very favorable" then the adjusted RMR equals to the basic RMR since the amount of the reduction is 0. In this paper the orientation parameter is assumed as "very favorable", and in fact the basic RMR is aimed to be calculated. Accordingly the RMR calculations are performed by using 9 basic

parameters without considering the orientation. In addition these parameters are classified into 5 classes according to their corresponding features. The ratings which represents each class may be found in RMR chart (Bieniawski, 1989). In conventional RMR calculation, for each input variable, the rating of the related class is added to the basic RMR value.

During the fieldworks, passing an absolute decision on the measures of the RMR parameters is highly challenging. In addition mapping the value of input parameter with the related class may be incorrect since the conventional RMR classes have sharp boundaries. In fact RMR parameters are very applicable for the heuristic solutions (Bieniawski, 1989). Therefore the RMR calculation may be performed as a prediction problem, and just like several studies have already utilized (Aydin, 2004; Daftaribesheli et al., 2011; Jalalifar et al., 2014; Nguyen and Ashworth, 1985), the fuzzy logic may be successfully applied for the solution. Nevertheless using a single fuzzy system for solution may be inapplicable. Because the system has 9 inputs and each input contains 5 fuzzy sets. Herein the 5^9 fuzzy rules are required to construct a complete rule base system. Such number prevents the manual rule creation. However, rules are able to be produced automatically by utilizing the conventional RMR calculation based on Bieniawski's RMR chart (Bieniawski, 1989). Yet still the single-system inference spends very much time although the rules are managed to be generated somehow. As a result building a hierarchical system becomes a necessity to provide an effective an applicable solution.

4. Details of DF-HFS Implementation

In Mamdani style conHFS, the crisp output of a sub-system is transferred to the higher layer sub-system as an input. Although this strategy solves the CFSs' curse of dimensionality problem by reducing the inference cost and allowing simple rule creation, the redundantly repeated defuzzification stages cause information loss. Because each defuzzification generalize the fuzzy information by reducing it into a single value (Chung and Duan, 2000; Wang et al., 2006). In fact it is very difficult to describe the whole fuzzy set with a single value. Therefore an amount of data is renounced in each defuzzification. Once a defuzzification is applied, providing the identical fuzzy set in the successor sub-system is not able to be ensured. This fact clarifies the degeneration on the level of fuzziness during the data transmission.

The information loss which is caused by ineffective data transmission makes the chosen hierarchical structure more important. Because conHFS is not robust against the changes on the hierarchical structure. The output of the system varies against the changes of the hierarchical structure. Note that the values of the input linguistic variables are stable. The changes are only on the order of the input variables, the number of layers, the number of the input variables, the connections between the sub-systems etc. Since the conHFS is not resistant to these revisions, a drawback occurs: instability. The reason behind this peculiarity is the data loss caused by inner layer defuzzification. Solving a revised system actually means that, a revised inference process may be performed. In example if the number of input variables of the current sub-system is reduced and the taken input variable(s) link(s) to another sub-system, the whole inference process may change in the both current sub-system and the receiver sub-system. This means that the fuzzy set after aggregation stage varies due to this interchange. Then after the defuzzification in each system, it may not be ensured to handle the conversion since the previous fuzzy sets permanently disappear. Still if transition of fuzziness without requiring the inner layer defuzzification is managed to be applied, this conversion may be handled in the subsequent layers.

In this paper, a new hierarchical inference flow, namely Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System (DF-HFS) is proposed to provide accurate data transmission between layers. It defends the idea that the only sub-system which needs to transform the fuzzy output into a crisp value is the sub-system in the topmost layer (root sub-system). In the inner layers, the defuzzification stages are eliminated from the inference flow. Herein the aggregation result containing the triggering degree of each fuzzy set belongs to related output variable is directly transferred to the higher layer. In that point the fuzzification stage in the following sub-system becomes redundant since the input of the corresponding system is already fuzzy. Therefore the redundant fuzzification stages are also eliminated. Note that the fuzzification in the sub-systems which are directly linked to the crisp input variables is not considered as redundant. In order to illustrate the features of this flow deeply and exteriorly, DF-HFS is presented in Figure 1 where F, RF, A, and D are the symbols of fuzzification, rule fitting, aggregation and defuzzification stages respectively. In addition $SFS_{i,j}$ expresses the sub-system in the i^{th} layer and j^{th} sequence number.

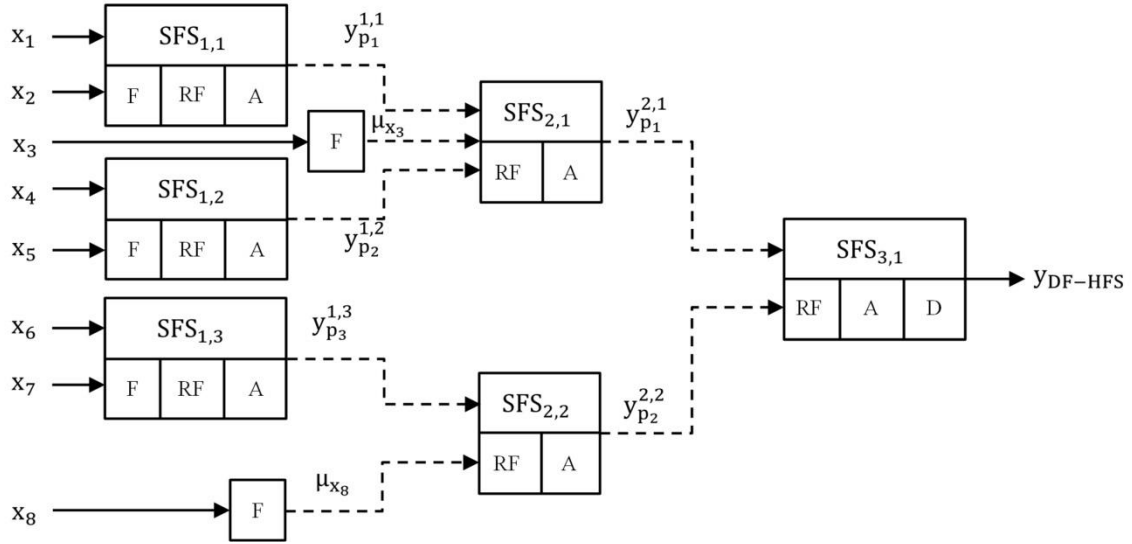


Figure 1. An illustration of DF-HFS

The most important motivation of DF-HFS is to create a hierarchical flow which provides equal outputs with the CFS for all variations of input tuples. This motivation may also offer the elimination of instability encountered in conHFS. It becomes incongruous to suspect about the system's accuracy if this motivation is fulfilled. Nevertheless this motivation may only be satisfied whether the rules of whole hierarchy is managed to be created equivalently to the CFS rules. On the other hand, once the rules of a HFS are same with the corresponding CFS, it becomes possible to scale the magnitude of information loss precisely.

In this paper, DF-HFS is implemented on RMR prediction problem. conHFS and HCTFS is also employed on this problem to perform fairly comparison between different hierarchical inference flows. In addition the problem is solved by CFS as well, since the accuracy tests of hierarchical systems are performed via measuring the behavioral difference with the related CFS.

Hierarchical systems for the RMR prediction are designed by AHFS. In fact conHFS and DF-HFS is not dependent to any hierarchical structure. On the other hand HCTFS is proposed on this structure. Implementations of HCTFS on another structure may not be fair. Thus it is believed that AHFS usage allows reliable comparison between hierarchical systems. It may be seen in Figure 2 that each sub-system on the tree-like structure has two inputs in AHFS. The structure has 5 layers and 8 sub-systems.

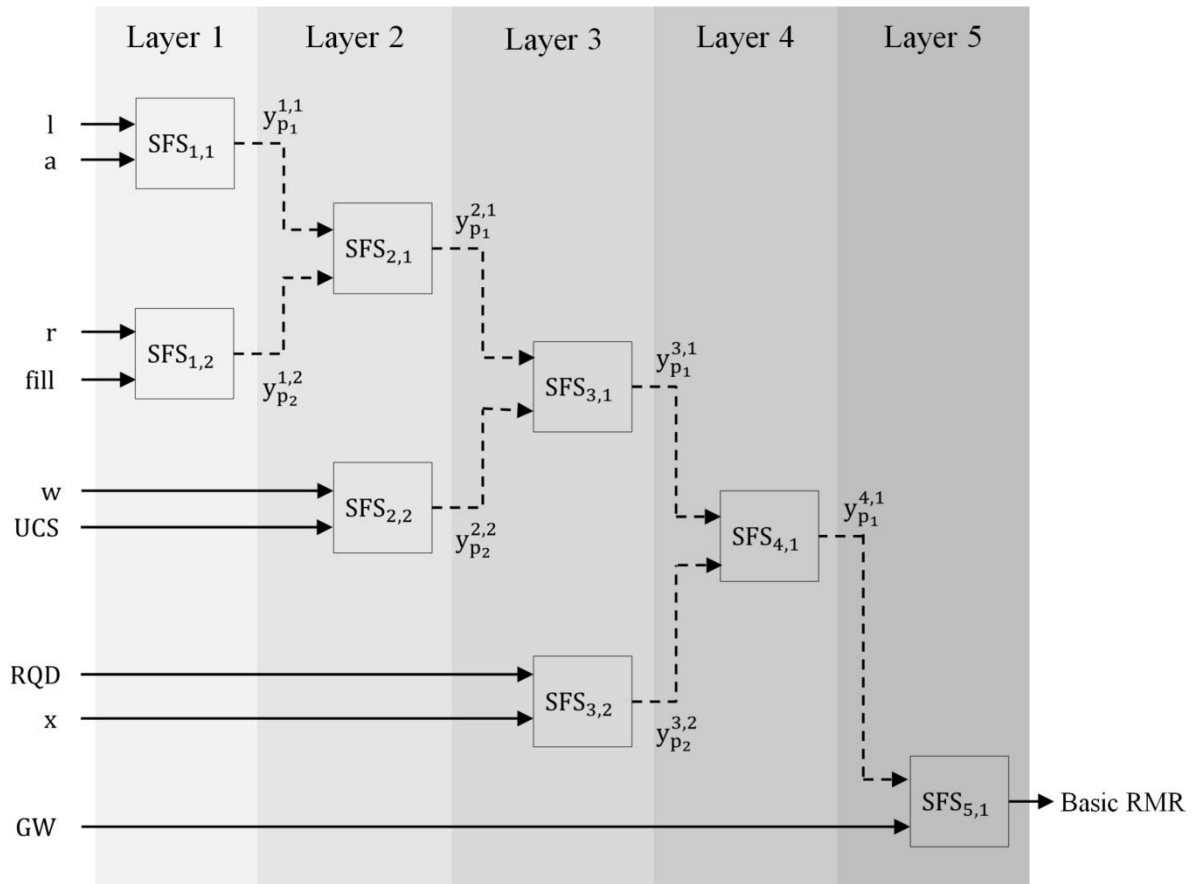


Figure 2. The AHFS type hierarchical structure to use the implementations of RMR prediction

The rule creation for the RMR case may be classified into three target groups of sub-systems according to the fuzziness of the input variables: Systems with crisp inputs, systems with fuzzy inputs and systems with a fuzzy and a crisp input. Examples for these three groups may be seen in Figure 2. CFS and the sub-systems which are directly bounded to the input variables ($SFS_{1,1}$, $SFS_{1,2}$, $SFS_{2,2}$, $SFS_{3,2}$) are in the first group. The second group contains the systems ($SFS_{2,1}$, $SFS_{3,1}$, $SFS_{4,1}$) which provides their input variables from another system of the hierarchy. And finally the root sub-system ($SFS_{5,1}$) in the RMR hierarchy is in the third group. Although the properties of these three type sub-systems are different the rule generation strategy is constant for each of them (except the chosen ratings mentioned in following paragraph).

In order to generate the rules for each group of fuzzy system, each rating belongs to the relevant fuzzy set is normalized by division to S where S is the sum of the maximum ratings for each input variable. Then the condition parts of fuzzy rules are created by

generating all of the combinations of each fuzzy set belongs to each variable. Since there are 5 fuzzy sets in each input variable, the number of fuzzy rules are 5^m where m symbolizes the number of input variables of the current system. Regarding the consequents of the rules the normalized ratings of related fuzzy sets are summed according to the conditions of each rule in rule set. Then in order to map the sum result to the fuzzy sets linguistically, a decision criterion is fulfilled. This criterion basically specifies the bounds of each fuzzy set. In accordance with this criterion if the summed result is less than or equal to 0.2 then the consequent fuzzy set is K5; if it is more than 0.2 and less than or equal to 0.4 then the consequent fuzzy set is K4; if it is more than 0.4 and less than or equal to 0.6 then the consequent fuzzy set is K3; if it is more than 0.6 and less than or equal to 0.8 then the consequent fuzzy set is K2 and finally if it is more than 0.8 and less than or equal to 1.0 then the consequent fuzzy set is K1. For the following calculations, if they exist, the mid-point of each fuzzy set of this output variable is used as its rating.

Figure 3 illustrates the DF-HFS for the RMR prediction. The solution is displayed from the first sub-system ($SFS_{1,1}$) to the root sub-system ($SFS_{5,1}$) as already presented in Figure 2. The input variables are set as $l=4.7$, $a=4.0$, $r=0.5$, $fill=0.3$, $w=0.5$, $UCS=28$, $RQD=32$, $x=92$, and $GW=85$ respectively. The implementation of DF-HFS to solve the sample RMR case is as follows: Firstly the input variables are fuzzified in $SFS_{1,1}$. Then the rule-fitting stage is applied by minimum and the aggregation stage is performed by maximum. After the aggregation stage, the result set ($y_1^{1,1}$) is directly transferred to the higher layer sub-system ($SFS_{2,1}$) as its fuzzy input. Rule-fitting and aggregation pair is employed on each sub-system in the hierarchy until it comes to the root sub-system which has one crisp and one fuzzy input. The crisp-fuzzy pair confusion is easily handled by only one fuzzification performed only on the GW. Then rule-fitting and aggregation stages are completed likewise. Finally, the defuzzification stage based on Center of Area (COA) method is applied in order to provide a crisp output from this sub-system.

It may be deduced from DF-HFS that it aims to transfer the maximum value of minimum membership degrees for the current rule. In reality this strategy is similar with the inference technique of CFS which uses the same methods inside the inference stages. As a result of this similarity it is predictable that DF-HFS is likely to procure approximate and even equal outputs to the corresponding CFS.

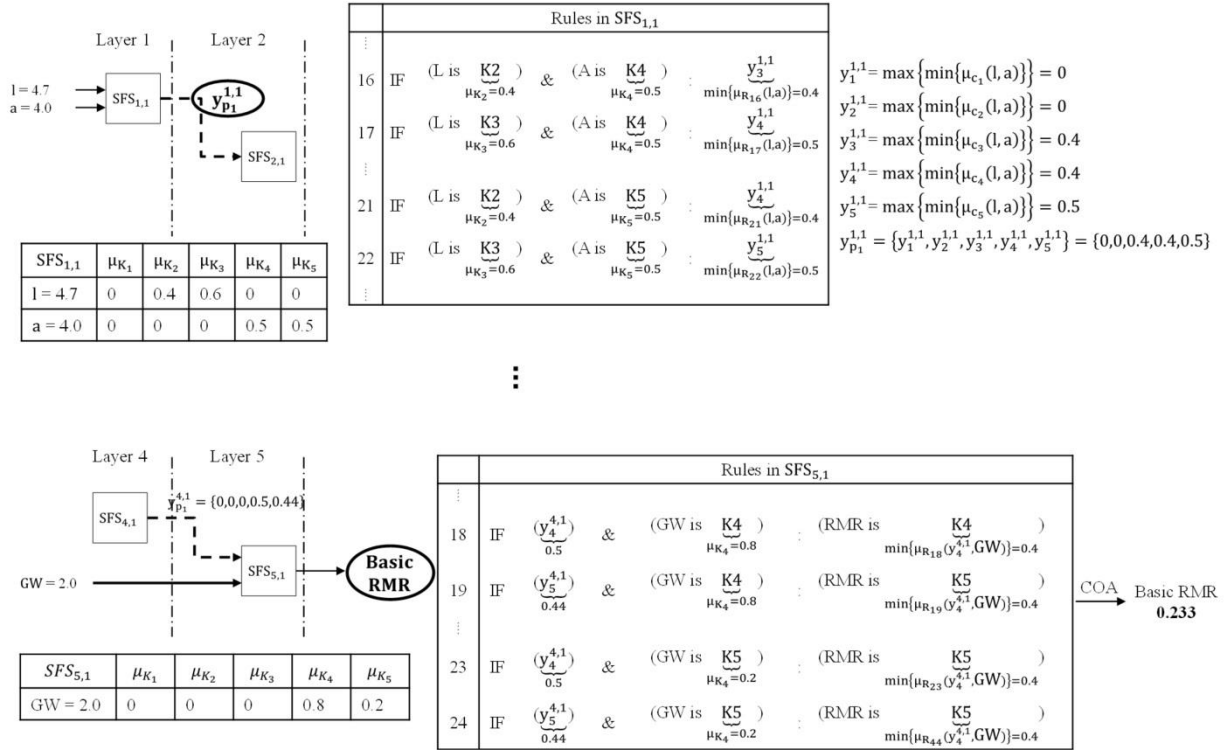


Figure 3. An illustration of DF-HFS in an example RMR case

5. Experiments and Results

The hierarchical fuzzy systems provide a solution to solve the curse of dimensionality problem of single fuzzy inference systems. During the inference flow, the conventional HFS (conHFS) repeats the misleading defuzzification stages redundantly in the inner layers. This detail causes information loss during the data transmission. Because obtaining the same fuzzy set once it is defuzzified is not possible to ensure after the subsequent fuzzification. The information loss prevents procuring the same results with CFS from the related HFS attendantly. In addition it causes instability issue against the changes of the hierarchical structure. This is a trade of between curse of dimensionality and not to be able to reach the CFS accuracy. In order to overcome this problem, HCTFS (Rattasiri and Halgamuge, 2003) brings brilliant solution by using AHFS structure. Nevertheless it does not address the accuracy differences with CFS but the reduction of inference cost of CFS.

The conHFS, HCTFS and proposed DF-HFS are implemented by utilizing FuzzyNet (Kaluzhny, 2009) library. Accuracy test is performed on two different cases: Logical XOR gate and RMR prediction problem. These two cases may be seen irreverent whereas there is an important common trait between them: both of the cases can be solved by CFS

somehow. This feature is vital for the accuracy based comparisons of this paper. Because the reference point of the comparisons is CFS behaviors. In addition each case has own features. The logical XOR problem is employed in order to scale the exact magnitude of the information loss through the data transmission between layers. Specifically, the rule creation of this problem is straightforward. This means that it is easy to obtain HFS rules which are same with the corresponding CFS rules. Since the most significant requirement of DF-HFS is identical rule procurement for both HFS and CFS, it is possible to reliably observe how accurate does the DF-HFS's data transmission is. Regarding RMR case, on the other hand, it is not possible to guarantee the identical rule procurement. But yet the RMR case is properly solved by using CFS. In addition the problem allows the observation on the relative behavioral differences when the rules of HFS and corresponding CFS is not actually same. On the other hand solving a logical gate by using fuzzy logic only avails for experimental purposes. On contrary to XOR gate, RMR prediction is a real case to be solved by using fuzzy logic approaches and also it really needs to form a HFS due to its suffering from the curse of dimensionality problem on structural, logical and cost basis.

5.1. Experiment: Logical XOR Case

Different hierarchical inference flows (conHFS, HCTFS and DF-HFS) are implemented for the solution of logical XOR gate. There are significant reasons for choosing a logical case for experiments. First of all the logical problems are both understandable and easy to implement. In addition since the rule creation is straightforward; it is possible to generate rules for hierarchical systems which are same with the rules of CFS. This allows measuring the change of fuzziness level during the data transmission between layers with high precision. The increase on the number of input parameters does not prevent the rule creation as well. It only enhances the computational cost for construction and the inference processes of CFS. At this point it becomes meaningful to observe the reduction of computational cost when the corresponding HFS is implemented. Indeed the preliminary experiments to test the accuracy of DF-HFS were already employed on logical AND gate and presented in (Mutlu et al., 2014) without taking HCTFS into account during the accuracy comparison.

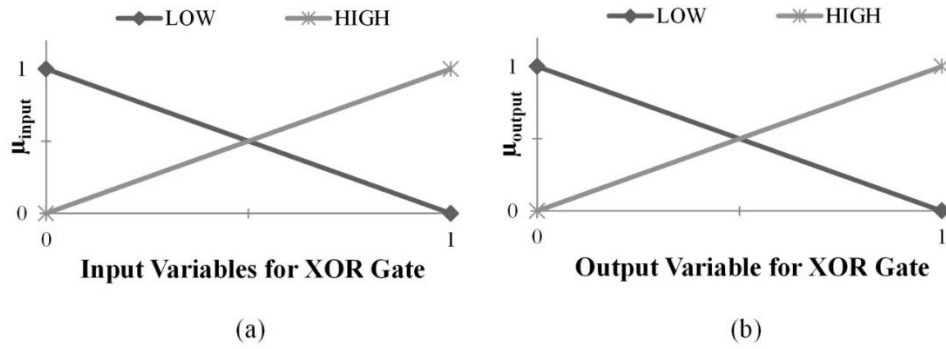


Figure 4. The membership functions for (a) input and (b) output linguistic variables for XOR problem

The implementations for the logical XOR problem are performed with 4 and 6 input variables. These input variables are assigned a value from 0.1 to 0.9 by the increment of 0.1. This numerical representation corresponds to the fuzzy sets of low and high (see Figure 4) respectively. The size of validation space for 4 input variables is 9^4 while this value is 9^6 for the experiments with 6 inputs. HFSs are designed by using AHFS (Rattasiri and Halgamuge, 2000) structure in order to perform a fair accuracy comparison between conHFS, HCTFS (Rattasiri and Halgamuge, 2003) and DF-HFS.

Table 1. The results of the experiments based on CFS behaviors on logical XOR problem

Problem	Validation Space Size	Number of Inputs	RMSE for conHFS	RMSE for HCTFS	RMSE for DF-HFS
XOR	9^4	4	0.031035721	0.03414557	0
XOR	9^6	6	0.034227577	0.03665665	0

Table 1 shows the calculated Root Mean Square Errors (RMSEs) for each type of HFS with reference to the CFS results. Unlike the conHFS and HCTFS, the DF-HFS procures identical results with CFS while also handling the instability concern. This situation occurs as a consequence of two details. Firstly the HFS rules are able to be generated equivalently with the related CFS. As already mentioned, this is the most significant requirement for the DF-HFS to procure CFS behaviors. Secondly just like corresponding CFS, DF-HFS tends to transfer the maximum of the minimum triggering values during the inference flow. In other words the DF-HFS with minimum base rule-fitting and maximum performed

aggregation is identical with running this process into the related CFS. These two reasons also bring resistance to DF-HFS against the revisions of the hierarchical structure.

5.2. Experiment: RMR Case

RMR prediction is solved by CFS, conHFS, HCTFS and DF-HFS as well as the logical XOR gate. As mentioned before, there are 9 inputs and 1 output for the solution. The membership functions for each linguistic variable are illustrated in Figure 5. The pre-designed AHFS type hierarchical system is presented in Figure 2.

The validation space for the performance comparison contains manually generated 41 RMR cases. In fact the case generation is another challenging problem. In 1973, 49 RMR case was used for development and evaluation. Thanks to the studies on coal mining this number reached 62 in 1984. Then it was extended to 78 during the studies on tunneling and mining (Bieniawski, 1989). The most significant point which has been considered during the case generation is plausibility of the cases whose distribution on the corresponding RMR classes from ‘very good rock’ to ‘very poor rock’ is balanced.

Table 2 presents the key features of the fuzzy system’s structure and the computational time. The presented computational times are based on milliseconds. They display the average time while considering both the construction and the inference processes. And these values directly vary due to the number of fuzzy rules. It may be concluded from Table 2 that a single system solution for such a large number of input variables is inapplicable even though the rules are generated automatically. Otherwise if the prediction is performed via a HFS with 2 layers and 3 sub-systems, the computational time decreases. Moreover the number of fuzzy rules and directly the computational time are exposed to a strict decline once the system is designed by using AHFS with 5 layers and 8 sub-systems. This condition is obtainable from Table 2 that the use of AHFS has a serious advantage on computational cost stemming from the simplicity of fuzzy rules.

The Root Mean Square Error (RMSE), R-Squared (R^2) and Variance Accounted For (VAF) are chosen in order to validate the predict values with the actual values by using different perspectives. The values tagged as actual are both the value calculated by conventional RMR calculation and the value calculated by related CFS. It should be noted

that the DF-HFS that is proposed in this paper does not aim to provide close outputs with the conventional RMR calculation but the related CFS. Because the motivation of this paper is creating a hierarchical inference flow which releases identical solution with corresponding CFS by eliminating the information loss between layers.

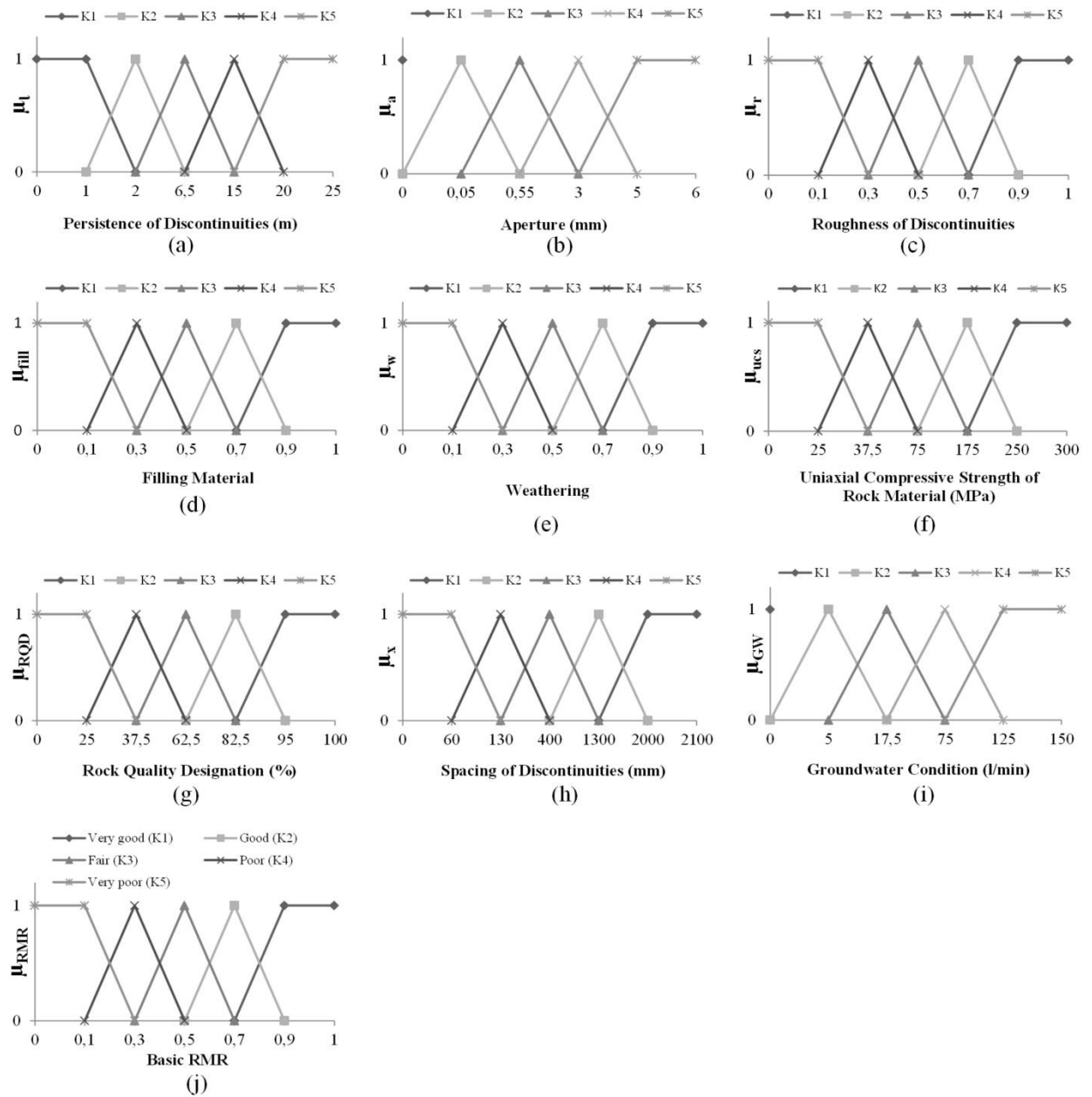


Figure 5. The membership functions for RMR parameters (a) Persistence of Discontinuities (b) Aperture (c) Roughness of Discontinuities (d) Filling Material (e) Weathering (f) Uniaxial Compressive Strength of Rock Material (g) Rock Quality Designation (h) Spacing of Discontinuities (i) Groundwater Condition (j) Basic RMR

Table 2. The cost base comparison for RMR problem on Intel Core2 Duo CPU T6500 @ 2.10 GHz and 4 GB RAM

Fuzzy Logic System	Number of Layers	Number of Sub-Systems	Number of the Rules	Computation Time(ms)
CFS	1	1	5^9	65512
conHFS	2	3	$5^5 + 5^4 + 5^2$	433
DF-HFS	2	3	$5^5 + 5^4 + 5^2$	321
conHFS	5	8	8×5^2	58
HCTFS	5	8	8×5^2	8
DF-HFS	5	8	8×5^2	10

Table 3 presents the calculated RMSE, R^2 and VAF values for examined HFSs. Results show that when the conventional RMR calculation is used as a base, CFS provides the best results. This may prove that CFS provides the most accurate solution among the others. And the hierarchical flow which provides the closest output to CFS's output can be considered as the most effective solution. In that case, the second evaluation which takes CFS into account as reference point may be more meaningful.

Table 3. The Performance Comparison on Different Kinds of HFSs by Using AHFS

	RMSE		R^2		VAF	
	Con. RMR	CFS	Con. RMR	CFS	Con. RMR	CFS
CFS	0.06698	-	0.93802	-	92.27524	-
conHFS	0.10866	0.09791	0.86075	0.85922	86.03935	85.56171
HCTFS	0.11098	0.09572	0.89179	0.88262	88.67554	88.25262
DF-HFS	0.10700	0.09262	0.89651	0.88647	89.22947	88.62432

It may be also seen from the Table 3 figure that the best solution with the lowest error rate is DF-HFS. Nevertheless the DF-HFS does not provide the identical outputs with the corresponding CFS. The reason behind this outcome is not to be able to create the HFS rules which are same with the related CFS. Accordingly the CFS has only one fuzzy system and the rules are generated by using the prediction strategy of the conventional RMR calculation. On the other hand the rules in the inner layers are generated by considering the mid-points of each membership function in which the magnitude of fuzziness has its highest value. This tiny difference in fuzzy rules prevents the identical rule procurement. Therefore the accuracy of the systems is evaluated relatively on contrary to the exact measurements.

Table 4. The Performance Comparison on Different Kinds of HFSs with 2 Layers and 3 Fuzzy Systems

	RMSE		R ²		VAF	
	Con. RMR	CFS	Con. RMR	CFS	Con. RMR	CFS
CFS	0.06698	-	0.93802	-	92.27524	-
conHFS	0.08766	0.06456	0.93895	0.94569	92.87156	94.56329
DF-HFS	0.09079	0.06383	0.93653	0.94892	91.48967	94.67422

The number of defuzzification stages performed during the hierarchical flow effects the magnitude of information loss during the data transmission. Because each defuzzification stage degenerates the fuzziness level. If the RMR prediction is employed on a hierarchical system with 2 layers and 3 sub-systems, the outputs of HFS approach to CFS outputs as shown in Table 4. Because only one defuzzification stage is taken redundantly. This may also arise from combining the 5 sub-parameters of the Conditions of Discontinuity in a separate sub-system. This situation allows closer rule generation to the CFS rules. In addition the inner layer rules that differs from the regular rule creation only used for 1 sub-system. Note that this number was 6 for the AHFS.

6. Conclusion

When use of only one fuzzy system becomes inapplicable due to the increase on the number of input parameters, and indirectly the number of fuzzy rules, curse of dimensionality problem occurs. Thanks to Hierarchical Fuzzy Systems the cores of this problem may be solved as structural, logical and cost basis. However the conventional inference flow causes loss of data during the data transmission between layers. This information loss occurs due to the redundantly repeated defuzzification stages in the inner layers during the inference flow. Each defuzzification stage degenerates the fuzzy information. And subsequent fuzzification stage performed in following layer changes the fuzziness level of the original fuzzy set. There are two adverse outcomes of this degeneration which are in fact interrelated to each other: instability and inaccuracy. The former addresses the issue that the architectural modifications cause variations of the output. Therefore different hierarchical structures have been proposed to procure the most accurate output. This brings the subject to the latter: inaccuracy. In reality the reason behind the instability problem is the inaccuracy problem. In other words the results are instable because they are inaccurate. This is not able to be handled by using different

hierarchical structures but looking back on the details of the inference process. In reality it should be expected from a hierarchical system to provide identical results with corresponding CFS. In such cases where this requirement is satisfied the instability problem may automatically vanish. For that reason the effective data transmission between layers is emphasized in this paper. A new hierarchical flow called Defuzzification-Free Hierarchical Fuzzy Inference System (DF-HFS) is proposed in order to create HFSs with CFS accuracy by ensuring accurate data transmission between layers.

During DF-HFS type of inference, the defuzzification stages are not employed and the result fuzzy set provided from the aggregation stage is directly transferred to the upper layer. Herein since the input is already fuzzy, the fuzzification stage is not required as well. By means of this inference flow the fuzzy information is propagated from the first layer to the topmost layer without exposing any degeneration. The defuzzification stage is only performed on root sub-system whose output should be a crisp value. The elimination of redundant defuzzification and fuzzification stages also reduces the computational time.

In order to evaluate the DF-HFS accuracy, DF-HFS is implemented on two different experiments: logical XOR gate and Rock Mass Rating (RMR) calculation. In addition CFS, conHFS and HCTFS (Rattasiri and Halgamuge, 2003) are also employed for the accuracy comparison. HCTFS addresses the effective data transmission between layers so does this paper. However it has a strict dependency to a custom hierarchical strategy. This situation prevents this inference flow to be used flexibly for different problems.

The comparisons are accomplished by calculating the difference of the hierarchical flows from the related CFS via Root Mean Square Error (RMSE), R-Squared (R^2) and Variance Accounted For (VAF). Regarding the experiments on logical XOR gate the hierarchical system rules are managed to be generated equivalently with the rules of CFS. Although conHFS and HCTFS utilized the same rules and same hierarchical structure with DF-HFS, they are not managed to provide identical outputs for most of the input tuples. Because these inference flows do not propagate the information between layers accurately. However DF-HFS performs the same behaviors with CFS for all of the input tuples. Nevertheless the hierarchical rules for RMR prediction are not able to be generated equivalently with the corresponding CFS and consequently none of the inference flows achieves to provide the CFS outputs. Therefore the comparisons are performed relatively

for conHFS, HCTFS and DF-HFS. In these comparisons the closest outputs from the CFS behavior are provided by DF-HFS since the data transmission does not cause information loss between layers. Moreover DF-HFS can be successfully adapted to any hierarchical strategy unlike the HCTFS.

References

- Akyüz, İ., Bingül, Z., Kizir, S., 2012. Cascade fuzzy logic control of a single-link flexible-joint manipulator. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 20, 713–726. doi:10.3906/elk-1101-1056
- Aydin, A., 2004. Fuzzy set approaches to classification of rock masses. *Engineering Geology* 74, 227–245.
- Bieniawski, Z., 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. A Wiley-Interscience Publication.
- Castillo, O., Melin, P. (Eds.), 2008. *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-76284-3
- Chung, F., Duan, J., 2000. On multistage fuzzy neural network modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 8, 125 – 142. doi:10.1109/91.842148
- Daftaribesheli, A., Ataei, M., Sereshki, F., 2011. Assessment of rock slope stability using the Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR) system. *Applied Soft Computing* 11, 4465–4473.
- Domingo, M., Sierra, C., 1997. A knowledge level analysis of taxonomic domains. *International journal of intelligent systems* 12, 105–135.
- Haciomeroglu, M., Laycock, R., Day, A., 2012. Fuzzy Logic Controlled Pedestrian Groups in Urban Environments. *ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games* 7660, 326–337.
- Hirota, K., Sugeno, M., 1995. *Industrial applications of fuzzy technology in the world*. World Scientific.
- Jalalifar, H., Mojedifar, S., Sahebi, a. a., 2014. Prediction of rock mass rating using fuzzy logic and multi-variable RMR regression model. *International Journal of Mining Science and Technology* 24, 237–244. doi:10.1016/j.ijmst.2014.01.015
- Kaluzhny, D., 2009. *Fuzzy Net: Fuzzy Logic Library for Microsoft .NET*.
- Mahapatra, S.S., Nanda, S.K., Panigrahy, B.K., 2011. A Cascaded Fuzzy Inference System for Indian river water quality prediction. *Advances in Engineering Software* 42, 787–796. doi:10.1016/j.advengsoft.2011.05.018
- Mamdani, E.H., Assilian, S., 1975. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 7, 1–13. doi:10.1016/S0020-7373(75)80002-2

- Mar, J., Lin, H.-T., 2005. A car-following collision prevention control device based on the cascaded fuzzy inference system. *Fuzzy Sets and Systems* 150, 457–473. doi:10.1016/j.fss.2004.09.004
- Mutlu, B., Sezer, E.A., Nefeslioglu, H.A., 2014. Transition of Vagueness Between Layers of Hierarchical Fuzzy Systems, in: *International Conference on Soft Computing*. Brno, pp. 189–194.
- Neogi, A., Mondal, A., Mandal, S., 2011. A Cascaded Fuzzy Inference System for University Non-Teaching Staff Performance Appraisal. *Journal of Information Processing Systems* 7, 595–612.
- Nguyen, V.U., Ashworth, E., 1985. Rock mass classification by fuzzy sets, in: *U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. pp. 937–946.
- Raju, G., Zhou, J., 1993. Adaptive hierarchical fuzzy controller. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 23, 973 – 980. doi:10.1109/21.247882
- Ramirez, E., Mayorga, R., 2007. A cascaded fuzzy inference system for dynamic online portals customization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2, 300–313.
- Rattasiri, W., Halgamuge, S., 2000. Computational complexity of hierarchical fuzzy systems, in: *Fuzzy Information Processing Society, 2000. NAFIPS. 19th International Conference of the North American*. Atlanta, pp. 383–387.
- Rattasiri, W., Halgamuge, S., 2003. Computationally advantageous and stable hierarchical fuzzy systems for active suspension. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 50, 48–61.
- Rattasiri, W., Wickramarachchi, N., Halgamuge, S.K., 2008. Sensitivity-based hierarchical controller architectures for active suspension. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16, 103–112. doi:10.1109/TCST.2007.899739
- Takács, M., 2010. Multilevel fuzzy approach to the risk and disaster management. *Acta Polytechnica Hungarica* 7, 91–102.
- Wang, D., Zeng, X., Keane, J., 2006. A survey of hierarchical fuzzy systems. *International Journal of Computational Conginiton* 4, 18–29.
- Wang, L., 1992. Fuzzy systems are universal approximators, in: *Proceedings of Conference on Fuzzy Systems*. San Diago, pp. 1163–1170.
- Wei, C., Wang, L., 2000. A note on universal approximation by hierarchical fuzzy systems. *Information Science* 123, 241–248.
- Zadeh, L., 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8, 338–353.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Begüm MUTLU
Doğum Yeri : Mersin
Medeni Hali : Bekâr
E-posta : begummutlu@gazi.edu.tr
Adresi : Gökkuşığı Mah. Gökkuşığı Cad. Güneş Apt. 55/14
Balgat/Çankaya/Ankara/Türkiye

Eğitim

Lise : Seyhan Rotary Anadolu Lisesi (Adana/Türkiye)
Lisans : Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (Ankara/Türkiye)
YLisans : Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı (Ankara/Türkiye)
Doktora : -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: İyi (2014 Bahar YDS: 83.75)

İş Deneyimi

Araştırma Görevlisi, Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği (29.09.2014 → Halen)
ARGE Uzmanı, Netcad Yazılım A.Ş. (12.08.2013 → 02.07.2014)

Deneyim Alanları

Bulanık Çıkarsama Sistemleri
Makine Öğrenmesi
Görüntü İşleme

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

B. Mutlu, E. A. Sezer, H. A. Nefeslioglu, Transition of Vagueness Between Layers of Hierarchical Fuzzy Systems, *International Conference on Soft Computing MENDEL*, 189–194, **2014**.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-