İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK ZİNCİR MODEL TEMELLERİ VE HİDROGRAF TAHMİNLERİ

DOKTORA TEZİ

Yavuz Selim GÜÇLÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK ZİNCİR MODEL TEMELLERİ VE HİDROGRAF TAHMİNLERİ

DOKTORA TEZİ

Yavuz Selim GÜÇLÜ
(501102502)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zekai ŞEN

ŞUBAT 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501102502 numaralı Doktora Öğrencisi Yavuz Selim GÜÇLÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "BULANIK ZİNCİR MODEL TEMELLERİ VE HİDROGRAF TAHMİNLERİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları bulunan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Zekai ŞEN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. İsmail YÜCEL Orta Doğu Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Ali UYUMAZ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Ahmet DOĞAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 23 Ocak 2017
Savunma Tarihi : 14 Şubat 2017

Hanımıma ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Tezimin hidrograf uygulamaları aşamasında kullandığım verilerin ölçümünü yapan ve bu verilerin kullanıma hazır hale getirilmesinde yardımı esirgemeyen İBB-AKOM'ne ve bu kurumun meteoroloji ve harita birimi mühendislerine teşekkürü borç bilirim.
Buharlaşma uygulaması kapsamında kullanılan verilerin ölçümünü gerçekleştiren Suudi Arabistan Meteoroloji ve Çevre Başkanlığına da müteşekkirim.
Tez çalışmalarımın bir kısmı için yurtdışında araştırma yapmama imkan sağlayan İTÜ, TÜBİTAK ve Kral Abdülaziz Üniversitesine de ayrıca teşekkür ederim.

Ocak 2017

Yavuz Selim GÜÇLÜ
(İnşaat Mühendisi - Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Giriş 1
1.2 Tezin Maksadı 4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **9**
2.1 Ölçüm Cihazları Öncesi Yaklaşımlar 9
2.2 Ölçüm Cihazları Sonrası Yaklaşımlar 9
2.3 İstatistik Yaklaşımları 10
2.4 Birim Hidrograf Yaklaşımları ve Kayıp Hesap Yöntemleri 10
2.5 Taşkın Model Çalışmaları 12
2.6 Erken Uyarı Sistemleri 14
3. YÖNTEM **17**
3.1 Mantık 17
3.2 Düz (Klasik) Mantık 19
3.3 Bulanık Mantık (BM) 21
3.3.1 Sugeno BÇY 23
3.3.2 Mamdani BÇY 25
3.3.3 ANFIS (The Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) 27
3.4 Bulanık Zincir Modeli (BZM) 27
3.5 Boyutsuz Birim Hidrograf (BBH) 36
3.6 SCS-Snyder 39
3.6.1 Snyder yapay hidrograf yöntemi 39
3.6.2 SCS kayıp yöntemi 41
4. UYGULAMA **45**
4.1 Çalışma Alanı ve Veriler 45
4.1 Modellerin Uygulama ve Kıyaslaması 47
5. EK BZM UYGULAMASI **63**
5.1 Giriş 63
5.2 Bölge Tanıtımı ve Ölçümler 65
5.3 Yöntemler 66
5.3.1 Penman-Monteith denklemi 66
5.3.2 Bulanık modeller 68
5.3.2.1 Mevcut bulanık model 68
5.3.2.2 Bölgesel bulanık model (BBM) 69

5.3.2.3 Bölgesel bulanık zincir modeli (BBZM)..... 70
5.4 Model Uygulamaları ve Kıyaslamaları 73
6. SONUÇ 81
KAYNAKLAR..... 83
EKLER 89
ÖZGEÇMİŞ..... 111

KISALTMALAR

AKOM : Afet Koordinasyon Merkezi
AMC : Antecedent Moisture Condition
ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANN : Artificial Neural Network
AP : Arabian Peninsula
BBH : Boyutsuz Birim Hidrograf
BBM : Bölgesel Bulanık Model
BBZM : Bölgesel Bulanık Zincir Modeli
BH : Birim Hidrograf
BÇY : Bulanık Çıkarım Yapısı
BM : Bulanık Mantık veya Bulanık Model
BT : Buharlaşma+Terleme
BZM : Bulanık Zincir Modeli
CFM : Classical Fuzzy Model
CN : Curve Number
CRED : The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DSİ : Devlet Su İşleri
DUH : Dimensionless Unit Hydrograph
EN : Eğri Numarası
ET : Evapotranspiration
FAO : Food and Agriculture Organization
FCM : Fuzzy Chain Model
FIS : Fuzzy Inference System
FM : Fuzzy Model
FSM : Fuzzy System Model
GA : Genetik Algoritma
GAP : Güney-Doğu Anadolu Projesi
GI : Güneş Işınımı
GS : Güneşlenme Süresi
HEC : Hydrologic Engineering Center
İBB : İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KSA : Kingdom of Saudi Arabia
MAE : Mean Absolute Error
MF : Membership Function
NRCS : Natural Resources Conservation Service
OMH : Ortalama Mutlak Hata
PM : Penman-Monteith
RFM : Regional Fuzzy Model
RFCM : Regional Fuzzy Chain Model
SAC-SMA : Sacramento Soil Moisture Accounting
SAK : Suudi Arabistan Krallığı
SCS : Soil Conservation Service

SYM : Sayısal Yükselti Modeli
TEFER : Turkish Earthquake and Flood Emergency Research
TEUS : Taşkın Erken Uyarı Sistemi
TTB : Terleme Tutma Buharlaşma
USDA : United States Department of Agriculture
WMS : Watershed Modelling System

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : 1998 – 2016 arasında Türkiye'deki taşkınlar ve zararları. **5**
Çizelge 2.1 : Yağıştan kayıp hesaplama yöntemleri. **12**
Çizelge 3.1 : SAC-SMA model etkenleri. **30**
Çizelge 3.2 : BBH oranları. **38**
Çizelge 3.3 : Zemin türlerine göre eğri numaraları. **42**
Çizelge 3.4 : Önceki yağışlara göre SCS toprak nemi sınıflandırması (mm). **42**
Çizelge 3.5 : AMC II koşuluna karşılık AMC I ve III koşulunda EN değerleri. **43**
Çizelge 4.1 : 23 olaya ait tüm ölçümler. **47**
Çizelge 4.2 : BZM I için eğitim girdi ve çıktıları. **49**
Çizelge 4.3 : BZM I için deneme girdi ve çıktıları. **50**
Çizelge 4.4 : Gözlenmiş tepe debi değerleri ve modellerin tahmin sonuçları (m^3/s). **51**
Çizelge 4.5 : Büyük değerli 4. olay için modellerin hataları (m^3/s) (N=1). **52**
Çizelge 4.6 : Diğer olaylar için modellerin hataları (m^3/s) (N=7). **52**
Çizelge 5.1 : Ölçüm noktalarının konum bilgileri. **65**
Çizelge 5.2 : Modellerin PM denklem sonuçlarına göre hataları. **79**
Çizelge 5.3 : Modellerin PM denklem sonuçlarına göre % hataları. **79**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Mantık cümlesi. **17**
Şekil 3.2 : Düz mantık çerçevesinde bir girdi ve bir çıktının alt kümelere ayrılması. **20**
Şekil 3.3 : Düz mantık ile sabit değer çıktılı model sonucu. **20**
Şekil 3.4 : Düz mantık ile denklem çıktılı model sonucu. **21**
Şekil 3.5 : BM çerçevesinde bir değişkenin üçgen alt kümelere ayrılması. **22**
Şekil 3.6 : BM çerçevesinde bir değişkenin yamuk alt kümelere ayrılması. **22**
Şekil 3.7 : BM çerçevesinde bir değişkenin eğrisel alt kümelere ayrılması. **23**
Şekil 3.8 : Sugeno BÇY çeşitleri. **24**
Şekil 3.9 : Sugeno BÇY ile denklem çıktılı model sonucu. **25**
Şekil 3.10 : Mamdani BÇY çeşitleri. **26**
Şekil 3.11 : Bir girdi ve bir çıktılı ANFIS mimarisi. **27**
Şekil 3.12 : Resmedilmiş Kavramsal SAC-SMA Modeli. **28**
Şekil 3.13 : SAC-SMA modelinde Süre-TTB ilişkisi. **29**
Şekil 3.14 : SAC-SMA Modelinde etkenlerin görev dağılım resmi. **31**
Şekil 3.15 : BZM I. **33**
Şekil 3.16 : BZM II. **33**
Şekil 3.17 : BM I. **33**
Şekil 3.18 : BM II. **34**
Şekil 3.19 : Hidrografın kısımları ve üçgen hidrograf. **37**
Şekil 3.20 : Üçgen Hidrograf üzerinde t_{pr}, t_{pe} ve t_d katsayılarının tanımlanması. **38**
Şekil 3.21 : BBH. **39**
Şekil 3.22 : Snyder yapay hidrografı genişlikleri. **40**
Şekil 3.23 : SCS eğrileri. **44**
Şekil 4.1 : Ayamama havzası ve konumu. **46**
Şekil 4.2 : Ayamama havzası SYM verisi. **48**
Şekil 4.3 : Modellerin mükemmeliyet doğrusuna göre konumu. **53**
Şekil 4.4 : Birinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **54**
Şekil 4.5 : İkinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **54**
Şekil 4.6 : Üçüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **55**
Şekil 4.7 : Dördüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **55**
Şekil 4.8 : Beşinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **56**
Şekil 4.9 : Altıncı olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **56**
Şekil 4.10 : Yedinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **57**

Şekil 4.11 : Sekizinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı. **57**
Şekil 4.12 : Birinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **59**
Şekil 4.13 : İkinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **59**
Şekil 4.14 : Üçüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **60**
Şekil 4.15 : Dördüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **60**
Şekil 4.16 : Beşinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **61**
Şekil 4.17 : Altıncı olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **61**
Şekil 4.18 : Yedinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **62**
Şekil 4.19 : Sekizinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı. **62**
Şekil 5.1 : SAK Meteoroloji ve Çevre Başkanlığı'na bağlı 6 adet meteoroloji ölçüm noktası ve çember içine alınmış üçlü öbekler. **66**
Şekil 5.2 : Mevcut bulanık model şeması. **69**
Şekil 5.3 : Bölgesel bulanık model (BBM) şeması. **69**
Şekil 5.4 : Örnek dört kural ile iki girdi (x, y)-bir denklem çıktı (z) Sugeno modeli. **70**
Şekil 5.5 : Bölgesel bulanık zincir model (BBZM) şeması. **71**
Şekil 5.6 : Örnek üç kural ile dört girdi (x, y, z, q)-bir denklem çıktı (p) Sugeno modeli **72**
Şekil 5.7 : Dahran-Dammam BT değerleri karşılaştırması. **74**
Şekil 5.8 : Dahran-Ahsa BT değerleri karşılaştırması. **74**
Şekil 5.9 : H. Muşayt-Bişa BT değerleri karşılaştırması. **75**
Şekil 5.10 : H. Muşayt-Abha BT değerleri karşılaştırması **75**
Şekil 5.11 : Dahran istasyonu için mevcut BM ile BT tahminleri. **76**
Şekil 5.12 : Hamis Muşayt istasyonu için mevcut BM ile BT tahminleri. **76**
Şekil 5.13 : Dahran istasyonu için BBM ile BT tahminleri. **77**
Şekil 5.14 : Hamis Muşayt istasyonu için BBM ile BT tahminleri. **77**
Şekil 5.15 : Dahran istasyonu için BBZM ile BT tahminleri. **78**
Şekil 5.16 : Hamis Muşayt istasyonu için BBZM ile BT tahminleri. **78**

BULANIK ZİNCİR MODEL TEMELLERİ VE HİDROGRAF TAHMİNLERİ

ÖZET

Su, insan ve diğer canlıların hayatlarını sürdürmeleri için ihtiyaç duydukları hava, toprak ve ateş (enerji) gibi birincil maddelerdendir. Bu sebepledir ki, tarihte kurulmuş şehirler ve medeniyetler çoğunlukla su kaynaklarını merkeze almak suretiyle gelişmişlerdir. Ancak tarihte ve günümüzde canlılar için son derece gerekli suyun faydalı yönlerinin yanı sıra zararlı yönleri de vardır ki, bunların en önemlisi özellikle şiddetli yağışlar sonrası ortaya çıkan taşkın zararları ve yağışların az olması durumunda ortaya çıkan kurak süreler ve canlılar üzerindeki etkileridir.

Taşkın (sel), özellikle şiddetli yağış sonrasında akarsuyun olağan şartlar altında akışını sürdürdüğü yatağından taşmak suretiyle akışına devam ettiği olaya denir. Su basması ise taşkınla birlikte meskûn bölgenin sular altında kalması olayıdır. Bu tür afet durumlarından korunmanın birinci kuralı ilgili havzaya ait mecranın uygun bir şekilde tasarlanıp inşa edilmesidir. Diğer bir kural ise ortaya çıkacak yağışa göre gerçek zamanlı ve en doğru tahminleri ortaya koyabilmektir. Bu tez çalışmasında ikinci kural için adımlar atılmıştır ve en doğru hidrograf tahmini adına literatüre önemli katkılar yapılmıştır.

Hidrolojinin önemli konularından tepe (pik) debi ve hidrograf tahmini, şehirleşme ile birlikte daha önemli bir hal almıştır. Mevcut modeller özellikle de orta ve büyük boyuttaki havzalar için iyi sonuçlar verirken küçük havzalar için tahminler ölçümlerle pek örtüşmemektedir. Bu çalışmada İstanbul'un Avrupa yakasında bulunan ve Ayamama ismiyle bilinen küçük bir havza üzerinde 2013 ve 2014 arası iki yıllık ölçümler yapılarak üretilen dört farklı modelin ayarlaması yapılmış ve tahminler üretilmiştir.

Hidrograf tahmini gerçek girdilerinin fazlalığı sebebiyle tahmin edilmesi son derece zor ve karmaşık bir meseledir. Karmaşık olayların modellenmesi için önemli bir araç konumundaki Bulanık Mantık günümüzde artık yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu düşünceyle tez çalışması için bulanık zincir modeli (Mamdani-ANFIS) önerilerek iyi bilinen ve yaygın kullanılan bir modelle (SCS-Snyder) kıyaslanmıştır.

Bulanık zincir modeli Mamdani ve Sugeno (ANFIS) isimli iki halkadan meydana getirilmiştir. Birinci halka da üç girdi ile toprak nemi çıktısı ikinci halkada da dört girdi ile tepe debi çıktısı elde edilmiştir. Mamdani bulanık çıkarım yapısında sözellik tam anlamıyla hâkimiyet kurduğundan modelin girdi ve çıktısına ait herhangi bir veri takımı bulunmasa da tecrübeye dayalı cümleler ve sözler sayısallaştırılabilmektedir, çünkü girdiler gibi çıktılar da bulanıklaştırılmaktadır. Bulanık zincir modelinin en önemli özelliği birinci aşamada toprak nemini tahmin etmesidir, ancak neme dair veri takımı mevcut değildir. Dolayısıyla, toprak nemi tahmin edilirken ilgili girdilerle Mamdani çıkarım yapısı kullanılmıştır. Sugeno bulanık çıkarım yapısında ise girdiler her ne kadar bulanıklaştırılsa bile çıktı için bir takım kesin sayısal ifadelerin belirlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu çıkarım yapısında hem girdi hem de çıktı

değerleri ölçülmelidir. Bu bilgiler düşünülerek, önerilen bulanık zincir modelin ikinci halkasında ANFIS (Sugeno) yazılımı kullanılmıştır. Ek olarak, aynı veriler kullanılarak tezde ikinci bir bulanık zincir modeline de yer verilmiştir.

Bulanık zincir modelinin eğitilip çalıştırılması için fazladan üç farklı girdiye daha ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum her ne kadar hassas sonuçlar verse de, modelin başka havzalarda kullanımını zorlaştırmaktadır. Bunun için daha az veriyle çalışmaya imkan tanıyan ve tek aşamalı bulanık modeller de önerilerek tezde sunulmuştur.

Ortalama mutlak hata sonuçlarına göre bulanık zincir modeli en iyi uç (pik) debi tahminlerini, bulanık modeller yaklaşık tahminleri ve SCS-Snyder de çoğunlukla ölçümden uzak tahminleri üretmişlerdir. Bu aşamadan sonra hidrograflar çizdirilerek görsel kıyaslamalar da yapılmıştır. Hidrograflar çizdirilirken SCS tarafından önerilmiş boyutsuz birim hidrograf koordinatlarından faydalanılmıştır.

Bu tez çalışmasında BZM temellerinin kullanılabilirliği farklı bir uygulama ile ayrıca gösterilmiştir. Arap yarımadasının en büyük ülkesi Suudi Arabistan'da bulunan bazı meteorolojik ölçüm noktaları üçerli öbekler halinde dikkate alınarak Buharlaşma+Terleme (BT) tahmini yapılacaktır.

BT zeminin toprak ve bitki ile değişik oranlarda örtülmesi durumunda suyun sıvı halden gaz haline geçişine denmektedir. İki olayı birden içeren BT birçok araştırmacı tarafından bir takım denklemler önerilerek hesaplanmıştır. Ancak, birçok girdiyi içeren Penman-Monteith (PM) yöntemi hem kurak hem de nemli bölgeler için en hassas yöntem olduğu ortaya koyulmuştur. PM hassas sonuç üretmesi sebebiyle birçok araştırmacının BT hesaplaması için kullandığı vazgeçilmez bir denklemdir. Günümüzde PM denklemi yoğun bir şekilde kullanılırken yapay zekâ yöntemleri de kullanarak BT tahmini konusunda yol alınmaktadır. Farklı yapay zekâ yöntemleri bulanık mantık, yapay sinir ağı, genetik algoritma ve bunların türevleri kullanılmak suretiyle farklı girdi türleri ile BT modelleri kurulmuş ve tahminler üretilmiştir. Gerçekleştirilen tüm çalışmalar ilgili ölçüm noktasının kendi verisi dikkate alınarak o nokta için BT tahmini ve hesabı yapılmıştır.

Bu çalışmada ilk defa iki noktanın verilerinden bu iki noktaya yakın olan üçüncü bir ölçüm noktası için BT tahmini yapılacaktır. Bu maksat için tezin uç debi tahmininde önerilen BZM'ne benzer bir zincirleme akış diyagramı geliştirilmiştir. Buna ek, iki noktaya ait PM ile hesaplanan BT'ler ile üçüncü noktann BT'sini tahmin etmek için bulanık model geliştirilecektir. BT hesabı için PM denklemi kullanılırken önerilen tahmin modelleri için de Sugeno bulanık mantık ve BZM ilkelerinden faydalanılacaktır. Sonuçta, BT tahmini için biri bulanık model biri de BZM toplam iki model üretilmiştir ve birbiri ile kıyaslanmıştır.

FUZZY CHAIN MODEL FUNDAMENTALS AND HYDROGRAPH ESTIMATIONS

SUMMARY

In this study, four different fuzzy models are suggested; the first two are fuzzy chain models (FCM) that appear the first time in this thesis and the next two are fuzzy system models (FSM). The comparisons of these models with the well-known classical one indicate better validity and reliability of the fuzzy models for peak discharge estimations. The application is presented for a small basin, Ayamama basin, within Istanbul City, Turkey.

This basin lies on the European side of Istanbul and its basin area is 40.1 km^2. Its upstream is forest area, whereas the downstream portion is covered by urbanization areas. For potential flood model applications, small sub-basins are chosen at the upper part of the Ayamama Basin. Since the beginning of 2013 up to the present, Istanbul Metropolitan Municipality Disaster Coordination Center, (IBB-AKOM, in Turkish) has worked on flood forecasting for the basin, but with the use of classical methods. Available reliable data are taken into account including 23 records over two years (2013-2014), 15 of which are used to train the models and the remaining 8 events for testing.

In this thesis, four fuzzy system models are proposed and their comparisons are given with frequently used classical SCS-Snyder method.

In the literature, there are many methods for hydrograph production or peak discharge estimation. One of the most important hydrograph methods, Snyder is combined with SCS loss method methodology within Flood Hydrograph Package, HEC-1 (Hydrologic Engineering Center) software that runs under Watershed Modeling System (WMS) software.

The Snyder method has two geomorphologic parameters for hydrograph description; one for time to peak discharge from the center of hyetograph, which is referred as the peak time (t_p) and the other for the peak discharge estimation itself. These parameters are dependent on the drainage basin geomorphologic features such as the drainage area, main stream length, slope and the distance between the centroid projection on the main stream and the outlet point. In this study, they are calculated using the observed rainfall-runoff records.

Excess rainfall is calculated according to SCS loss method. For this purpose, the SCS Curve Number and initial abstraction rate expressing the losses are calibrated. After the peak discharge and delay time calculations, the hydrograph is generated from the dimensionless unit hydrograph values.

There are always uncertainties in any drainage basin hydrograph and its peak discharge calculations, but the fuzzy logic inference system can alleviate the uncertainties through fuzzification procedure. Fuzzy logic plays the major role in approximate reasoning through computers based on the fuzzy logic rules. There are

several fuzzy inference systems (FIS), with slightly different outputs. In Mamdani FIS both input and output variables are in the form of fuzzy membership functions (MF), where linguistically expressions in the form of rule base are dominant. However, in the Sugeno FIS, although input is in the form of fuzzy MFs, but the output is crisp either as a constant or a first order linear function. The Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) uses mainly Sugeno FIS and gets support from the artificial neural network (ANN) in training phase. It allows estimation in the best possible way providing compliance between input and output variables. The sum of the error should be equal to zero or very close to zero and the sum of the square error should be the smallest possible. ANFIS trains the data by taking into account these two points and prepares convenient solutions.

FCMs include Mamdani and Sugeno FISs (ANFIS) in the form of two chain rings. Mamdani approach is used as the first part of the chain with the output soil moisture data. Both input and output data should be known for the execution of FCM steps. Additionally, FMs include only Sugeno FIS.

FCM and FM are used for peak discharge estimation by taking into consideration the following variables; Average temperature, T (C^o), during period between previous and present precipitation events, Interval duration, D_B, (hour), between previous and present precipitation events, Total average rainfall, R_P, (mm), during previous precipitation event, Soil moisture, S, (%), as the output whose inputs are T, D_B, and R_P in Mamdani FIS, Total rainfall in Olimpiyat, R_O, (mm), during present precipitation event at the station, Total rainfall in 212 AVM, R_{212}, (mm), during present precipitation event at the station, Rainfall duration, R_D, (minute), of present precipitation event, Peak discharge, Q_P, (m^3/s), as the output whose inputs are all the variables mentioned in the previous items for the ANFIS software.

FCMs have been formed from two chain rings as Mamdani and Sugeno (ANFIS). Although lack of data set for both input and output variables in the Mamdani FIS, meaningful words and expressions related to the concerned event can be quantifiable by fuzzy sets in the system. In the same manner, if only the output data set is missing, then they can be quantified using fuzzification and corresponding fuzzy sets. Hence, in FCMs, Mamdani approach is used for the soil moisture as an output and three data sets as inputs. Consequently, the inputs in Mamdani FIS are used in the first chain model to obtain the soil moisture data as a percentage. It is necessary to determine any output as crisp numerical expressions in the Sugeno FIS, even if the inputs are fuzzy. Hence, both input and output data can be measured in this FIS. Besides, all data sets being introduced into the models are measured in order to use ANFIS software design according to Sugeno. Subsequently, ANFIS software is used for second chain model. On the other hand, soil moisture account is not taken into consideration for other fuzzy models, FM I and FM II, with one phase and they are executed by the ANFIS software, because the remaining inputs and output are already obtained.

When precipitation events with the same characteristics occur at different times, the classical models yield constant peak discharge, but FCMs estimate peak discharge differently, because they take into account the soil moisture variability. The reason for production of FCM II working with average rainfall is to demonstrate how the results change compared to FCM I. Contributions of each rainfall station are considered separately through the ANFIS software and the results are more accurate.

Soil moisture percentages are calculated according to the average rainfall via Thiessen method.

FCMs need three extra data sets (T, D_B, and R_P). The first chain Mamdani model is not considered, because usually detailed measurements are not available. Estimates are obtained by decreasing the data sets and entering the remaining data sets to ANFIS software. In this case, FM I and FM II peak discharge estimations appear as a constant because the soil moisture is not taken into consideration.

In this thesis, the simplest forms of the hydrograph are obtained from the triangular flood hydrograph and the dimensionless unit hydrograph. For the construction of triangular hydrograph three time instances are important, namely, the precipitation (t_{pr}), the peak flow (t_{pe}) and recession limb (t_d) durations. While peak discharge is estimated by FCM and FM, the duration of rainfall and its amount are obtained by meteorological predictions, the remaining two durations (t_{pe} and t_d) should be determined for hydrograph completion. During the training stage, t_{pe} is related to t_{pr}, and t_d to t_{pe} through two constants, c_{pe} and c_d, as follows.

$$t_{pe} = t_{pr} + c_{pe} \tag{1}$$

$$t_d = t_{pe} + c_d \tag{2}$$

On the other hand, dimensionless unit hydrograph (DUH) developed by United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) provides a basis for generation of the hydrograph provided that the peak discharge and its time of occurrence are known. The following points are helpful for rational and logical rule deductions.

The applications of the classical model and the proposed ones as two FMs and two FCMs are presented for the upper part of the Ayamama Basin, Istanbul. As mentioned before, 15 of the measured 23 events are used for training stage for parameter adjustment and model calibration, whereas the remaining 8 events are for testing (cross-validation).

SCS-Curve Number (SCS-CN) and initial abstraction (I_A) for SCS loss method, lag time to peak (t_p) and peak discharge coefficient (c_p) for the Snyder; totally 4 parameters are adjusted for the classical model through HEC-1 software coupled with the Watershed Modeling System (WMS) software.

FCM I and FCM II have two phases. The soil moisture value must be digitized prior to estimation with ANFIS. Therefore, moisture values for each event are determined as percentages by Mamdani FIS. Relationships between three inputs (T, D_B, and R_P) and soil moisture have been considered rationally and logically for determination of the rules.

For the first chain model, Soil Moisture values are determined with logical relationship considerations. Four inputs versus peak discharge are trained by ANFIS software in the FCM I and three inputs versus peak discharge in FCM II. Finally, FCMs are ready to estimate and then forecasts have been achieved as already.

The estimation errors are calculated according to the well-known mean absolute error, (MAE).

It is obvious that FCM I are capable of producing peak discharge estimation better than the others. Another way of comparison among the three methodologies is the scatter diagram, which shows the scatter of the measurement values versus model predictions. The significance of this graph is that 1:1 (45^o) straight-line is the indicator of the perfect model estimations. The closer are the model scatter points to this straight-line the better is the model. The scatter of all the model results indicates clearly that the FCM I points have the closest positions to the 1:1 straight-line, and hence, FCM I model outperforms the others.

The triangular flood hydrographs for 8 events are obtained with FCMs and FMs. For each event, observed and estimated hydrographs from five different models are compared visually on the same graph. In this way, a total of 8 cases are presented in Figures for the case of triangular hydrograph approach. FCM I hydrographs are closer to observation hydrograph.

Another figure is for the dimensionless unit hydrograph based calculations, which shows the hydrographs in a better curvature form and again the FCM I results are far better than other methodology. The proposed FCM I methodology is useful especially in cases of soil moisture component incorporation.

The availability of FCM bases is also shown with a different application. Some meteorological stations' measurements in Saudi Arabia the largest country of Arabian Peninsula will be used for Evapotranspiration (ET) estimations.

A set equations are proposed by many researchers to calculate ET. ET calculation models use meteorological measurements as input variables, but others consider several inputs and produce ET values. Penman-Monteith (PM) method is the most sensitive one for all regions with many input parameters. Recently, artificial intelligence (AI) techniques are entering into the scene of ET estimation. Among the AI methods are fuzzy logic (FL), artificial neural networks (ANN), genetic algorithms (GA) and their derivatives with different input types for ET estimation.

In this study, some stations in the Kingdom of Saudi Arabia (KSA) are considered as two groups in three parts. Initially, ET is estimated by using two nearby stations data set for the third station in the same area. For this purpose, a regional chain flow chart is developed similar to FCM. The third station ET estimations are obtained by the suggested regional fuzzy model (RFM) based on the two stations' ET values that are calculated by PM equation, which produces the most accurate results of the ET estimation. Sugeno FL system inference principles are the bases of the proposed models. RFM and regional fuzzy chain model (RFCM) model results are compared with the PM calculations and they yield almost the same result within practically acceptable limits of error.

From Saudi Presidency of Meteorology and Environment (PME), 6 meteorology stations are considered in this study. Each station has daily records, which are used for estimations. Herein, station groups are chosen at two different elevations, namely, at the mountainous and sea levels for testing the proposed model reliability. Aseer region Bisha, Abha and Khamis Mushait stations are on the mountainous region, whereas Ad-Dhahran, Al-Dammam and Al-Ahsaa stations in Ash-Sharqia region are approximately at the sea level. In this study, the data with the shortest length is considered for each part such as the 14-year (1999-2012) data for Ash-Sharqiya region and 35-year (1978-2012) for the Aseer region.

The proposed methodology of this paper has three steps. In the first stage, PM (FAO-56) equation is used to calculate ET values. The next stage is practiced by many researchers and the classical model is based on the FL principles for ET estimations with four data types. Finally, in case of missing data at any station, RFM and RFCM approaches are proposed in the first stage for ET estimation by using the data from other stations in the same region.

In this study, two alternative fuzzy models are proposed using ANFIS software, and hence, ET estimations are obtained. The classical fuzzy model (CFM) with four-input-one-output are explained and its application is performed for the data at hand.

So far, researchers have estimated ET for any station by benefiting from its own data with the model based on fuzzy logic (FL) principles. This model is extremely useful and produces accurate results, if there is complete data set for the station. However, FL model is also for the cases where there is no or lack of data and thus uncertainty.

Herein, two-input-one-output Sugeno model called RFM is set up to estimate ET because the third station's ET values are estimated with the other two stations' ET values. For RFCM, three stations are taken into consideration in the same region similar to RFM but RFCM has two steps. In order to estimate the third station ET values, first of all (first ring of chain), two-input-one-output Sugeno models are established and each parameter is obtained. For the second ring of RFCM, four-input-one-output Sugeno model is set up and the model is retrained.

Data from two different regions of the KSA are used for PM and ET calculations by means of three FL inference system models two of which are suggested in this thesis.

Ash-Sharqia region in the western part of the KSA has rather flat topography and the measurements from the 1999-2012 period measurements are used in the model development. Proposed ANFIS system modeling based models is used for calibration (training) data from 1999-2007 period for 9 years and the validation (testing) data from 2008-2012 period for 5 years. From the three meteorology stations, Ad-Dhahran station is selected for estimations. In Al-Aseer mountainous region in the southern KSA, the measurements are used from 1978-2012 periods. ANFIS model training and testing periods are 1978-1998 and 1999-2012 periods, respectively. In this region, Khamis Mushait meteorology station is selected for estimations.

As a result, CFM approach uses the station data, and hence, fewer errors are expected at Ad-Dhahran and Khamis Mushait locations with 5% and 4% errors, respectively. If at any station in a region there is not enough data then from the two adjacent stations, the ET estimation can be achieved at the third station. RFM is comparatively simpler and its use is shown for the estimation of ET values at a missing data station from the two nearby station ET values. Practically acceptable errors for Ad-Dhahran and Khamis Mushait stations are 9.5% and 7.4%, respectively. Furthermore, by means of the RFCM estimations are improved by means of a chain wise model application. As a result, errors at the two locations are obtained as 9% and 7%, respectively. It is conclusive that RFCM results in smaller error percentages in the ET estimations.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Su, insan ve diğer canlıların hayatlarını sürdürmeleri için ihtiyaç duydukları hava, toprak ve ateş (enerji) gibi birincil maddelerdendir. Bu sebeple tarihte kurulmuş şehir ve medeniyetler çoğunlukla su kaynaklarını merkeze almak suretiyle gelişerek içme ve sulama suyu temini gibi temel ihtiyaçlarını gidermeye çalışmışlardır. Ancak tarihte ve günümüzde canlılar için son derece gerekli suyun faydalı yönlerinin yanı sıra zararlı yönleri de vardır ki bunların en önemli ikisi özellikle şiddetli yağışlar sonrası ortaya çıkan taşkın ve yağışların azlığını gösteren kuraklık zararlarıdır.

Taşkın (sel), özellikle şiddetli yağış ve/ya kar erimesi sonrasında akarsuyun olağan şartlar altında akışını sürdürdüğü yatağından taşmak suretiyle akışına devam ettiği olaya denir. Su basması taşkınla birlikte meskûn bölgenin sular altında kalması olayıdır. Taşkınlar aşırı yağış ve/ya kar erimlerinin yanında buz yığılması, buzul kırılması, toprak kayması, baraj yıkılması ve deniz kabarması gibi farklı sebeplerden ortaya çıkabilirler. Ancak yapılan ilmi çalışmalarda çoğunlukla yağış türevleri dikkate alınmaktadır. İlgili çalışmalarda yağış şiddetinin yanında havzaların fiziki özellikleri; havzanın büyüklüğü, biçimi, eğimi, zemin cinsi, bitki örtüsü ve zemin nemi gibi özellikler taşkını tetikleyen etmenler olarak gösterilmişlerdir.

Taşkınlar, depremler gibi doğal afetlerden sayılmaktadır. Ancak bu afetlerin zarar boyutlarını büyüten en önemli etken maalesef insan faaliyetleri yani yapay etkiler ve kural tanımazlıktır. Ülkemizde deprem için söylenen önemli bir cümle vardır ki o da "deprem öldürmez bina öldürür" cümlesidir. Aynı mantıkla taşkın felaketi için de benzer şeyi düşünebiliriz. Dolayısıyla taşkın tehlikesi bulunan sahalarda önceden tedbir alınmaksızın süregelen denetimsiz şehirleşme faaliyetleri dünyanın her köşesinde meydana geldiği gibi ülkemizde de taşkının en önemli sebeplerinden biridir. Sonuçta dünyanın birçok bölgesinde aşırı yağış ve kar erimeleri sebebiyle gelişen taşkınlar günlük hayatı, mali ve ticari faaliyetleri olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle, son yıllarda sık tekrar eden taşkınların yol açtığı can ve

mal kayıpları giderek önemli boyutlara ulaşmıştır. Dünyada taşkınlar sebebiyle ortaya çıkan can ve mal kayıpları deprem felaketinden sonraki kayıplar göz önüne alındığında bile en fazladır (Şen, 2009). Ülkemizde taşkınların meydana getirdiği zararın miktarı depremlerin verdiği zarardan sonra ikinci sıradadır (Atalay, 2008). Dünyada taşkından korunmak adına taşkın tahmin yöntemleri 19. Yüzyılın ortalarından beri geliştirilmektedir. Taşkın tahmin çalışmaları yeni ve çağdaş yöntemler kullanılarak taşkın erken uyarı sistemleri (TEUS) başlığı altında gelişimini sürdürmektedir.

Gerçek bir olayın kavranılması insan bilgisinin yetersizliği sebebiyle tam anlamı ile mümkün olamadığından, insan, düşünce yapısında ve zihninde bu gibi olayları yaklaşık canlandırarak yorumlarda bulunur. Bilgisayarlardan farklı bir şekilde insanın yaklaşık düşünme ve belirsizlik içeren veri ve bilgi ile işlem yapabilme yeteneği vardır (Şen, 2001). Taşkın olayı çok fazla belirsizlik ve karmaşıklığı içinde bulunduran doğal bir olaydır. Dolayısıyla taşkının tahmini ve buna bağlı TEUS'un modellenmesi son derece karmaşık ve zordur. Bulanık mantık ilkeleri kullanılarak bu zorluğun üstesinden gelmek mümkündür.

Şen (2009) yazdığı eserde TEUS modellenirken dikkat edilmesi gereken hususlara "Taşkın Öngörü ve Erken Uyarı Sistemleri" başlığı altında yer vermiştir. Dikkat çektiği ilk nokta "sözel bilgilerin uzman görüş şeklinde göz önünde tutulması" hususudur. İşte bu sözel bilgiler her türlü denklem ve sayısal bilgiden daha önemlidir. Ancak, eski hidrograf tahmin yöntemleri kullanılmak suretiyle TEUS modellendiğinde son derece önemli bir takım sözel bilgiler denklemlere dâhil edilememektedir. Hem bu sözel bilgileri TEUS modellerinde kullanmak için hem de taşkın tahminindeki zorlukları yenmek için bulanık mantık ilkeleri son derece uygundur.

Taşkın tahmini, meteorolojik, hidrolojik ve hidrolik konuları esas alınarak üç aşamadan sonra belirlenebilmekte ve ortaya çıkan sonuca göre de ilgili ikazlar yapılmaktadır. İlk aşamada, ilgili havzaya düşecek yağış miktarı doğru bir şekilde belirlenmelidir. Şimdilerde, taşkın gözlemleri yapılan alanlara yağış halinde yaklaşan bulutlardan düşebilecek su miktarı meteoroloji radarları ile tespit edilerek en fazla bir saat öncesinden hidrolojik hesapları yapmak mümkündür. Bu hesaplar ikinci aşamadır ve en doğru uç debi veya hidrograf tahmin yöntemini ayarlayıp kullanmak gerekmektedir. Hesabı daha kolay üçüncü aşamada, havza mecrasının en elverişsiz

en kesiti için debi taşıma yeteneği (kapasitesi) hesaplanmaktadır. Eğer hidrolojik tahminlerin sonucu en kesitin taşıma yeteneğinden fazla ise taşkın uyarısı yapılmalıdır. Bu tez çalışması taşkın tahmininin ikinci aşaması için hidrograf tahmini yaparak güvenilir sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir.

Derelerin su seviyesi şiddetli yağışların başlamasından bir kaç saat sonra veya daha kısa bir süre içinde beklenenden çok daha hızlı bir şekilde yükselebilir (ani taşkın). Özellikle ani taşkınlarda dere ve nehirlerin aşağı kısımlarındaki halkın uyarılması ve bu bölgelerin boşatılması için en fazla bir saatlik bir süre vardır. Bu yüzden ilgili bölgelere yerleşmiş insanların, muhtemel bir sel tehlikesi karşısında bölgeyi en geç bir saat içinde boşaltabilecek şekilde hazırlanmaları gerekir. Bu sebep ile sel ihbarları üç aşamalı olarak yapılır (Kadıoğlu, 2008).

1) Tehlikeli hava şartlarından birini üretmeye uygun hava durumlarında tehlikenin adı fırtına, taşkın, kasırga gibi verilerek büyük bir alan için taşkın gözetlemesinin yapıldığı halka yazılı, görüntülü ve sözlü basın-yayın aracılığı ile belirli aralıklarla duyurulmalıdır,

2) Böylece 1 ila 7 saat arasında taşkının kuvvetle muhtemel meydana geleceği hakkında bilgilendirilmiş insanlar artık gece uykularında gafil avlanmazlar. Taşkın gözetimine alınmış alan içerisinde sel tehlikesine maruz insanların bulundukları yerden daha güvenli bir yere kısa sürede kaçabilmek için zamanları vardır,

3) Taşkın uyarısına hazır bir şekilde beklendiği zaman taşkın uyarısı yapıldığında dere yatakları gibi sel tehlikesine maruz bölgeler anında terk edilebilir. Taşkın gözetleme alanına dağılmış gönüllü ve resmi görevli gözcüler bulundukları mevkide tehlikenin başlangıcını tespit ettiği an "Fırtına Tahmin Merkezi" tarafından sadece o nehir ve dere yatağının aşağı kısımlarında yaşayanlar için görüntülü ve sözlü basın-yayın aracılığı ile sürekli "Ani Taşkın Uyarısı" yapılır.

Gelişmiş ülkelerde halk çoğunlukla meteorolojik taşkın uyarılarında telaşa kapılma yerine taşkın doğrulanana kadar tedbir almada gereğinden daha yavaş davrandığı gözlenmiştir. Son zamanlarda ülkemizde en küçük ihtimalde bile "yağış" hatta "aşırı yağış"lar bekliyoruz şeklinde yapılan tahminler ve uyarılar hava tahmincisini kendisini emniyete alma endişesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun sonucunda insanlar ortaya koyulan tahminlere pek güvenmemekte ve çok önemli bir tehlike halinde dahi kendilerinde "Ne de olsa yine yanlış tahmindir" düşüncesi meydana

çıkmaktadır. En iyi çözüm en iyi tahminleri yapan modellerle çalışmakla mümkündür.

1.2 Tezin Maksadı

Son yıllarda tüm dünyada ortaya çıktığı gibi Türkiye'de de taşkın olayları sıklaşmıştır. Bunun sebebi yapay etkilerin yani insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki tesirlerinin bir hayli artmasıdır. Dünyanın taşkınla boğuşan birçok ülkesinde TEUS kurulmuş ve taşkının etkilerinden korunmaya çalışılmaktadır. Türkiye'de ise bu tarz bir teşkilat hala kurulamamıştır ancak AKOM tarafından İstanbul'daki bazı dereler için yaygın yöntemler kullanılarak bu tür bir çalışma yaklaşık 4 yıl önce başlatılmış ve bitmek üzeredir.

TEUS'nin etkin bir şekilde kurulması, öncelikle yağış miktarının ve konumunun doğru tahmin edilmesi ve buna göre de uç debi ve hidrografların uygun bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Aksi halde, Türkiye'deki maddi zararlar hatta bundan öte can kayıplarının önüne geçilemeyecektir. Çizelge 1.1'de (CRED, 2016) 1998-2016 yılları arasında ülkemizde ortaya çıkan taşkınlar ve bunların meydana getirdiği zararlar görülmektedir.

Çizelge 1.1 : 1998 – 2016 arasında Türkiye'deki taşkınlar ve zararları.

Tarih		Taşkının Yeri ve Türü		Can ve Mal Kayıpları		
Başlangıç	**Bitiş**	**İl, İlçe veya Bölge**	**Taşkın Türü**	**Ölen (Kişi)**	**Etkilenen (Kişi)**	**Tahmini Zarar (10^6 $)**
25.08.2015	25.08.2015	Artvin	Ani	9	-	-
30.01.2015	02.02.2015	Edirne	Nehir	8	6500	-
04.07.2012	04.07.2012	Canik (Samsun)	Nehir	13	-	-
08.10.2011	11.10.2011	Antalya, Denizli, Manisa	Nehir	8	-	-
07.09.2009	10.09.2009	İstanbul	Ani	40	35020	550
10.07.2009	16.07.2009	Şavşat (Artvin)	Nehir	7	111	-
16.11.2007	21.11.2007	Trakya ve Marmara Bölgesi	Nehir	1	2250	-
03.08.2007	03.08.2007	Aliçeyrek, Akkeran, Danişment	Nehir	2	186	-
27.05.2007	01.06.2007	Ağrı, Van, Bitlis, Gaziantep	Nehir	13	750	-
27.10.2006	07.11.2006	Çınar, Bismil (Şanlıurfa)	Ani	47	63015	317
01.07.2006	03.07.2006	Bitlis, Muş	Nehir	12	-	-
02.08.2005	03.08.2005	Çaykara (Trabzon)	Ani	7	-	-
04.07.2005	04.07.2005	İstanbul, Düzce, Sakarya	-	-	3000	-
16.08.2004	17.08.2004	Alibeyköy ve Esenler (İstanbul)	Ani	2	100	-
14.05.2004	16.05.2004	Hatay	Nehir	6	-	-
05.03.2004	09.03.2004	Erzurum, Batman, Bitlis	Nehir	15	50000	-
24.12.2003	26.12.2003	Antalya	Nehir	8	-	-
23.07.2002	27.07.2002	Rize	Nehir	34	3000	-

Çizelge 1.1 (devam) : 1998 – 2016 arasında Türkiye'deki taşkınlar ve zararları.

Tarih		Taşkının Yeri ve Türü		Can ve Mal Kayıpları		
Başlangıç	**Bitiş**	**İl, İlçe veya Bölge**	**Taşkın Türü**	**Ölen (Kişi)**	**Etkilenen (Kişi)**	**Tahmini Zarar (10^6 $)**
02.12.2001	09.12.2001	Adana, İçel	Nehir	5	570	25
07.05.2001	08.05.2001	Antakya	Nehir	3	1500	-
08.03.2001	08.03.2001	Şanlıurfa	Nehir	4	450	-
27.05.2000	27.05.2000	Samsun ve Tokat	Nehir	2	1000	40
10.08.1998	11.08.1998	Beşköy (Trabzon)	Ani	60	1000	-
12.06.1998	12.06.1998	Diyarbakır	Ani	22	-	-
20.05.1998	23.05.1998	Zonguldak, Karabük, Bartın	Ani	10	1.240.047	1000
TOPLAM				**338**	**1408499**	**1932**

Karmaşık olayların modellenmesi için önemli bir araç özelliğindeki Bulanık Mantık (BM) günümüzde artık yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uç debi ve hidrograf tahmini de gerçek girdirilerinin fazlalığı hasebiyle tahmin edilmesi son derece zor ve karmaşık bir olaydır. Ancak, BM ilkeleri kullanılarak bu zorluğun üstesinden gelmek mümkündür. Önceki çalışmalara baktığımızda BM ilkeleri kullanılarak bazı araştırmalarda taşkın tahmini yapılmış ve BM ilkelerinin tam anlamıyla kullanılmadığı görülmüştür. Önceki çalışmalar başlığı altında bu kaynaklar aktarılacaktır.

Özetle, taşkın zararlarından korunma adına erken harekete geçerek (yani, dere yataklarının, su kanalların, yağmur suyu drenaj hatlarının temizlenmesi, arama-kurtarma faaliyetlerinin düşünülmesi, zarar görecek meskûn bölgelerin tahliyesi gibi) can ve mal kayıplarını en aza indirmek için en doğru biçimde tahminler ortaya koyulmak zorundadır. Bu doğrultuda, ilgili havzada uç debi ve buna bağlı olarak hidrografın tahminini en doğru şekilde elde etmek tezin ulaşacağı hedeftir. Bunun için BM özellikleri daha etkin kullanılarak iki tanesi bulanık model (ANFIS) iki tanesi de bulanık zincir modeli (Mamdani-ANFIS) toplam dört farklı model önerilecektir. Teze konu edilen İstanbul Ayamama havzası için ayrıca SCS-Snyder yöntemi ayarlanarak istenen hedefe ulaşmada başarı durumu kıyaslanacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Ölçüm Cihazları Öncesi Yaklaşımlar

O'Connell (1868) uç (ekstrem) debi tahmini konusundaki ilk çalışmayı henüz yağış ölçüm cihazlarının bulunmadığı zamanlarda ortaya koymuştur. Yaptığı yaklaşımda en büyük debinin bir akış katsayısı ve havza alanının kareköküyle çarpımına eşit olacağını düşünmüştür.

$$Q_{uç}=CA^{0.5} \tag{2.1}$$

Bu denklem'de $Q_{uç}$, en büyük (uç) debiyi, A, havza alanını ve C akış katsayısını ifade etmektedir.

2.2 Ölçüm Cihazları Sonrası Yaklaşımlar

Bu çalışmadan yaklaşık otuz yıl sonra yağış ölçerlerin de vazife görmeye başlaması ile ortaya atılan yeni çalışmalar yağış şiddetini de (i) işin içine katmıştır. Kuichling (1889) tarafından ortaya koyulan denklem akılcı (rasyonel) yöntem adıyla birçok çalışmada öne çıkmış ve günümüzde küçük havzaların debi hesabında kullanılmaktadır.

$$Q_{uç}=CiA \tag{2.2}$$

Bu denklem içerdiği yağış şiddetiyle taşkın tahminlerini bir adım ileri götürürken debinin alanla doğrusal artacağını ifade etmesiyle de bir adım geriye gitmiştir.

Bu çalışmalarla birlikte taşkın sonrası raporlarının ilki 1902'de Passaic Nehri (Garfield, New Jersey, Birleşik Devletler) üzerinde gerçekleşen taşkından sonra yazılmıştır (Hollister ve Leighton, 1903). Bu kişiler yazdıkları raporda debinin zamanla değişimini ifade eden grafikleri ve taşkın zararlarının boyutlarını sayısal açıdan ortaya koymuşlardır. Dolayısıyla, tahmine dair yeni bir yöntem önermemişlerdir.

2.3 İstatistik Yaklaşımları

İlk çalışmaların verdiği farkındalıkla birlikte taşkınların ortaya çıkardığı zararlar da dikkate alındığında, hem yağış hem de akış ölçümlerine ciddi anlamda önem verilmeye başlanmıştır. Bu doğrultuda istatistiki çalışmalar için veriler elde edilmiş ve ilk çalışma Fuller (1914) tarafından yapılmıştır. Çalışmasındaki denklemde alanın artışıyla debi artışının azaldığını vurgulamış ve denklemi şu şekilde belirlemiştir.

$$Q_T=CA^{0.8}[1+0.8\log_{10}(T)](1+2A^{-0,3}) \quad (2.3)$$

Burada Q_T, T yıllık dönüş devrine (tekerrür süresine) sahip tepe debisi, C, akış katsayısı ve A, havza alanıdır. Fuller'i takiben Hazen (1921), Foster (1924) ve Gumbel (1941) gibi bilim adamları yaptıkları istatistiki çalışmalarla taşkın tahminine dair önemli katkılar sunmuşlardır. Bu bilimsel çalışmaların devamı niteliğinde Normal, Log-Normal, Gamma ve Pearson dağılımları geçmiş verilerden faydalanarak sadece taşkın konusunda değil, birçok konuda uygulama alanı bulmuş ve güncel istatistiki çalışmalar için vazgeçilmez araçlar arasında yer almıştır.

2.4 Birim Hidrograf Yaklaşımları ve Kayıp Hesap Yöntemleri

1932 yılında ilk defa Sherman tarafından önerilen birim hidrograf (BH) modeli yağış-akış modellerine yeni bir soluk kazandırmıştır. BH içerdiği kabullerden ötürü çok küçük ve çok büyük havzalarda kullanılması pek uygun değildir. Ayrıca, bu model sadece artık yağışı dikkate alıp kar erimelerini ihmal etmektedir. Sherman'ın modelini uygulayabilmek için havzaya ait yağış akış verilerinin bulunması gerekmektedir. Ancak, bu tür ve veriler bulunmasa bile böyle havzalar için yapısal (fiziksel) özelliklerine bakarak yapay BH'lar üretilmektedir.

Snyder (1938) ilk defa bir yapay BH geliştirerek, verisi bulunmayan havzalar için hidrograf tahmininde bulunmuştur. Onun önerisine benzer şekilde 1940 yılında Kirpich üçgen hidroraf şekliyle de bilinen yeni bir model ortaya koymuştur. Bu çalışmaları takiben Mockus (1957)'un uygulamaları ve Soil Conservation Service (SCS) Yöntemi (1986) birçok araştırmacı ve kurum-kuruluş tarafından dikkate alınan çalışmalardır. Bahsi geçen son dört çalışma Snyder, Kirpich, Mockus ve SCS model ve yöntemleri "İstanbul Derelerinin Taşkın Debilerinin Tahmini" adlı yayınlarında

Sönmez ve diğ. (2012) tarafından kıyaslanmıştır. Sonuçta, Snyder'in yöntemi ilgili çalışma alanları için en uygun yapay BH yöntemi seçilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri Tarım Başkanlığı Doğal Kaynakları Koruma Müdürlüğü (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, USDA-NRCS) (2004) bir havza için uç debi ve bu debinin görülme zamanı belirlendiği takdirde hidrograf için önemli bir yöntem olan boyutsuz birim hidrograf'ı (BBH) önermiştir. Bu tez çalışmasında bahsi geçen iki değer belirlenecektir ve BBH ile değişik tekerrür sürelerine ait hidrograflar çizdirilecektir. Bu konuda daha sonra BBH ile ilgili kapsamlı açıklamalara ve şekillere yer verilecektir.

BH'ların etkin bir şekilde belirlenebilmesi için iki önemli husus bulunmaktadır. Birincisi, denklemlerde yer alan ve havza yapısına göre değişkenlik gösteren katsayı ve değerlerin hatasız belirlenmesidir. İkincisi ise yağış sonucunda akışı meydana getirecek artık yağışın kusursuz hesaplanmasıdır. Bu kapsamda bazı kayıp yöntemleri önerilerek artık yağışın hesaplanmasına katkı sunulmuştur.

Burada bazı kayıp yöntemlerinden özetle bahsedilecek ve kullanılacak yöntem ise daha sonra ayrıntılı aktarılacaktır.

Tüm kayıp hesaplama yaklaşımları havzalardaki geçirimli alanları dikkate almak suretiyle geliştirilmiştir. Geçirimsiz bölgelere düşen yağış yeteri kadar nemli ise üzerine düşen yağışı tamamen akışa geçirecektir. Yaygın kullanıma sahip beş kayıp yöntemi Çizelge 2.1'de belirtilmiştir (Feldman ve Goldman, 1984).

Burada kayıp modelleri kısaca tanıtılmıştır, ancak daha sonra SCS kayıp modeli uygulama için kullanılacağından ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

Çizelge 2.1 : Yağıştan kayıp hesaplama yöntemleri.

Yöntem	Katsayılar	Tanım
Başlangıç ve Sabit (Initial and Constant)	Başlangıçtaki kaybolan hacim ve sabit sızma hızı	İlk aşamada başlangıç kaybı ortaya çıkar ve sonra sabit hızlı kayıp başlar.
HEC Üssel (HEC Exponential)	Sızma hızı, öncül toprak nemi, ıslanmaya bağlı sızma hızı değişim oranı	Öncül nem durumu ve sürekliliğe sahip toprak ıslaklığı deklemine göre başlangıç sızma hızı ayarlanır.
Holtan	Sızma hızı yeteneği (kapasitesi) ve toprak nemi tutma katsayısı	Sızma hızı, üssel toprak nemi biriktirme denklemi ile hesaplanır ve doygun toprak için sınırlandırılır.
SCS Eğri Numarası (EN)	Havza kullanımına ve toprak türüne göre EN	EN'na göre ayarlanmış denklem ile toplam kayıp belirlenir.
Green-Ampt	EN, Hacimsel nem eksikliği, ön emme ve hidrolik iletkenlik değeri	Darcy'nin yeraltı bağıntısına dayalı kayıp hesaplanır.

2.5 Taşkın Model Çalışmaları

Son yıllarda geliştirilen veya bilinen yöntemlerin aracılığı ile uygulamaya konulan temel çalışmaların yeni türevleri ortaya çıkmıştır. Günümüzdeki modern tahmin çalışmalarına baktığımızda BM (Chau ve diğ., 2005; Tayfur ve Singh, 2006; Mukerji ve diğ., 2009), yapay sinir ağları (Chau ve diğ., 2005; Tayfur ve Singh, 2006; Mukerji ve diğ., 2009), Kalman filtresi (Shamir ve diğ., 2010; Wu ve diğ. 2013) gibi araçların kullanıldığını ve benzetimlerle (simülasyonlarla) (Morita ve Fukuda, 2002; Mascarenhas ve diğ., 2005) görsel çalışmalar yapıldığını bilmekteyiz.

Yaseen ve diğ. (2015) 2000-2015 yılları arasında önerilmiş yapay zeka yöntemlerini yazdığı derleme makalede tüm ayrıntıları ile aktarmıştır. Özellikle BM ilkeleri ile tasarlanan debi tahmin modellerinin önceki yağış durumuna bağlı zemin nemi girdisini ihtiva etmediği görülmüştür.

Chau ve diğ. (2005) sundukları eserde sadece seviyeye bağlı olarak alt havzalarda ortaya çıkacak akış değerlerini elde etmiştir. Bu eser sadece büyük havzalar için düşünülmüştür ve küçük havzalarda kullanılması uygun değildir. Mukerji ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmada yağış girdisine karşılık akış tahmininde bulunmuşlardır. Dolayısıyla burada da sadece bir girdi kullanılmak suretiyle tahminler yapılmıştır.

Bir önceki iki çalışmaya nazaran Tayfur ve Singh (2006) iki girdi (yağış ve sızma) kullanmışlardır ve sadece laboratuvar ortamında debi tahmin çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Ancak bu çalışmada önerilen model yine aynı çalışmada benzetim (simülasyon) ile yaklaşık 8 km^2'lik havza için tatbik edilmiştir. Fakat ilgili modelin benzetimle karma havzalara veya büyük havzalara uygulaması sakıncalı olabilir çünkü sızma değerinin bir havzayı temsil edecek şekilde ayarlanması son derece zor bir meseledir. Diğer bir sakınca ise ortaya koyulan deney düzeneği ilgilenilen havzanın mevcut şarlarına göre tasarlanacağından özellikle şehirleşmenin sürekli arttığı havzalardaki temsiliyetini kısa sürede kaybedebilecektir. Son olarak, literatüre dahil edilen bu önemli çalışmanın önceki yağış değerlerini içermediği de görülmektedir.

Senaviratne ve diğ. (2014) sadece bir girdi ve bir çıktı kullanarak yağış-akış bulanık modelinde farklı sayıda kümelemeler ile denemeler yapmışlardır.

Tabari (2016) isimli araştırmacı gerçekleştirdiği bulanık model çalışmasında beş girdi ile debi tahmini yapmıştır. Aynı havzada bulunan üç yağış ölçüm noktası ve iki akış istasyonu verileri girdi iken ilgilendiği havza çıkış noktasına ait debiyi tahmin etmiştir. Yağış ölçüm noktalarına ait verileri ayrı ayrı dikkate alan bu çalışma toprak nemini dikkate almamıştır.

Chang ve diğ. (2017) önerdikleri bulanık modelde sadece yağış verisinden faydalanırken birden fazla ölçüm noktasını göz önünde bulundurmuşlardır ve buna göre debiyi tahmin etmişlerdir. Bu haliyle tavsiye edilen model için toprak neminden bahsedilmemiştir.

Özetle, bahsi geçen eserlerde tecrübelere ve sözel bilgilere dayalı tüm belirsizlikleri içerebilecek BM ilkeleri tam anlamıyla kullanılmamıştır. Yapılacak bu doktora çalışması sırasında bunların daha da geliştirilmiş türlerinin ortaya çıkarılmasına çalışılacaktır.

Bayazıt ve Önöz (2008) ve Şen (2009) yazdıkları kitaplarda birçok eski ve yeni taşkın tahmin yönteminden bahsetmişlerdir. Şen (2009) kitabında ayrıca iklim değişikliğine vurgu yapmış ve özetleyerek iklim değişikliğinin taşkın üzerine etkisinden söz etmiştir. Bunlara ek olarak Şen (2013) akılcı yönteme yeni bir seçenek açıklamış ve kıyaslamalarla yeni yöntemin üstünlüğünü göstermiştir.

2.6 Erken Uyarı Sistemleri

Giriş kısmında da söylendiği gibi uç debi, hidrograf veya taşkın tahmini şimdilerde erken uyarı ekiyle birlikte zikredilmektedir. Birçok ülkede özellikle de taşkınların büyük kayıplara yol açtığı ülkelerde taşkın erken uyarı sistemleri (TEUS) kurulmuş ve işletilmektedir. Bir örnek verilirse, ORCHESTRA projesi (Url-1), Avrupa Komisyonu Altıncı Çerçeve Programı'nın en önemli bütünleşik projelerinden biridir. Bu proje 2008 yılında sonlanmış ve birçok afet durumunu kapsayan önemli bir çalışmadır.

Türkiye'nin de gündemindeki TEUS aslında 1998'den beri uygulanmaya çalışılmaktadır. 1998 baharında Bartın ve civarında yaşanan sel felaketi, birçok kişinin ölümüne ve büyük miktarda maddi kayba sebebiyet vermiştir. Felaketin ardından, taşkın sorununun çözülmesi için Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından bir dizi çalışma başlatılmıştır. Kısaltılmış adı ile TEFER (Turkish Earthquake and Flood Emergency Research) (Url-2) Dünya Bankası kredili projelerle, teknik araştırmalar yapılırken, aynı zamanda taşkın önleme ve geciktirmeye yönelik inşaat yatırımlarına başlanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen TEUS, sahadan gelen gerçek zamanlı ölçümleri kullanarak, havzalardaki taşkın durumu hakkında tahminler yapılmasını sağlayacak ve tahmin işlemi tamamen otomatik bir şekilde, taşkın tahmin merkezi işletimcilerinin denetim ve hakimiyeti altında gerçekleşecekti. Ancak, ülkemizde taşkın tahmin ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çok sayıda girişimde (Türkiye-Bulgaristan Bölgesi Taşkın Tahmini için Kapasitenin İyileştirilmesi Projesi, Ani Taşkın Tahmini ve Erken Uyarı Sistemleri Kapasite Geliştirme Projesi, GAP Bölgesinde Sele Maruz Kalan Alanlarda Sel Riskinin Azaltılması Projesi, Karadeniz ve Ortadoğu Bölgesi Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi Projesi) bulunulmasına rağmen bugüne kadar etkin ve tam işleyen bir taşkın tahmin ve uyarı teşkilatı (sistemi) henüz kurulamamıştır. Taşkınlardan dolayı halen insanlar ölmekte ve ciddi oranda maddi kayıplar yaşanmaktadır (Erdoğan, 2011).

Dünyada, TEUS denildiğinde çoğunlukla proje esasında çalışmalar göze çarpmaktadır. Ntelekos ve diğ. (2006)'nin yaptıkları çalışma bu sistemle alakalı olarak literatüre girmiştir. Carpenter ve diğ. (1999)'nin ortaya koydukları çalışmayı merkeze alarak, Ntelekos ve diğ. (2006)'nin meydana getirdikleri TEUS, eski yöntemlerin kullanıldığı bir çalışmadır. Bununla birlikte, aynı çalışmalarda taşkın

gibi son derece hareketli (dinamik) bir olay için durağan ve ortalama kabullerin yapılması çalışmanın bilimsellik derecesini bir hayli düşürmüştür.

TEUS denildiğinde akla gelen ilk konu can ve mal kayıplarını azaltmak ve bunun için gereken önlemleri almaktır. Dolayısıyla üç aşamadan ibaret TEUS için birinci aşamada meteorolojik verilerin gerçek zamanlı ve en doğru biçimde elde edilerek ikinci aşamadaki hidrolojik modele sokulmalıdır. Son aşamada ise hidrolik hesaba göre ilgili ikazlar verilmelidir.

Ülkemizin neredeyse her alanını kapsayacak şekilde radarlar kurulmuş ve yağış tahmini gerçek zamanlı alınabilmektedir. Hidrolik hesaplar ise zaten her daim geçerli bir şekilde ilgili havzalar için ortaya koyulabilmektedir ve sınır debi değeri bilinmektedir. Sonuçta tahmin edilen debi değeri sınırı geçiyorsa ikaza yer verilir veya aksi durumda gerek duyulmaz. Burada önemli husus hidrolojik model için en uygun seçimi yapmaktır. TEUS'nin birinci (meteorolojik tahmin) ve üçüncü (hidrolik hesap) aşamaları çözülmeyi veya iyileştirmeyi bekleyen sorunlar olmakla birlikte bu tez çalışmasını ikinci aşamaya odaklamak suretiyle hidrolojik model için en uygun aracın üretilmesi hedeflenmiştir.

3. YÖNTEM

3.1 Mantık

Mantık kelimesi kökeni bakımından incelendiğinde Arapça'daki sırasıyla "Nun (ن)", "Tı (ط)" ve "Kaf (ق)" harflerinden müteşekkildir ve "fikir yürüterek konuşmak" anlamını içerir. Nitekim halk arasında kullanılan "Nutuk atmak" fiili zamanla değişik anlamlara bürünmüşse de aslen ve tamamen yukarıda ifade edilen anlama gelmektedir.

İnsanlar arasında mantık denildiğinde her ne kadar tümden sözellik akla gelse de, görünüşte sayısallığın hüküm sürdüğü mühendislikte kullanılan en basit denklemlerin bile alt yapısı tamamen mantık kurallarına dayanmaktadır. Çünkü mantık bilimi en özet ifadeyle "Eğer" ve "İse" kelimelerini içeren sebep (öncül)-sonuç (ardıl) önermeleri ile varlığını sürdürmektedir. Mühendisilikte faydalanılan denklemler ve modellere bakıldığında tümden bu tarz önermeleri görmek mümkündür. Şen (2011) hazırladığı "Mühendislikte Felsefe, Mantık, Bilim ve Etik" isimli kitapta mantığın mühendislik ile nasıl iç içe bulunduğunu tüm ayrıntıları ile aktarmıştır. Şen (2011) aynı eserde Şekil 3.1 ile bir mantık cümlesini şekle dönüştürerek sunmuştur.



Şekil 3.1 : Mantık cümlesi.

Mantık biliminde sebep-sonuç ilişkisini ifade eden "Eğer" ve "İse" kelimelerinin dışında üç kelime daha vardır ve bunlar "Ve", "Veya" ve "Değil" kelimeleridir. Diğer bir deyişle bunlar sebeplerin sonuca etki şeklini gösteren mantık bağlaçlarıdır. Bu kelimelerin önemi çıktıların birden fazla girdiye bağlılığı ile ortaya çıkar. "Ve" kelimesi girdilerin beraber düşünülmesinin gerekliliğini, "Veya" sağındaki ve

solundaki mantıki cümlelerin çıktıya götüren ayrı birer seçenek teşkil ettiğini, "Değil" ise çıktıya sağlıklı bir şekilde ulaşmak için ilgili kavramların birlikte hesaba katılmamasını ifade etmektedir.

Şayet bir mantık cümlesi sadece bir sebebe dayandırılıyorsa, bu durumda mantık bağlaçlarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Mesela, basit bir akıl yürütme ile güneş enerjisi için güneş ışınımına ihtiyaç duyulmaktadır ve güneş ışınımı için de güneş belli süre ile kendisini göstermesi gerekmektedir ki, burada girdi güneşlenme süresi çıktı ise güneş ışınımıdır. Buradan yola çıkarak şu basit mantık cümlesini herhangi bir mantık bağlacına gerek duymadan kurmak mümkündür;

"Eğer" Güneşlenme süresi var "ise" Güneş ışınımı da vardır.

Yukarıdaki mantık cümlesi diğer bir ifadeyle aralarında doğru orantının bulunduğu bir girdi ve bir çıktıya sahip bir modelin veya denklemin en kapsamlı ifadesidir.

Mantığın dayandırıldığı en önemli yaklaşımlardan biri de kümeler yaklaşımıdır. Bu sayede insan dağarcığındaki bilgi ve tecrübeye dayalı bir şekilde girdi ve çıktıları alt kümelere ayırarak igili modellerin kurulumu için birçok mantıksal kural elde edebilmektedir. Burada yine güneş ışınımı örneğini vermek konunun bütünlüğü açısından önem arz etmektedir. Güneşlenme süresi üç alt kümeye ayrıldığında bunları "kısa", "orta" ve "uzun" şeklinde, buna karşılık Güneş ışınımını da "az", "vasat" ve "çok" alt kümelerine ayırmak mümkündür. Böylece yukarıda tek mantık cümlesi ile ifade edilen ilişki, daha fazla kural ile daha da anlaşılır hale getirilebilecektir. Bahsi geçen üç kural şu şekilde yazılabilmektedir;

Eğer Güneşlenme süresi "kısa" ise Güneş ışınımı "az"dır,

Eğer Güneşlenme süresi "orta" ise Güneş ışınımı "vasat"tır,

Eğer Güneşlenme süresi "uzun" ise Güneş ışınımı "çok"tur.

Şimdiden sonra güneşlenme süresi ve güneş ışınımı arasındaki ilişki ilgili mantıki kurallar çerçevesinde daha anlaşılır hale gelmiştir.

Yukarıda aktarılan "Ve", "Veya" ve "Değil" kelimelerinin önemi çıktıların birden fazla girdiye bağlılığı ile ortaya çıkar. Güneş ışınımı ve güneşlenme süresi arasındaki ilişki farklı akıl yürütmeler de dikkate alınarak tekrar düşünülürse; Aynı uzunluktaki güneşlenme süresi kışın da ortaya çıkabilir yazın da; o zaman güneş ışınımı için sıcaklık da önem arz eder, hatta nem oranının etkisi de göz ardı edilmemelidir.

Buradan yola çıkarak şu basit mantık cümlelerini gerekli mantık bağlacı ile yazmak imkan dahilindedir (Aşağıdaki örnek kurallar güneş ışınımı için üç yerine beş alt küme belirlenerek yazılmıştır; "Çok az", "az", "vasat", "çok", "aşırı çok");

"Eğer" Güneşlenme süresi "kısa" "ve" Sıcaklık "az" "ve" nem "çok" "ise" Güneş ışınımı "çok az"dır,

"Eğer" Güneşlenme süresi "orta" "ve" Sıcaklık "ılık" "ve" nem "ortalama" "ise" Güneş ışınımı "vasat"tır,

"Eğer" Güneşlenme süresi "uzun" "ve" Sıcaklık "yüksek" "ve" nem "kuru" "ise" Güneş ışınımı "aşırı çok"tur,

Kuralları fazlalaştırmak mümkündür, ancak konunun anlaşılırlığı bu üç kural ile sağlandığı düşünülmüştür.

3.2 Düz (Klasik) Mantık

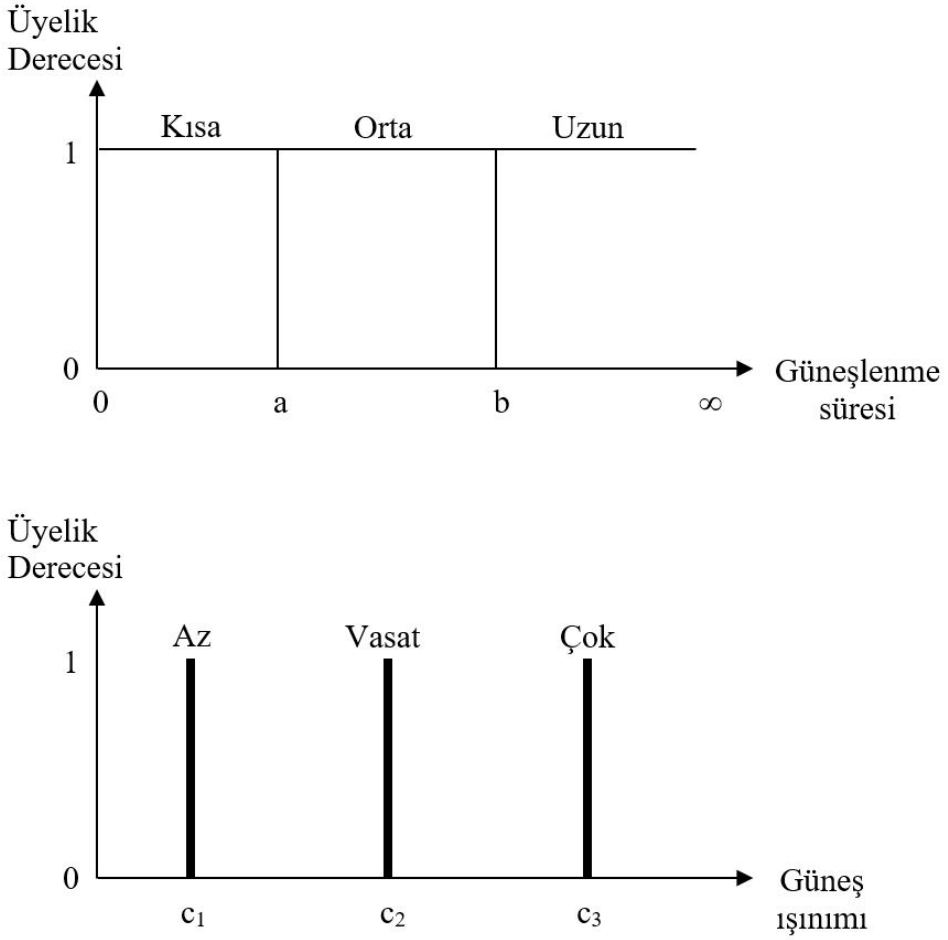
Aristo mantığı diye de zikredilen düz mantık hiçbir griliği kabul etmeyen ve dağarcığında sadece siyah ve beyaz renkleri içeren mantıktır. Bu cümle, eğer bir şeyin bir kümeye aidiyeti (üyelik derecesi) sıfır (ait değildir) veya bir (aittir) şeklinde sınıflandırılırsa sayısal hale getirilebilir. Böylece daha umumi haliyle düz mantık sözel veya sayısal belirsizliği ("yaklaşık", "aşağı-yukarı", "gri", "biraz", "10 civarı", gibi) kabul etmeyerek kesin ifadelerle ("var" veya "yok", "sıfır" veya "bir", "siyah" veya "beyaz", "açık" veya "kapalı") varlığını sürdürür. Bu tek düzeliği ilgili mantık kuralları ile kırmanın en önemli adımı, bir çok kural geliştirmekle veya denklem yazmakla mümkündür. Bu aşamadan sonra, yukarıda bahsedilen bir girdi ve bir çıktı örneği üzerinden düz mantık çerçevesinde sözel ve şekilsel açıklamalarda bulunulacaktır.

Kurallar şeklinde güneşlenme süresi kısadan uzuna, güneş ışınımı da azdan çoğa yazılmıştır. Konunun anlaşılması açısından ilk aşamada "az", "çok" gibi sözel ifadeler aktarılmıştı. Şimdi kurallar daha tanımlı, sayısal ve şekilsel (Şekil 3.2) hale getirilecektir (a, b, c_1, c_2 ve c_3 birer sayısal değeri ifade etmektedir);

Eğer Güneşlenme süresi (GS) 0-a arası bir değer ise Güneş ışınımı c_1'dir,

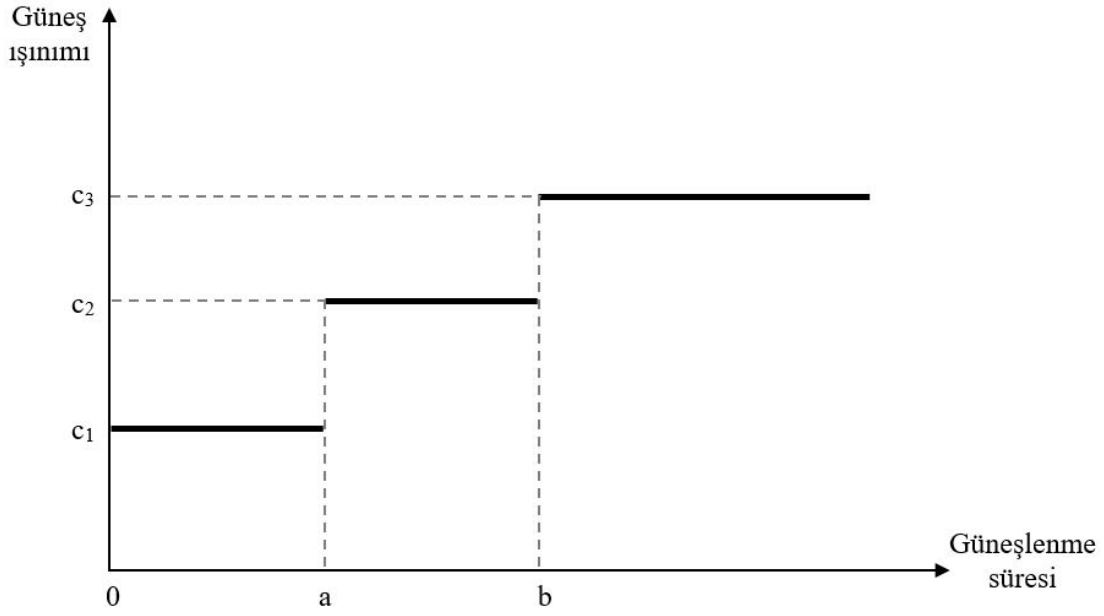
Eğer Güneşlenme süresi (GS) a-b arası bir değer ise Güneş ışınımı c_2'dir,

Eğer Güneşlenme süresi (GS) b-∞ arası bir değer ise Güneş ışınımı c_3'tür.



Şekil 3.2 : Düz mantık çerçevesinde bir girdi ve bir çıktının alt kümelere ayrılması.

Bu modele ait yatayda girdi, düşeyde çıktının bulunduğu eğri elde edilmelidir ve bu eğri de modelin kendisini tarif edecektir (Şekil 3.3).



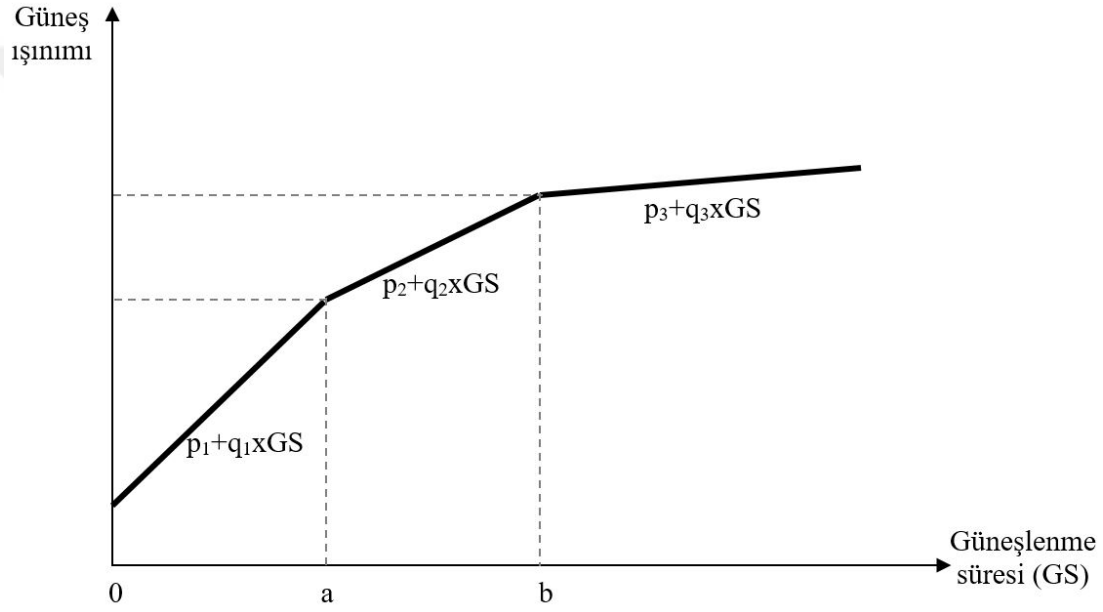
Şekil 3.3 : Düz mantık ile sabit değer çıktılı model sonucu.

Bu şekilden görüleceği üzere eğimin sıfır olduğu ve süreksizliklerin ortaya çıktığı bir model elde edilmiştir. İlgili kuralların çıktıları sabit değer yerine denklem şeklinde belirlendiği takdirde, eğimleri sıfırdan farklı eğriler çizdirilecektir. Süreksizlikler yine gözükecektir, çünkü ya 0'dır ya da 1'dir düz mantığı hala hakimdir (Şekil 3.4). Aşağıda yazılan kurallarda p_1, p_2, p_3, q_1, q_2 ve q_3 değerleri birinci dereceden denklemlerin katsayılarıdır

Eğer GS 0-a arası bir değer ise Güneş ışınımı GI=p_1+q_1xGS'dir,

Eğer GS a-b arası bir değer ise Güneş ışınımı GI=p_2+q_2xGS'dir,

Eğer GS b-∞ arası bir değer ise Güneş ışınımı GI=p_3+q_3xGS'dir.



Şekil 3.4 : Düz mantık ile denklem çıktılı model sonucu.

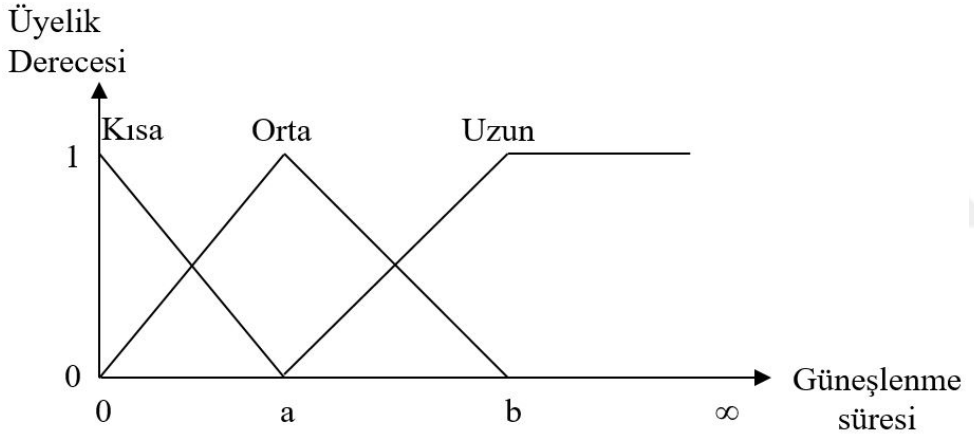
Düz mantığa göre ayarlanan modellerde süreksizlikleri ortadan kaldırmak için ilgili önermeleri (kuralları) artırmak gerekir. Hatta önermeler sonsuz sayıda belirlendiğinde sonuç tamamen eğriselleşir. Model sonucu denklem veya sabit değer çıktılı ayarlansa bile sonsuz kural sayesinde sonuç eğrisel hal alır. Ancak sonsuz sayıda veya çok fazla sayıda kural belirlemek modelleri kurmayı nerede ise imkansız kılmaktadır. Bu konudaki çözüm BM ilkelerinde saklıdır.

3.3 Bulanık Mantık (BM)

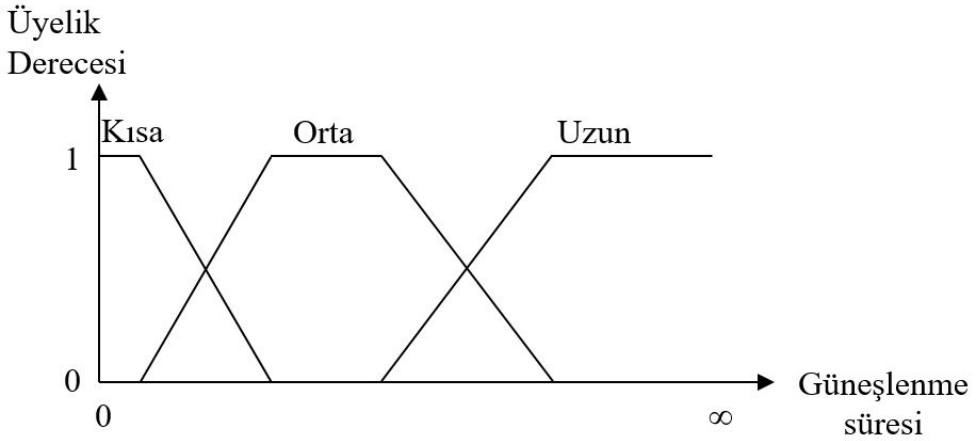
Gerçek bir olayın kavranılması insan bilgisinin yetersizliği sebebiyle tam anlamı ile mümkün olamadığından, insan, düşüncesinde ve zihninde bu gibi olayları yaklaşık

canlandırarak yorumlarda bulunur (Şen, 2001). Diğer taraftan, bilgisayarlardan farklı bir şekilde insanın yaklaşık düşünme ve belirsizlik içeren bilgi ile işlem yapabilme yeteneği vardır. Sözel bilgilerin işlenerek bilgisayarlara okutabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Zadeh (1965) bu gibi bilgileri ilk olarak BM kuralları ile sayısallaştırmış ve bilgisayarlarda işlenebilir duruma getirmiştir.

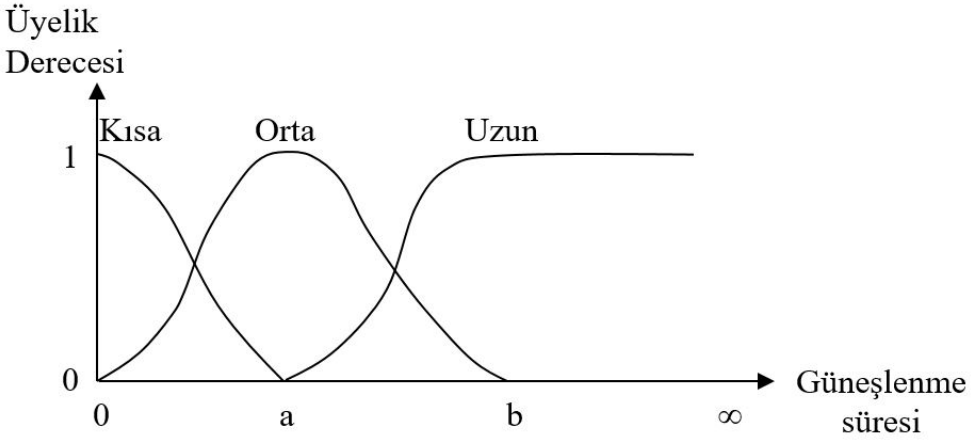
BM'ın en belirgin özelliği, düz mantığın aksine ortaya koyduğu önermeleri belli bir değer için bir "üyelik derecesi"yle tanımlar ve ilgili değerin sağına veya soluna gidildikçe bu üyelik derecesini "sıfır"a yaklaştırır. En basit şekliyle üçgen alt kümelerden meydana gelmiş bir dağılım elde edilir (Şekil 3.5). Burada alt küme çeşidi farklı şekil tercihine de açıktır. Mesela, yamuk (Şekil 3.6) ve eğrisel (Gumbel ve Gauss dağılımı gibi) (Şekil 3.7) alt kümeler de seçilebilmektedir. Alt küme türlerini çoğaltmak imkan dahilindedir ancak burada üç farklı şekil ile örnekleme yapılmıştır.



Şekil 3.5 : BM çerçevesinde bir değişkenin üçgen alt kümelere ayrılması.



Şekil 3.6 : BM çerçevesinde bir değişkenin yamuk alt kümelere ayrılması.



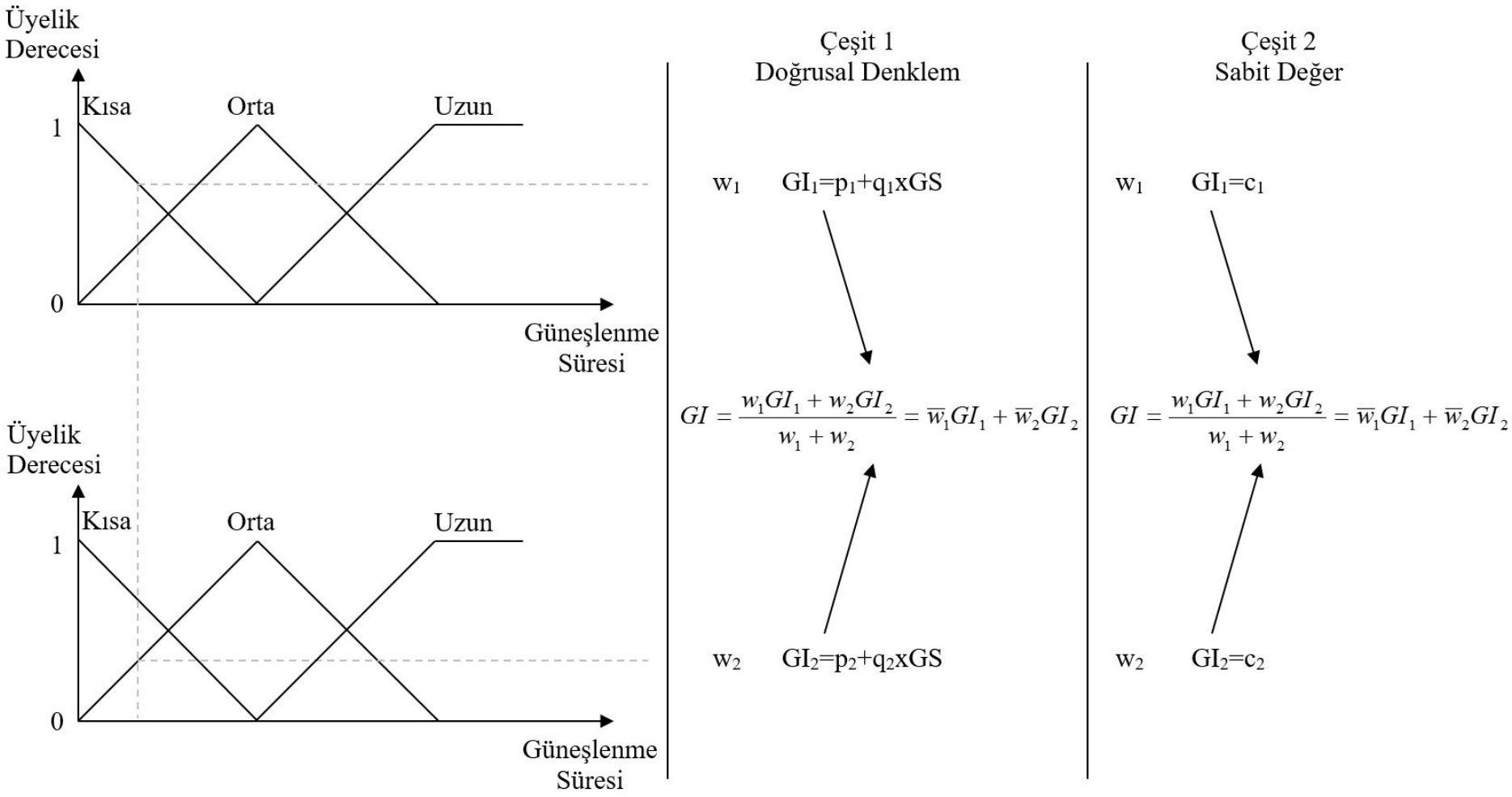
Şekil 3.7 : BM çerçevesinde bir değişkenin eğrisel alt kümelere ayrılması.

BM ilkeleri sayesinde belirlenen sayı aralığı (alt küme) tümden aynı derecede o alt kümeye dahil edilmek yerine 0-1 arasında derecelendirilerek her bir değerin kümeye aidiyeti (üyeliği) belirlenmiştir. Böylece, mesela bir değer biraz "orta" bir miktar da "düşük" alt kümesi içine dahil edilebilmektedir. Düz mantıkda ise bir değer sadece bir alt küme içindedir ve aidiyeti de birdir.

Düz mantıkta ilgili kurallar dahilindeki sabitleri veya denklemleri kullanarak ek bir işleme gerek duymadan çıktı sonucu elde edilmektedir. BM'ta kurallara ek, her bir değerin alt kümelerdeki üyelik derecesine göre ortalama alma işlemi de yapılmaktadır; bu eylemin adı "durulaştırma"dır. Bunun için çıktıya ulaşmak adına diğer bir deyişle durulaştırma yapmak için bir takım bulanık çıkarım yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Önceki çalışmalarda (literatürde) bazı araştırmacılar tarafından değişik bulanık çıkarım yapıları (BÇY) önerilmiştir. Bunlardan biri Mamdani (1974) diğeri ise Sugeno (Takagi ve Sugeno, 1985; Sugeno, 1985) BÇY'dır. İlk adımda konunun takibi açısından düz mantığa yakınlığı ile bilinen Sugeno BÇY aktarılacaktır.

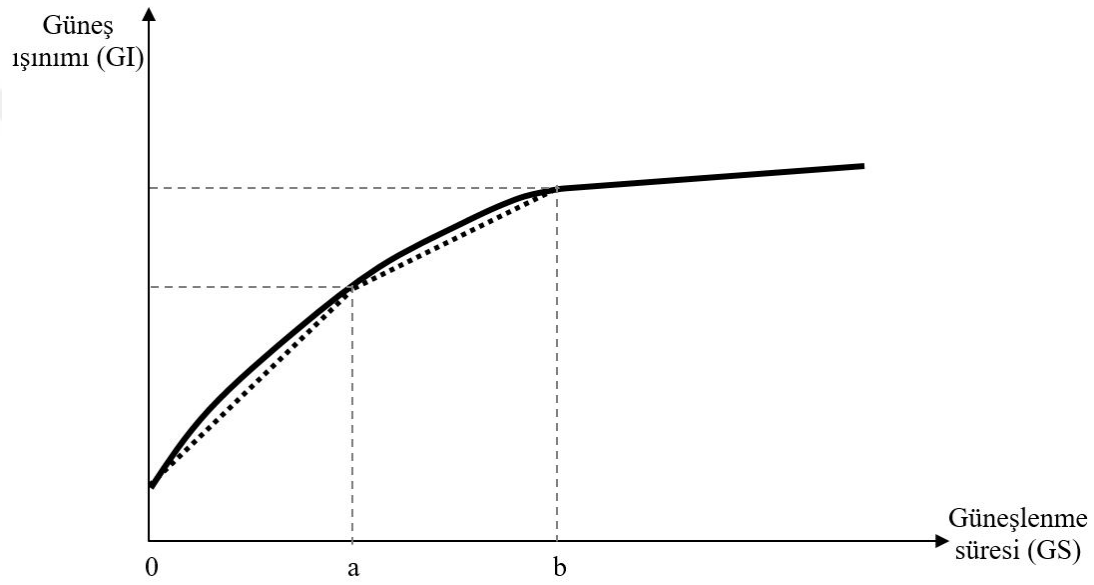
3.3.1 Sugeno BÇY

Sugeno BÇY'nda veri dizisinin girdi kısmı bulanık alınırken, çıktı kısmı düz mantıktaki gibi kesin ifadelerle belirtilir. Bunun için ortaya koyulan uygulamalarda iki seçenek vardır. Bir yapıda girdi bulanık, çıktı kısmı da sabit değer kabul edilebilir veya doğrusal bir denklem alınabilir (Şekil 3.8) (w simgesi üyelik derecesini ifade etmektedir).



Şekil 3.8 : Sugeno BÇY çeşitleri.

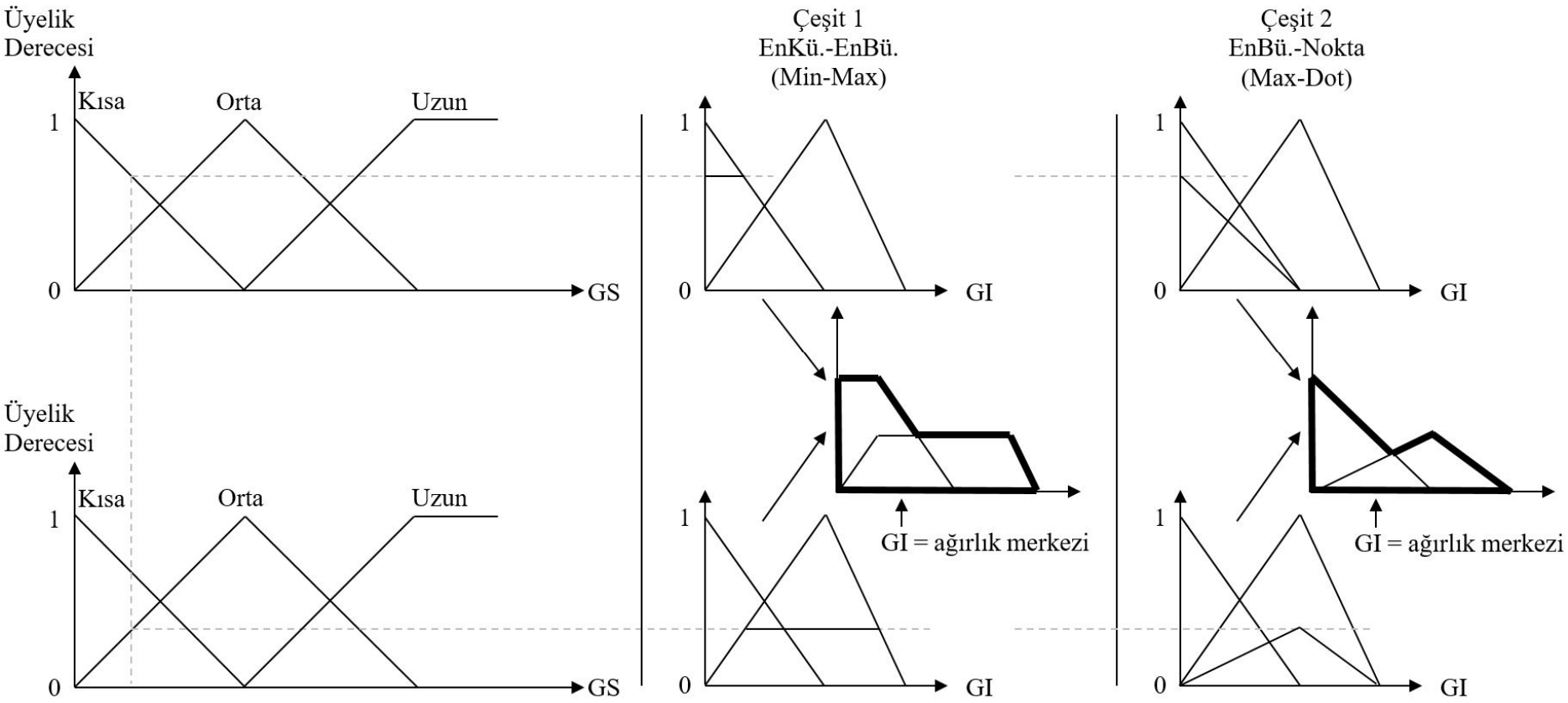
Düz mantığı BM'ın iki çıkarım yapısından biri durumundaki sadece Sugeno BÇY ile kıyaslamak mümkündür, çünkü ikisinin de çıktıları ya sabit değer ya da denklem ile ifade edilir. Şekil 3.3 ve 3.4'te görüldüğü gibi düz mantık ilkelerine göre model sonuçları süreksizliklerden ibarettir. Sugeno BÇY'nda girdilerin sabit değere veya doğru denklemine etkisi sürekli değiştiğinden, model çıktısı eğrisel bir hal almaktadır (Şekil 3.9). Bu şekilden görüleceği üzere düz mantık ile elde edilen sonuçta a ve b girdilerine karşılık kırılmalar (süreksizlikler) varken, BM ilkeleri sayesinde bu kırılmalar yumuşatılmıştır. Aynı eğriselliği Sugeno BÇY kullanarak sabit değer çıktı kabulü ile bile yakalamak mümkündür.



Şekil 3.9 : Sugeno BÇY ile denklem çıktılı model sonucu.

3.3.2 Mamdani BÇY

Mamdani (1974) BÇY'nda hem girdi hem de çıktı bulanık biçimde düşünülmektedir. Bu yapıda sözellik tam anlamıyla hâkimdir. Girdi için nasıl ki Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7'deki gibi bulanık alt kümler tanımlanıyorsa, Mamdani'ye göre aynı şekilde çıktı için de bulanık alt kümeler tanımlanır. Bunun için ortaya koyulan uygulamalarda iki önemli seçenek vardır (Şekil 3.10).

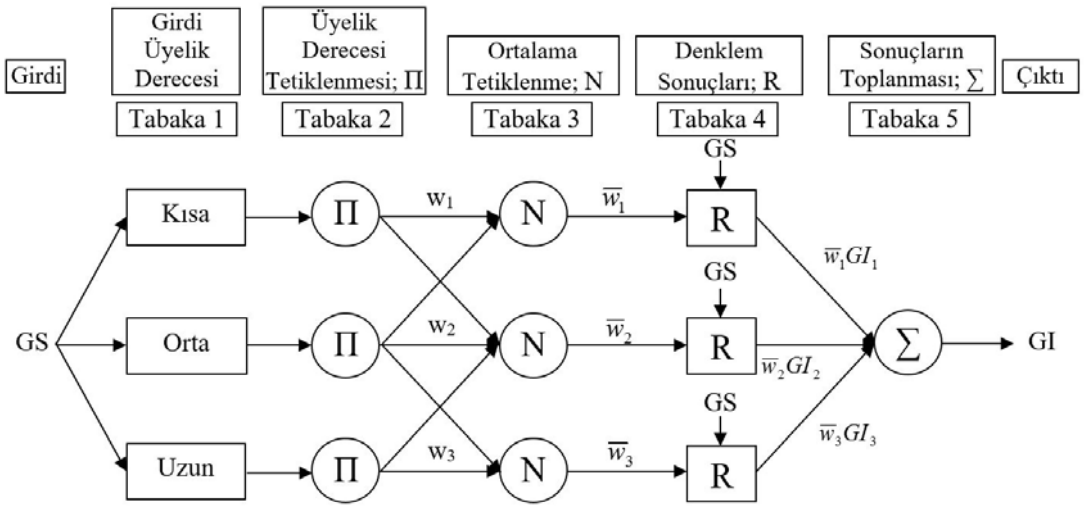


Şekil 3.10 : Mamdani BÇY çeşitleri.

Mamdani BÇY ile ortaya çıkarılan model sonuçları da Şekil 3.9'daki gibidir. Araştırmacılar Sugeno ve Mamdani BÇY ile çalışarak birçok konuda önemli modeller önermişlerdir. Eğer çalışılan konuda, hem girdi hemde çıktı bilgileri (ölçümler) mevcut ise Sugeno ile model üretmek en mantıklı adımdır. Diğer taraftan, girdi bilgileri varken çıktı bilgileri tecrübeye ve uzmanlığa dayalı sözel bir şekilde mevcut ise o zaman Mamdani BÇY dikkate alınmak durumundadır.

3.3.3 ANFIS (The Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Yapısı olan ANFIS girdi ve çıktı değişkenlerinin eğitimini yapan bir yazılımdır (Jang, 1992). Bu yazılım girdilerin çıktılarla en iyi biçimde uygunluğunu sağlayarak tahmin yapmaya fırsat tanır. ANFIS aslında Sugeno BÇY'nı kullanırken verilerin eğitimi aşamasında yapay sinir ağlarından (YSA) da destek alır (Şen, 2004). Eğitim aşamasında şu iki husus son derece önemlidir ve aynı anda sağlanmalıdır; birincisi hataların toplamının sıfıra eşit veya sıfıra çok yakın olması, ikincisi ise hataların karelerinin toplamının seçenekler arasında en küçük olmasıdır. ANFIS bu iki noktayı dikkate alarak verileri eğiterek uygun modeli meydana getirmektedir. Güçlü ve diğ. (2014, 2015) bir girdi ve bir çıktılı ANFIS mimarisinin örneğini göstermişlerdir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Bir girdi ve bir çıktılı ANFIS mimarisi.

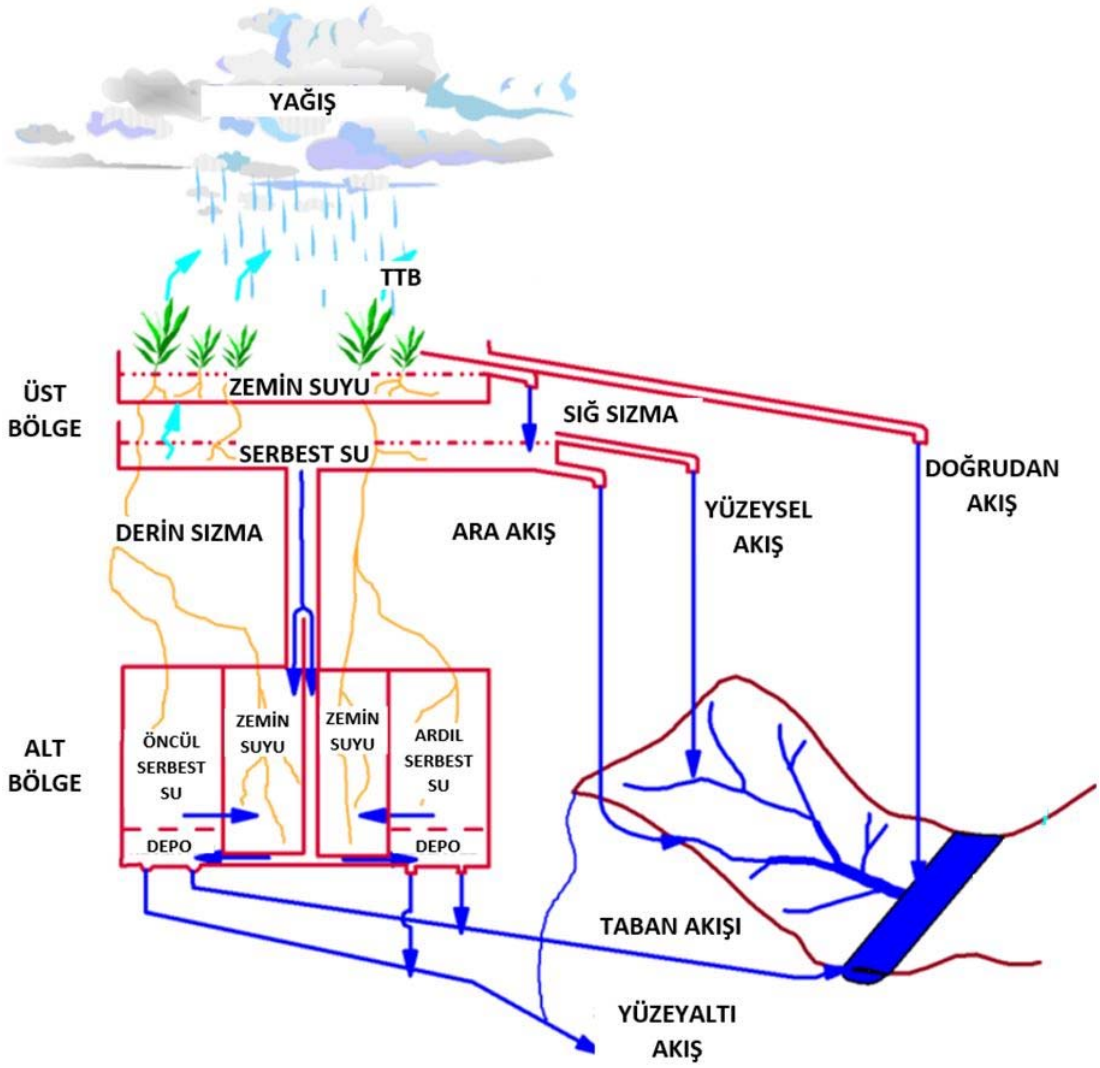
3.4 Bulanık Zincir Modeli (BZM)

Bu model BM, Mamdani, Sugeno ve ANFIS'i içerdiğinden ötürü, ilk aşamada bunlara ait bilgilendirmede bulunulmuştur. Örnekleme yaparken her ne kadar mevzu bahis yağış-akış ise de bir girdi bir çıktı için önemli örnek teşkil eden GS ve GI'ndan

fayda sağlanmıştır. Bundan sonra BZM'nin çıkış noktası ve kendisinden bahsedilecektir.

BZM BM ilkelerine dayalı zincirleme olaylar bütünüdür. Bu modelin çıkışında yine olayları zincirleme düşünerek yağıştan akışı tahmin eden Sacramento Soil Moisture Accounting-Sacramento Zemin Nemi Hesaplama (SAC-SMA) (Burnash ve diğ., 1973; Burnash ve Singh, 1995) modelinden esinlenilmiştir.

Kavramsal model özelliğine sahip SAC-SMA yağıştan akış tahmini yaparken hidrolojik süreçlerin tümünü birden dikkate almaktadır (Şekil 3.12 (Yılmaz, 2007)).



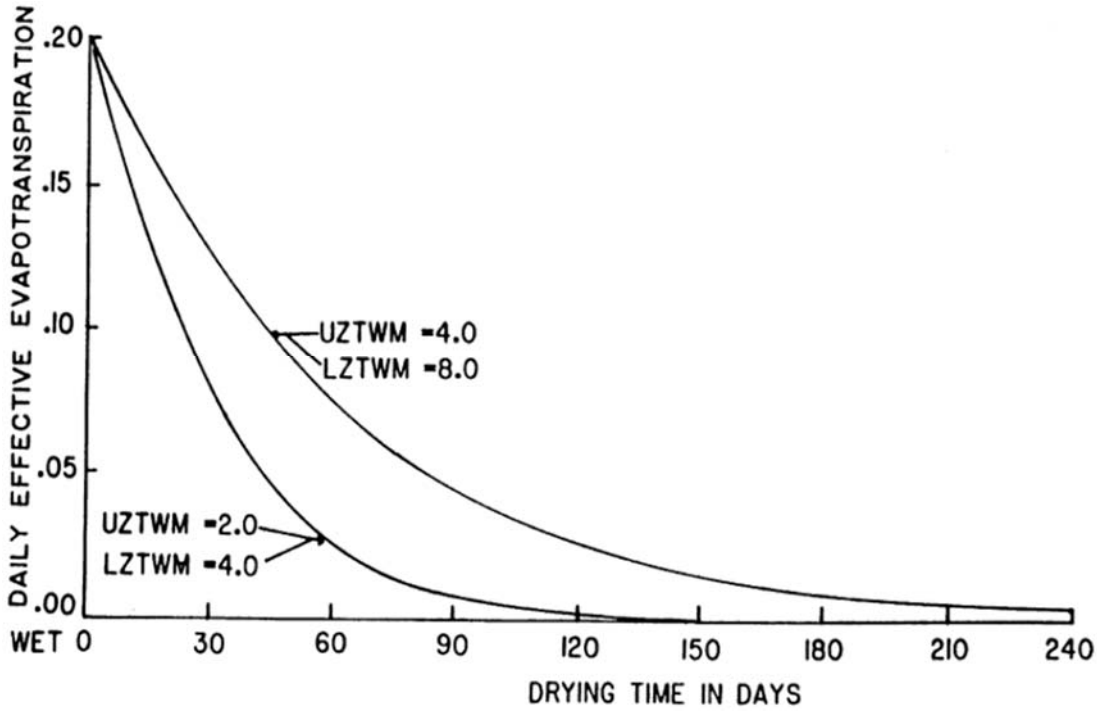
Şekil 3.12 : Resmedilmiş Kavramsal SAC-SMA Modeli.

Burnash ve diğ. (1973) ve Burnash ve Singh (1995) tarafından ortaya koyulan bu model geçiş süresi 12 saatten fazla havzalar için uygun görülmüştür çünkü hidrolojik süreçlerin tamamı düşünüldüğünde bu süreçlerin gerçekleşmesi için uzun süreye ihtiyaç vardır (Finnerty ve diğ., 1997). Küçük ölçekli havzalar için bu model uygun

değildir. Ayrıca, Url-3'te SAC-SMA modeli için aşırı sulak ve kurak dönemlerde etkinliğini kaybedebileceğinden de bahsedilmiştir.

Modelde zemin alt ve üst diye iki tabakaya ayrılmıştır. Alt tabakaya kıyasla daha ince kabülünün yapıldığı üst tabaka kendisinde belli bir değerde nem barındırmasının yanında, buharlaşma ve sızma (düşey ve yatay) gibi süreçlere de ev sahipliği yapmaktadır. Daha kalın kabul edilen alt tabakada toprak neminin yanı sıra derin sızmaların (düşey ve yatay) bulunduğu ve yeraltı suyunun depolandığı tabakadır. Bahsi geçen üst ve alt tabakanın her biri ayrıca içlerinde bulundurduğu suya göre zemin suyu ve serbest su şeklinde iki kısımda incelenir. Zemin suyu sadece Terleme Tutma Buharlaşma (TTB) (Evapotranspirasyon) yoluyla yerinden ayrılırken serbest su yatay ve düşey hareketler yapmaktadır. Alt tabakanın serbest suyu iki kısımda incelenmekte ve taban akışını meydana getirmektedir. Öncül serbest su geçmiş yağışlar sebebiyle depolanmış serbest su iken, ardıl serbest su şimdiki yağışın etkisiyle alt tabakada biriken serbest sudur.

SAC-SMA modelinde her bir durum ve olayı niteleyen etkenler (parametreler) bulunmaktadır ve toplam 21 adettir (Çizelge 3.1). Ancak sıcaklık etkisinden hiç bahsedilmemesi de dikkat çekmektedir. Şekil 3.13 SAC-SMA kılavuzunda (Url-3) sunulmuştur ve TTB kayıpları sıcaklıktan bağımsız bir şekilde sadece süre ile belirleneceği resmedilmiştir.



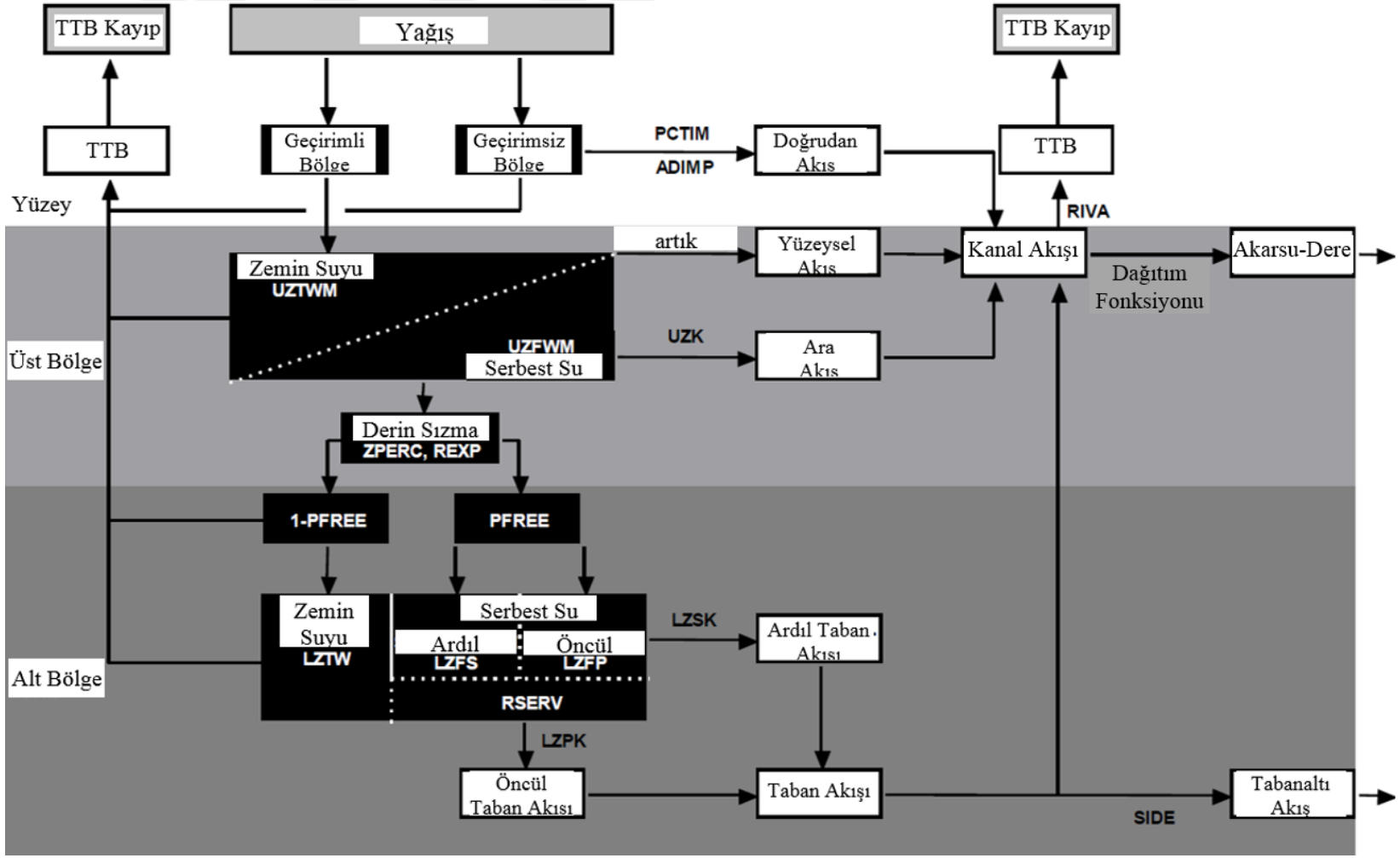
Şekil 3.13 : SAC-SMA modelinde Süre-TTB ilişkisi.

Zeminin farklı noktalarında (Şekil 3.14, Yılmaz, 2007) belli görevleri temsil eden etkenlerin bazıları gözlenmiş hidrograflara göre belirlenirken, bazıları da havzanın maddi (fiziksel) özelliklerine göre ayarlanmaktadır.

Zemin için belirlenen etkenler ayarlanırken yaklaşıklıklar içerir ve değerler tam kesinliğe dayandığından yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bunun için SAC-SMA'da bütün olaylar birbirine kesin denklemlerle bağlandığından herhangi bir değerde yapılacak hata tüm modelde hatalar zincirine sebebiyet verebilecektir. Neticede, ulaşılmak istenen sonuç çok daha hatalı hesaplanabilecektir.

Çizelge 3.1 : SAC-SMA model etkenleri.

Etken	Açıklama
UZTWM	Üst bölge tutunan su yeteneği (kapasitesi)
UZFWM	Üst bölge serbest su yeteneği
UZK	Üst bölge serbest su kısmından araakış boşalma oranı
ZPERC	En çok ve en az derin sızma (perkolasyon) oranı
REXP	Derin sızma eğrisinin şekil etkeni
LZTWM	Alt bölge tutunan su yeteneği
LZFSM	Alt bölge ikincil serbest su yeteneği
LZFPM	Alt bölge birincil serbest su yeteneği
LZSK	Alt bölge ikincil serbest su kısmından taban akışı boşalma
LZPK	Alt bölge birincil serbest su kısmından taban akışı boşalma
PFREE	Derin sızma alt tabaka serbest su kısmına giden
PCTIM	Sürekli geçirimsiz alan kısmı
ADIMP	Doygunluktan dolayı ek geçirimsiz alanın en fazla kısmı
RIVA	Bitki örtüsü kısmı
SIDE	Alt bölge serbest su kısmından derin sızma oranı
RSERV	Alt tabaka serbest su kısmından tutunan suya geçemeyen kısım
UZTWC	Üst bölge tutunan su içeriği
UZFWC	Üst bölge serbest su içeriği
LZTWM	Alt bölge tutunan su içeriği
LZFSM	Alt bölge ikincil serbest su içeriği
LZFPM	Alt bölge birincil serbest su içeriği

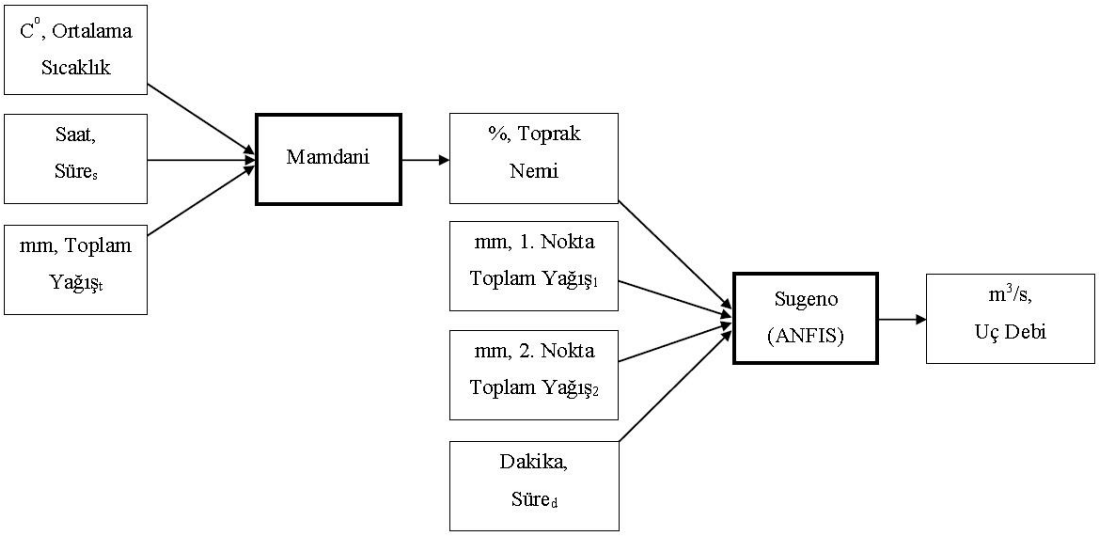


Şekil 3.14 : SAC-SMA Modelinde etkenlerin görev dağılım resmi.

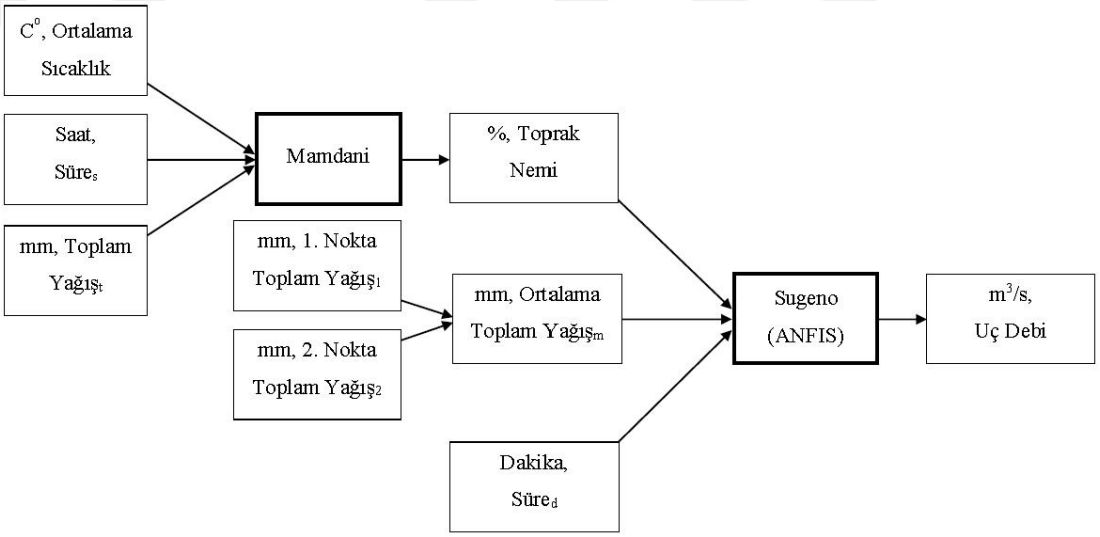
SAC-SMA modelinin en önemli özelliği ve hedefi toplam nem durumunu belirleyerek sonuca gitmektir. Bunun için 21 tane etkenin bilinmesi ve doğru ayarlanması gerekmektedir. Bu değerler arasından sıcaklığın etkisini dikkate alan bir değerin bulunmaması önemli bir kayıptır. SAC-SMA modeli tahmini alansal ortalama yağışa ve TTB'ya ihtiyaç duymaktadır. Bunların yanında, havzada gözlemlenmiş hidrograflar da akış tahmini için önemlidir. SAC-SMA çok fazlaca veriye ihtiyaç duyduğundan pek kullanışlı değildir. Türkiye'de veri sorunu vardır, taşkınla alakalı ölçümler çok azdır ama değişik kişiler tarafından kazanılmış tecrübeler vardır.

BZM veriye fazlaca ihtiyaç duymaksızın sözel kurallarla, geçmiş tecrübelerle, kabul yapmaksızın küçük büyük Türkiye'nin hatta dünyanın tüm havzaları için uygun bir model durumunu temsil etmektedir. SAC-SMA modelinin uygulanması için havzaya ait önceki yağış, akış ve TTB verileri gereklidir. Buharlaşma kayıpları havzanın belli yerlerinde ölçümlerin yapıldığı buharlaşma tavaları ile belirlenirken, terleme ve tutma kayıpları uzmanların havzanın bitki durumuna göre belirlediği değerlere göre ifade edilmektedir. Uzman görüşlerin en çok dikkate alındığı BZM sayısal verilere ilave sözel bilgileri de işlemesi bakımından daha etkindir. SAC-SMA modelinin ayarlaması (kalibrasyonu) yapılsa bile belli bir yerde hata belirdiği düşünüldüğü durumda uzman müdahalesi yapılmaktadır. Uzman görüşlerinin son derece önemsendiği BZM, tahmin için diğer modellere göre daha üstündür.

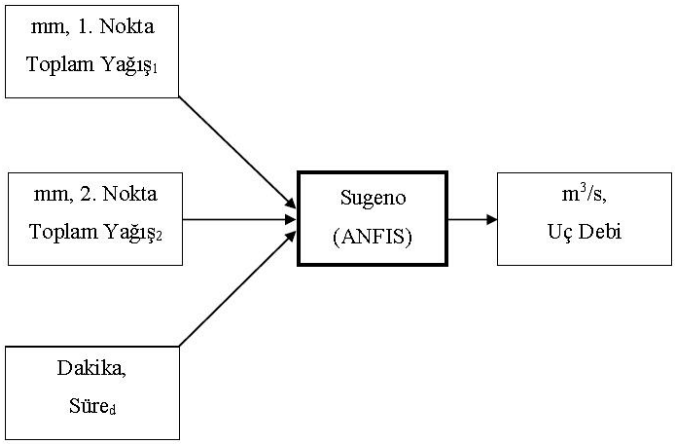
BZM içerdiği veriler açısından SAC-SMA modeline göre çok daha az veri içerse de, toplamda 7 tane değişik veri takımı ile ayarlanabilmektedir. BZM'nin SAC-SMA ile en önemli ortak özellikleri olayları zincirleme düşünmesi ve toprak nemini ihtiva etmesidir. Sıcaklığı dikkate alması da ayrıldığı noktadır. Netice itibariyle taşkın, hidrograf veya uç debi tahmini, içinde birçok belirsizliği barındıran zor bir meseledir. Özellikle, küçük havzalarda bu belirsizlikler sebebiyle tahminler daha da zor bir hal almaktadır. BM ile belirsizlikler bulanık bir hale getirildiğinden tahminlerin zorluğu hafifletilebilecektir. Bu düşünceyle, BM ile modelleme sayesinde bazı önemli değişkenler dikkate alınmak suretiyle yeni modeller kurulmuştur. Burada uç debiyi tahmin etmek için iki tane BZM (Şekil 3.15 ve 16) kurulurken iki tane de BM (Şekil 3.17 ve 18) kurulmuştur. Güçlü ve Şen (2016) BZM'yi önceki çalışmalara (literatüre) dahil etmişlerdir. Bu makalenin tüm metni EK-A'da ayrıca sunulmuştur.



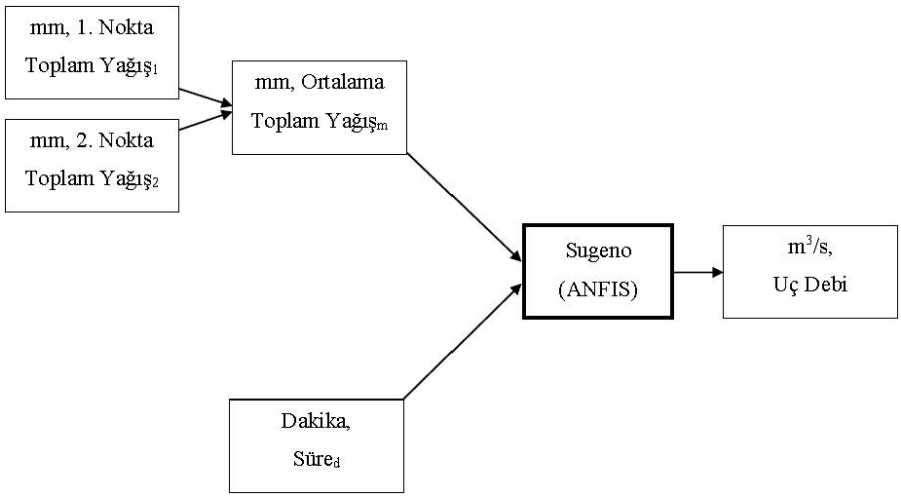
Şekil 3.15 : BZM I.



Şekil 3.16 : BZM II.



Şekil 3.17 : BM I.



Şekil 3.18 : BM II.

Bütün şekillerdeki kutu içine alınmış ifadelerin açıklaması aşağıda açık bir biçimde izah edilmiştir.

1) Ortalama Sıcaklık: Şimdiki yağış ile bir önceki yağış arasında geçen süre zarfındaki ortalama sıcaklık,

2) $Süre_s$: Şimdiki yağış ile bir önceki yağış arasında geçen saat,

3) Toplam $Yağış_t$: Bir önceki yağış olayında iki noktada ölçülen toplam ortalama yağış,

4) Toprak Nemi: Girdiler; Ortalama Sıcaklık, $Süre_s$, ve Toplam $Yağış_t$ ile Mamdani BÇY ile çıktı şeklinde elde edilen toprak neminin yüzde değeri,

5) Toplam $Yağış_1$: Şimdiki yağışta birinci noktada (Olimpiyat) ölçülen veya tahmin edilen toplam yağış,

6) Toplam $Yağış_2$: Şimdiki yağışta ikinci noktada (212) ölçülen veya tahmin edilen toplam yağış,

7) Toplam $Yağış_m$: Şimdiki yağışta birinci ve ikinci noktada ölçülen veya tahmin edilen toplam yağışın ortalaması,

8) $Süre_d$: Birinci ve ikinci noktada ölçülen veya tahmin edilen yağışın süresi,

9) Uç Debi: Girdileri; Toprak Nemi, Toplam $Yağış_1$, Toplam $Yağış_2$, (veya Toplam $Yağış_m$) ve $Süre_d$ iken ANFIS'in çıktısı biçiminde elde edilen debi değeri.

BZM'leri Mamdani ve Sugeno (ANFIS) isimli iki halkadan meydana getirilmiştir. Mamdani BÇY'nda sözellik tam anlamıyla hâkimiyet kurduğundan modelin girdi ve

çıktısına ait herhangi bir veri takımı bulunmasa da, cümleler ve sözler sayısallaştırılabilir, çünkü girdiler gibi çıktılar da bulanıklaştırılmaktadır. Yine aynı şekilde, girdilere ait veriler çıktıya ait bir veri takımı bulunmasa bile aynı mantıkla çıktı sayısallaştırılabilir. Önerilen BZM'de Mamdani BÇY kullanılırken ilgili üç veri takımı elde edilmişse de, çıktı biçimindeki toprak nemi değerlerine ait herhangi bir veri yoktur. Bu sebeple, eldeki girdi verileri ile toprak nemi yüzdesini elde etmek için birinci halkada Mamdani BÇY kullanılmıştır. Sugeno BM çıkarım yapısında girdiler her ne kadar bulanıklaştırılsa bile çıktı için bir takım kesin sayısal ifadeler belirlemek gerekir. Bu çıkarım yapısında hem girdi hem de çıktı değerleri ölçülmelidir. Sugeno BÇY'na göre tasarlanmış ANFIS yazılımının kullanılması için modele sokulacak tüm veri takımlarının elde edilmesi gerekmektedir. Bu bilgiler düşünülerek, önerilen BZM'nin ikinci halkasında ANFIS (Sugeno) yazılımı kullanılmıştır. Diğer taraftan, BM I ve BM II'de toprak nemi hesabına gerek görülmediğinden ve geriye kalan tüm veriler bulunduğundan, sadece ANFIS ile çalışma yapılmıştır.

Bilindik modeller farklı zamanlarda aynı özellikteki yağışın ortaya çıkaracağı uç debiyi sabit verirken, BZM'leri toprak nemliliğinin durumunu da dikkate aldığı için uç debi değişebilecektir. BZM II'nin üretilme sebebi yağışın ortalaması ile hesap yapıldığında BZM I'e nazaran sonucun nasıl değiştiğini ortaya koymasıdır. Burada ortalama alınırken, Thiessen yöntemi (1911) kullanılmış ve bu yöntemin gerektirdiği işlemler BZM II için ayrıca yapılacaktır. BZM I için fazladan bu işleme gerek duyulmadığı gibi her bir yağış ölçüm noktasının katkısı ANFIS sayesinde ayrı ayrı dikkate alınacak ve sonuçlar gerçeğe daha yakın çıkabilecektir. Her iki BZM'nde toprak nemi hesaplanırken ortalama yağışa göre model kurulmuştur.

Bu çalışmada ayrıca BM I ve BM II adında iki model daha önerilmiştir. BZM'nde fazladan üç veri takımına (Ortalama Sıcaklık, $Süre_s$, ve Toplam $Yağış_t$) daha ihtiyaç duyulmaktadır. Her havzada hassas ölçüm yapılamayacağı için zincirin Mamdani halkası çıkarılmıştır (Şekil 3.17 ve 18). Böylece veri takımı sayısı üç azaltılarak ve geriye kalan veri takımları sadece ANFIS'e sokularak tahminler elde edilebilecektir. Bu durumda BM I ve BM II'nin sonuçları bilindik modellerin uç debi tahminleri gibi sabitleşecektir, çünkü toprak nemliliği dikkate alınmamaktadır.

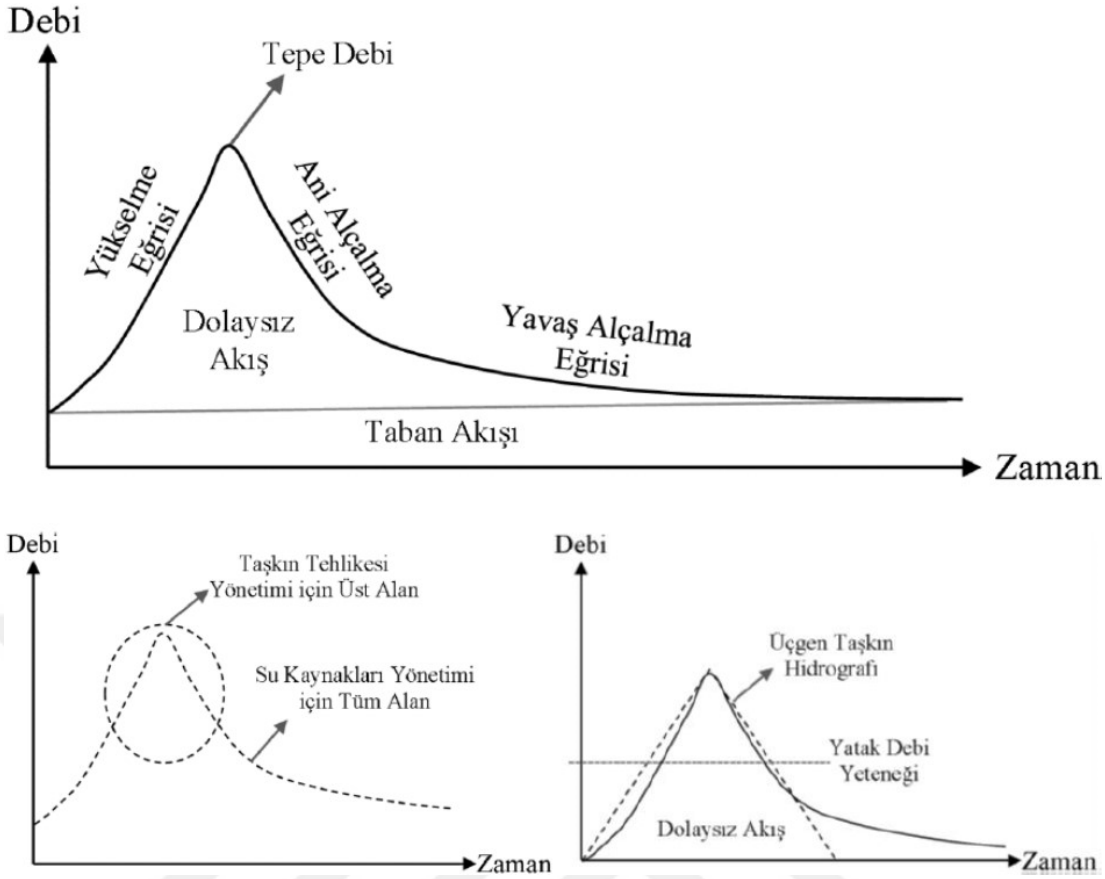
Önerilen BZM ve BM'ler sadece uç debi tahmin etme yeteneğine sahiptir. Taşkın haritalarının meydana getirilmesi ve su kaynakları yönetimi gibi önemli konular için

hidrograflara ihtiyaç duyulmaktadır ve böylece tahmini gerçekleştirilen uç debiler kullanılarak hidrograflar çizdirilmelidir.

3.5 Boyutsuz Birim Hidrograf (BBH)

Mühendislik hidrolojisi bakımından yüzey akışının önemi, belirli zaman sürelerinde ne kadarlık bir hacmi verilen bir kesitten geçtiği ve uç (ekstrem) durumlarda bunların aşırı değerlerinin (taşkın gibi) ne kadar olacağının hesaplanabilmesidir. Akış hacimleri ve taşkın miktarları yapılacak biriktirme haznesi hacminin, veriminin ve konumunun belirlenmesi için gerekliliği kadar taşkın değerleri tarım, yerleşim ve endüstri alanlarının zarar görmemesi için nerelere ve nasıl koruma su yapıları (bentler, istinat duvarları, dere islahları, vb.) yapılması konusunda gereklidir. Yağışlardan sonra yeryüzüne varan sular burada sızma, buharlaşma ve önce yeryüzünden tabaka halinde yolunu aşağılara doğru bularak içine gireceği akarsu yatağına ulaşır.

Özetle, bir hidrograf iki açıdan dikkate alınır. Birincisi, su kaynakları, ikincisi ise taşkın yönetimi açısıdır. Su kaynakları yönetimi için elde edilen veya tahmin edilen bir hidrografın altındaki tüm alan yani ortaya çıkan bütün hacim son derece önemlidir ve hesaba katılmalıdır. Diğer taraftan, taşkın tahmin yönetiminde hidrografın ani yükselen ve düşen kısmlarının altındaki alan dikkate alınmalı ve hacim hesabı yapılmalıdır (Şekil 3.19). Taşkına sebebiyet veren ve su basmasını meydana getiren su hacimi bu kısımdaki hacimdir. Aynı şekil üzerinde bir hidrografa ait kısımlara da yer verilmiştir.

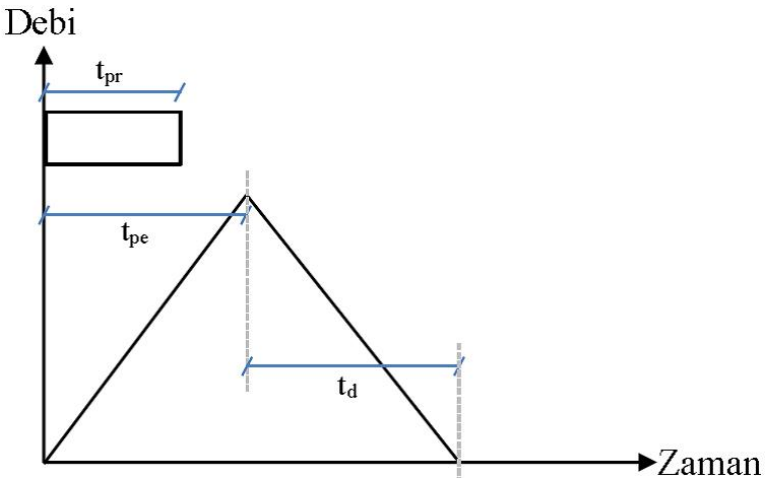


Şekil 3.19 : Hidrografın kısımları ve üçgen hidrograf.

Özellikle, küçük havzaların üçgen taşkın hidrografı için uç debiden sonra üç tane zaman değeri önemlidir. Bunlar dakika birimine sahip yağışın süresi (t_{pr}), uç debinin ortaya çıkması için geçen süre (t_{pe}) ile çekilme (düşüm) için geçen süredir (t_d) (Şekil 3.20). Uç debi ve bu üç süre belirlendiği taktirde, üçgen taşkın hidrografı çizdirilebilir. Hidrograf için uç debi BZM ile belirlenirken ve yağışın süresi de meteorolojik tahmin ile elde edilirken geriye kalan iki süre ortaya koyulmalıdır. İşte tam bu noktada, geçmiş olaylardan kazanılan tecrübe devreye girmektedir. Bu çalışmada 23 olaydan 15'i eğitim için 8'i ise deneme için kullanılırken, eğitim aşamasında t_{pe}, t_{pr}'ye, t_d ise t_{pe}'ye bağlanmıştır (Denklem 3.1 ve 3.2). Burada c_{pe} ve c_d eğitim sonrasında elde edilen sabit dakika değerleridir.

$$t_{pe} = t_{pr} + c_{pe} \tag{3.1}$$

$$t_d = t_{pe} + c_d \tag{3.2}$$



Şekil 3.20 : Üçgen Hidrograf üzerinde t_{pr}, t_{pe} ve t_d katsayılarının tanımlanması.

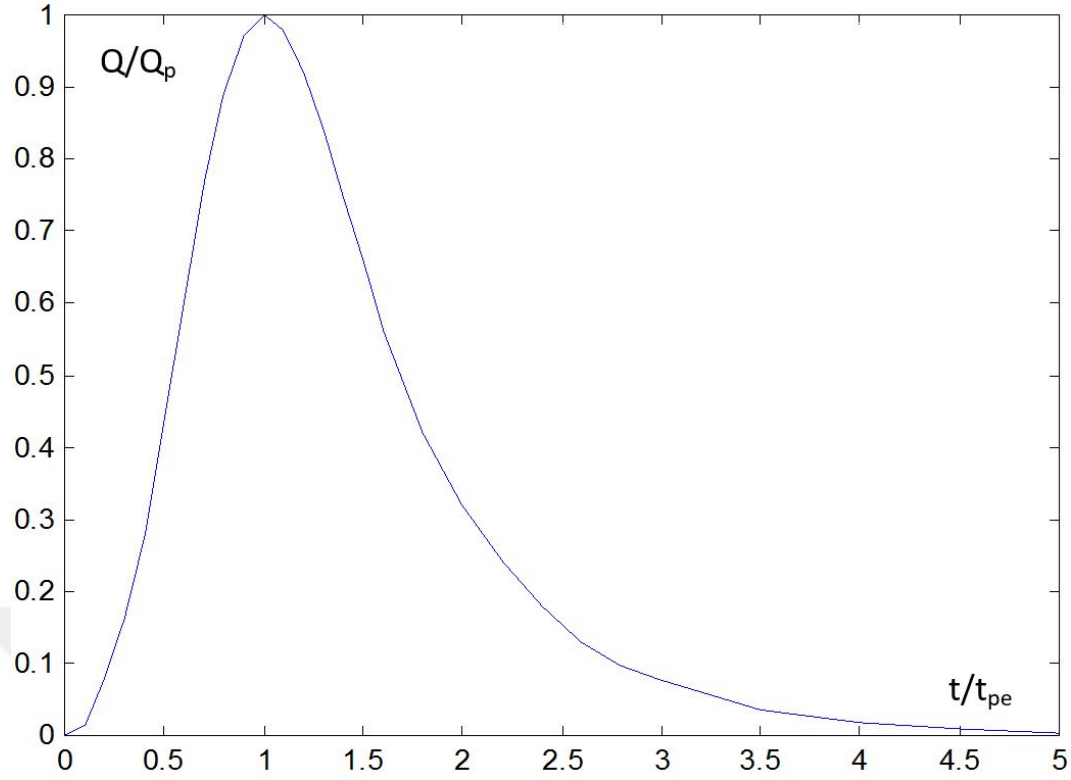
Yukarıda açıklanan t_{pe} ve tepe debisi, Q_p, hesaplamalarının yapılmasından sonra birim hidrograf taban süresi de göz önünde tutularak bir üçgen olarak tesbit edilebilir. Ancak BBH koordinatları sayesinde üçgen hidrograftaki t_{pe} ve Q_p ile gerçeğe son derece yakın boyutlu hidrograf elde etmek mümkündür.

Dünyada yapılmış çok sayıdaki boyutsuz hidrograf çalışmalarının hemen hepsinin yükselme ve tepe noktaları ile çekilme eğrisinin başlangıcındaki büyük bir kısmı birbirine % 5'lik hata ile yakındır. Farklılık ancak çekilme eğrisinin kuyruk kısmında olur. Bu farklılık ise uygulamada hidrolojik hesaplamalar açısından pek önemli değildir.

BBH, istenen boyutlu birim hidrografın tepe debisi, Q_p ve ortaya çıkış süresi, t_{pe}, Q/Q_p ve t/t_{pe} oranlarının değişimi şeklinde ortaya çıkar. BBH Çizelge 3.2'de sunulan oranlara göre çizdirilerek Şekil 3.21'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : BBH oranları.

t/t_{pe}	Q/Q_p	t/t_{pe}	Q/Q_p	t/t_{pe}	Q/Q_p	t/t_{pe}	Q/Q_p
0	0	0.7	0.77	1.4	0.75	2.6	0.13
0.1	0.015	0.8	0.89	1.5	0.66	2.8	0.098
0.2	0.075	0.9	0.97	1.6	0.56	3	0.075
0.3	0.16	1	1	1.8	0.42	3.5	0.036
0.4	0.28	1.1	0.98	2	0.32	4	0.018
0.5	0.43	1.2	0.92	2.2	0.24	4.5	0.009
0.6	0.6	1.3	0.84	2.4	0.18	5	~ 0



Şekil 3.21 : BBH.

3.6 SCS-Snyder

3.6.1 Snyder yapay hidrograf yöntemi

Literatürde hidrograf üretmek veya tepe debi tahmini için birçok yöntem vardır.Bu çalışmada en önemlilerinden Snyder (1938) hidrograf yöntemi SCS kayıp yaklaşımı (1972) ile birleştirilerek uygulanmıştır. Snyder ve SCS tarafından ölçümün yapılmadığı havzalar için havza özelliklerine göre bazı denklemler önerilmiştir. Bu denklemler kullanılarak yapay hidrograf için gerekli değerler elde edilmektedir. Diğer taraftan bir havzada gerekli ölçümler yağış-akış verileri elde edilmişse yağış-akış ilişkilerine ve gözlenmiş hidrograflara göre ortalama değerler bulunabilmektedir.

Snyder yönteminde havza özelliklerini bildikten sonra hidrografı ifade eden iki değer vardır ve onlar bilindiği takdirde yağışa karşı hidrograf belirlenebilmektedir. Birinci değer uç debiye ulaşmak için geçen süreyi ifade eden boyutsuz C_t ikincisi ise uç debiyi ifade eden boyutsuz C_p katsayısıdır. C_t nin değişim aralığı çoğunlukla 0,5-2 arasında iken C_p nin ise çoğunlukla 0,5-1 arasındadır. Bu çalışmada ilgili katsayılar yağış-akış kayıtları kullanılarak aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır.

$$T_p = 0.75\, C_t \left(LL_c\right)^{0.3} \tag{3.3}$$

$$C_p = \frac{Q_p T_p}{2.78A} \tag{3.4}$$

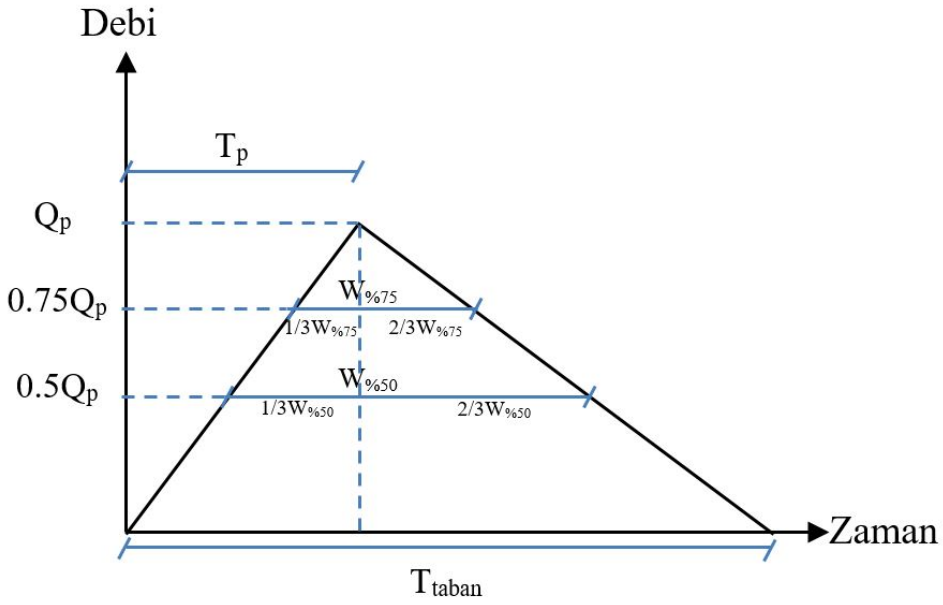
T_p, hidrografta uç debinin ortaya çıkması için geçen süre, L, mecra (kanal) uzunluğu (km) L_c, havza merkezinin esas mecra üzerindeki z düşümünün çıkış noktasına uzaklığıdır (km).

Hidrograf çizdirebilmek için ayrıca üç değer daha hesaplanmalıdır. Bunlar; T_{taban}, hidrografın taban uzunluğu (saat), $W_{\%50}$, uç debi değerinin %50'sine (yarısı) denk gelen kısmın hidrograf genişliği (saat) ve $W_{\%75}$, uç debi değerinin %75 (dörtte üç)'ine ait genişliktir (saat).

$$T_{taban} = 72 + 3T_p \tag{3.5}$$

$$W_{\%75} = 1.22 Q_p^{-1.08} \tag{3.6}$$

$$W_{\%50} = 2.14 Q_p^{-1.08} \tag{3.7}$$



Şekil 3.22 : Snyder yapay hidrografı genişlikleri.

3.6.2 SCS kayıp yöntemi

Snyder yapay hidrografını sonraki yağışlarda kullanmak için artık yağışları bilmek gerekecektir. Bu sebeple ölçülmüş yağış-akış olaylarından ilgili havza için kaybı ifade eden eğri numarası, EN ve başlangıç kaybı, I_A (initial abstraction) (SCS, 1972) ayarlanmalıdır. Böylece artık yağış bulunarak hidrograf kolayca belirlenebilecektir. Bu iki değerin belirlenmesi halinde aşağıdaki denklem ile artık yağış miktarı, P_e mm cinsinden hesaplanabilecektir. Aynı denklemde bulunan mm birimindeki P ise toplam yağışa karşılık gelmektedir.

$$P_e = \frac{(P - I_A)^2}{P - I_A + (\frac{25400}{EN} - 254)} \tag{3.8}$$

Denklemdeki I_A değeri ilgili havza için belirlenememesi durumunda aşağıdaki denklem ile bu değer mm cinsinden hesaplanabilmektedir.

$$I_A = 0.2 \frac{25400 - 254\,EN}{EN} \tag{3.9}$$

Denklem 3.8 kullanılarak başlıca EN'ları ile Şekil 3.22'deki eğriler çizdirilmektedir. 1986 yılında USDA-NRCS tarafından hazırlanan TR-55 isimli yayındaki bu şekil inç (25,4 mm) birimi kullanılarak sunulmuştur.

SCS kayıp yöntemi yağış-akış ilişkisini arazi kullanımı ve toprak özelliklerini kullanarak ele almaktadır. Havzanın eğri numaraları belirlenirken öncelikle çalışma sahasının arazi kullanım ve toprak özellikleri ele alınmalıdır. Toprak özellikleri içerisinden ilgili etkenler değerlendirilerek havza için hidrolojik toprak cinsi atanmalıdır. Hidrolojik toprak cinsleri A, B, C ve D şeklindedir (Çizelge 3.3). A Cinsi topraklar geçirimliliği en yüksek toprakları ifade ederken, D Cinsi topraklar en düşük geçirimlilik değerine sahip kil veya beton zeminleri ifade etmektedir.

Hidrolojik zemin sınıflandırmasının ışığı altında değişik şartlar altında uygun EN'ları Çizelge 3.3'ten alınmalıdır. Bu çalışmada gözlemlenmiş yağış-akış kayıtları bulunduğundan EN değeri hesaplar ile elde edilmiştir.

SCS yönteminde önceki 5 günlük toplam yağışa göre nem koşullarını da ifade eden AMC (Antecedent Moisture Condition) I, II ve III şeklinde sınıflandırma mevcuttur

(Çizelge 3.4). Çizelge 3.3 ile havzalar için ayarlanan EN değerleri AMC II toprak nemi sınıfına göre belirlenmiştir. Eğer bir havzadaki nemlilik durumu AMC I veya AMC III ile ifade edilecek koşullarda ise o zaman EN değerinde bir azaltma veya artırım söz konusudur. Çizelge 3.5'te AMC II şartlarında EN değerlerine karşılık AMC I ve III durumunda dikkate alınması gereken EN değerleri yazılmıştır.

Çizelge 3.3 : Zemin türlerine göre eğri numaraları.

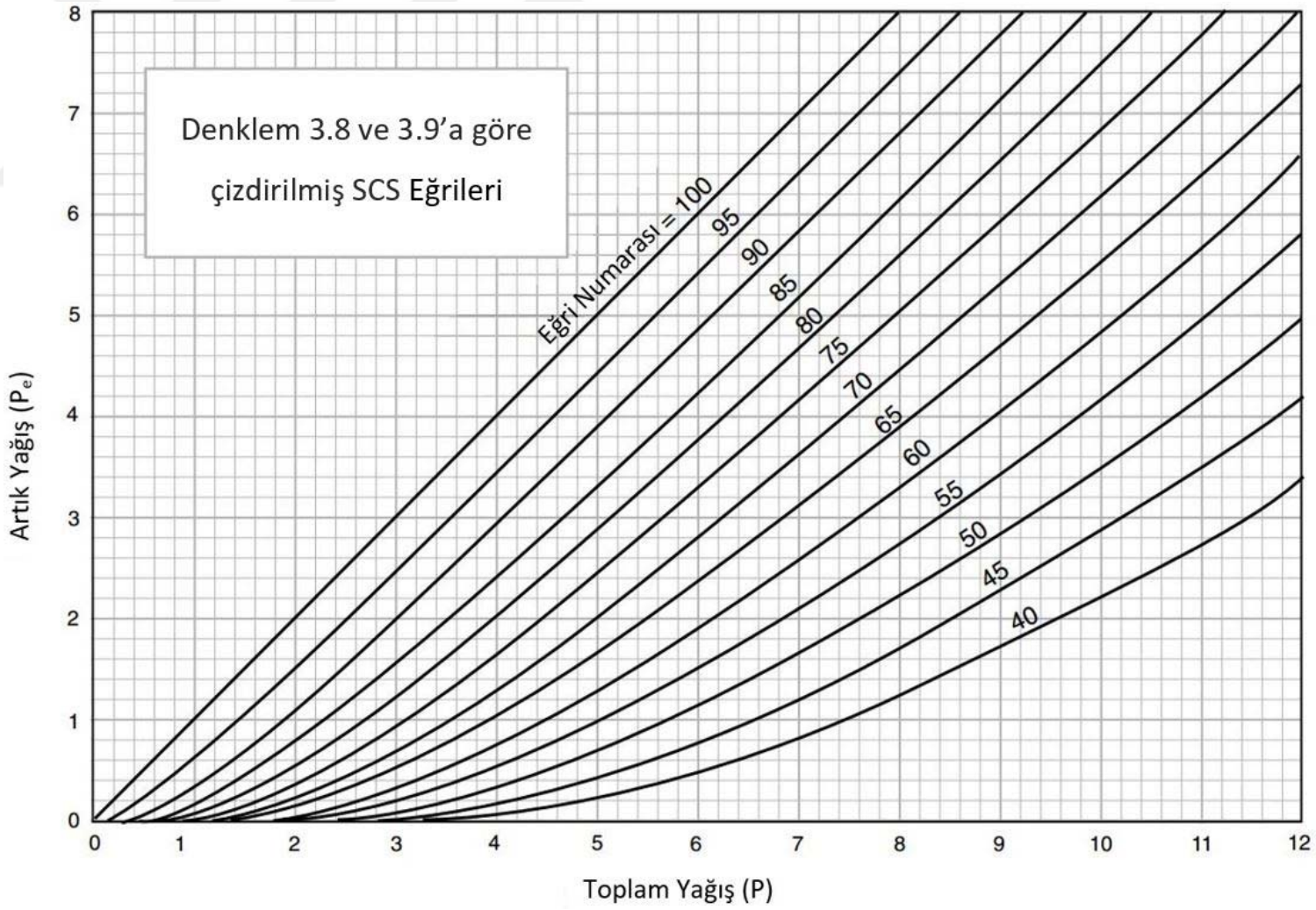
Arazi kullanım tasviri	Hidrolojik toprak cinsleri			
	A	B	C	D
Ziraat alanları-Korumalı	72	81	88	91
Korumasız				
Çayır ve çayırlık alanlar	62	71	78	81
Zayıf şartlarda	68	79	86	89
İyi şartlarda çimen alanları	39	61	74	80
İyi şartlarda				
Çalılık ve ormanlık alanlar	30	58	71	78
İnce dokulu ve az örtülü	45	66	77	81
Kalın dokulu ve iyi örtülü	25	55	70	77
Açık alanlar, parklar, mezarlıklar, vb.				
İyi şartlar: En az %70' çimen örtülü	39	61	74	80
Orta şartlar: Çimen örtüsü %50-%70				
İş ve ticaret alanları	49	69	79	84
%85'i geçirimsiz sanayi alanları	89	92	94	95
% 72'si geçirimsiz yerleşim alanları	81	88	91	92
Kaplamalı alanlar	51	68	79	84
Parklar, çatılar, yollar, vb.				
Sokak ve yollar	98	98	98	98
Kaplamalı ve yağış drenajlı	98	98	98	98
Çakıllı	76	85	89	91
Stabilize (Dengeli)	72	82	87	89

Çizelge 3.4 : Önceki yağışlara göre SCS toprak nemi sınıflandırması (mm).

Topram Nemi Sınıfı	Kış (Ölü) veya Sararma Mevsimi	Yeşil veya Yeşillenme Mevsimi
AMC I (Kuru)	<12.5	<35.5
AMC II (Nemli)	12.5-28	35.5-53.5
AMC III (Doygun)	>28	>53.5

Çizelge 3.5 : AMC II koşuluna karşılık AMC I ve III koşulunda EN değerleri.

EN - AMC II	EN - AMC I	EN - AMC III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
0	0	0



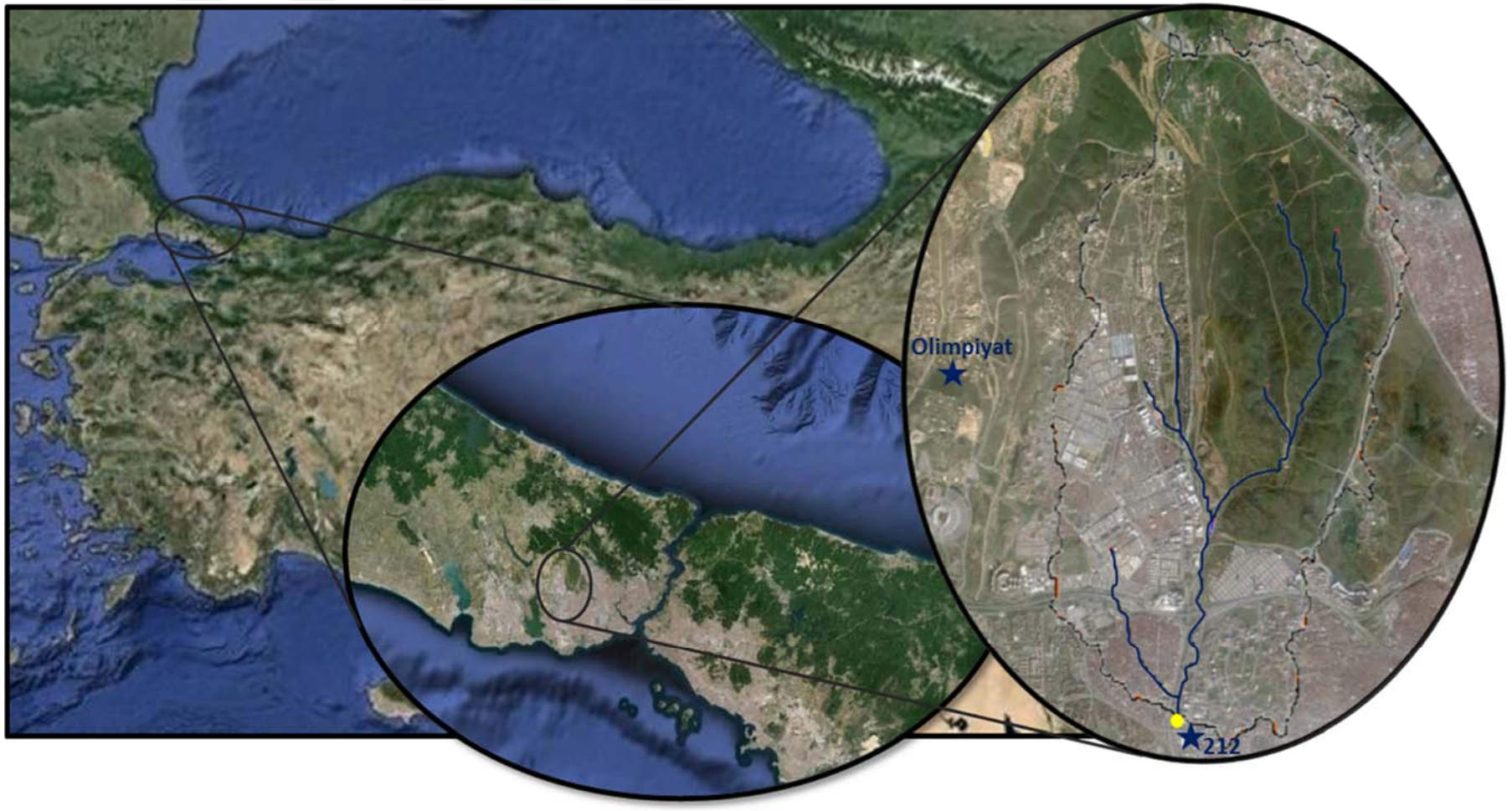
Şekil 3.23 : SCS eğrileri.

4. UYGULAMA

4.1 Çalışma Alanı ve Veriler

İstanbul 7 tepeden meydana gelen, doğudan batıya yaklaşık 200 km, güneyden kuzeye 60 km uzunluğunda, 647 km kıyı uzunluğu ile 5.343 km^2'lik alana sahip, 247 derenin bulunduğu çok büyük bir şehirdir. Derelerin bir bölümü hızlı şehirleşme neticesinde yerleşim alanı içerisinde kalan İstanbul'da, tekerrür aralığı 25 yılı aşan yağış bile görüldüğünde, derelerde irili ufaklı taşkınlar meydana gelerek yerleşim alanları sular altında kalmaktadır. Mesela, 2009 yılında meydana gelen ve 300 yılda bir rastlanan taşkınlardan Küçükçekmece ile Başakşehir ilçelerinin etkilendiği ve onlarca insanın hayatını kaybettiği görülmüştür. Ayamama Deresi'nde meydana gelen taşkın, bu olayların en önemlilerinden ve en güncel emsallerindendir. İstanbul'un Avrupa Yakası'nda konumlanan bu dere ve kollarının bulunduğu havzanın merkez noktasının enlemi 41.058^o K, boylamı da 28.818^o D'dur. Bu derenin havzası toplam 68.9 km^2 alana sahiptir. Ayrıca yeşil alanların ve şehirleşmenin bulunduğu havzanın deresi Başakşehir ilçesinin doğu kesimlerinden akışa geçer, Bağcılar ve Bahçelievler ilçelerini katederek, Bakırköy ilçesinde sularını Marmara Denizi'ne döker. Ayamama Havzası üst ve alt şeklinde iki kısma ayrılırsa; alt taraf tamamen şehirleşmenin hâkimiyetindeki alandır. Üst kısım yeşil alanların ve şehirleşmenin beraberce öne çıktığı alanlara sahiptir.

Tez çalışmasında uygulama alanı Avrupa yakasının küçük havzalarından ve taşkın tehlikesinin bulunduğu Ayamama Deresi havzasının 40.1 km^2 alana sahip üst bölümü seçilmiştir (Şekil 4.1). Şimdiye kadar 2013'ün başından beri ilgili havza için İBB-AKOM'nde literatürdeki yöntemler kullanılarak önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar için elde edilen iki noktadaki (212 ve Olimpiyat) yağış, çıkış noktasındaki akış, yağış süresi ve sıcaklık birbirinden bağımsız iki yağış arasındaki süre şeklinde veriler elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Ayamama havzası ve konumu.

Çoğunlukla, meteorolojik kuraklığın bulunduğu iki sene boyunca güvenilir ve dikkate alınabilir toplam 23 yağış olayı elde edilirken, bunların 15 tanesi modellerin eğitimi için geriye kalan 8 tanesi ise modellerin sınaması için kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de toplam 23 olaya ait ölçülen verilerin tamamı eklenmiştir ancak bazı veriler "*" işareti ile kapatılmıştır.

Çizelge 4.1 : 23 olaya ait tüm ölçümler.

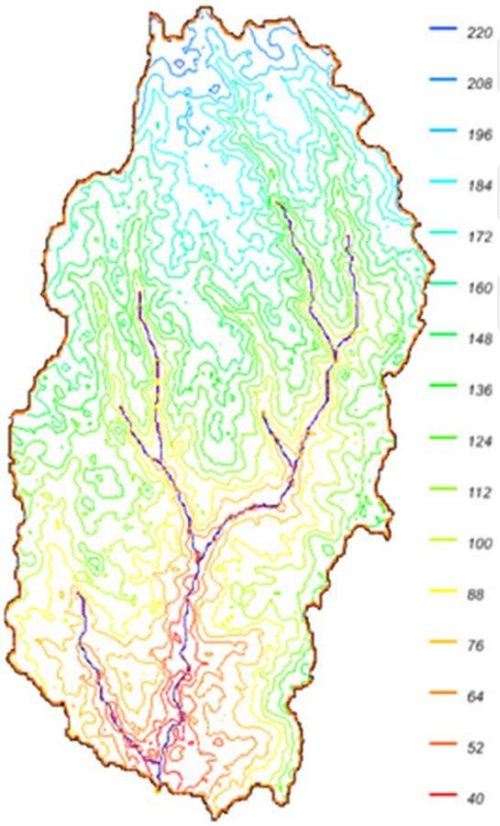
Olay no	Toplam Yağış$_t$ (mm)	Süre$_s$ (saat)	Ortalama Sıcaklık (^oC)	Süre$_d$ (x10 dk)	Toplam Yağış$_1$ (mm)	Toplam Yağış$_2$ (mm)	Uç Debi (m^3/s)
1	2.0	30	20.0	2	11.8	0.8	*
2	2.0	50	25.6	4	3	0.8	*
3	3.4	0.75	17.2	5	0	*	2.01
4	2.8	1	22.0	2	5	*	2.37
5	2.0	300	22.5	3	*	4.6	3.85
6	2.8	25	13.0	*	1.2	3.4	5.26
7	1.4	95	*	3	5.4	2.6	2.49
8	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*	*	*	*
11	2.6	1	*	5	5	1.8	1.65
12	0.6	17	*	3	4.8	2.0	2.77
13	4.0	*	17.7	4	6.8	1.8	3.52
14	*	2	14.5	3	2.8	2	5.22
15	1.0	0.4	22.6	4	54.6	3.8	*
16	6.0	10	16.0	4	6	*	3.55
17	2.0	1.5	21.5	2	*	1.2	2.96
18	0.4	0.5	14.3	*	7.8	3.4	5.52
19	*	*	*	*	*	*	13.61
20	*	*	*	*	*	*	3.43
21	2.0	1.5	*	3	5.2	1.2	3.31
22	2.0	*	7.6	5	8.6	2.4	3.56
23	*	30	15.0	4	4.2	1.8	3.52

4.1 Modellerin Uygulama ve Kıyaslaması

Ayamama Havzası'na düşen yağışlardan meydana gelecek yüzey akışlarını bir noktaya toplanacak biçimde belirlenmesi gerekir. Ayamama Havzası hidroloji çalışmaları için havza sınır, alan, çıkış noktası ve birçok yüzey şekli büyüklükleri sayısal yükselti modeli (SYM) verilerinin Su Vakfı'nda bulunan ruhsatlı WMS (Watershed Modeling System) yazılımına girilerek elde edilmesi sağlanmıştır. Hidroloji hesaplamaları için bu çıkış noktasına sularını toplayan alanın tesbiti

gereklidir. Yüzey suları topografik (yüzey şekline bağlı) duruma göre yüksek noktalardan aşağılara doğru akar. İşte WMS ile elde edilen yükselti haritaları yüzey suyunun akış doğrultularının belirlenmesine de yarar. Bir su toplama havzasının üzerine düşen her yağışın, akışa geçen kısmını yüzey suyu halinde çıkış noktasına getiren noktaların tümünü çevreleyen alana, o çıkış noktasının su toplama havzası denir.

Hidroloji hesaplamalarında en azından bu havzanın yüzey alanının bilinmesi gereklidir ve bu WMS ile SYM verilerinden yararlanarak belirlenir (Şekil 4.2). Bu şekilde elde edilen alanı sınırlayan gelişi güzel çizgiye su ayırım çizgisi adı verilir. Bu eğrinin üzerinde bulunan en düşük yükselti ise çıkış (mansap) noktasındadır.



Şekil 4.2 : Ayamama havzası SYM verisi.

WMS programının kullanımında ikinci aşamayı SCS-Snyder yapay hidrograf yönteminin uygulaması teşkil etmektedir. Kıyaslama için kullanılan SCS-Snyder modeli ile yeni önerilen iki bulanık ve iki bulanık zincir modellerinin uygulaması İstanbul Ayamama Havzası'nın üst bölümü için yapılmıştır. Elde edilen 23 yağış olayının 15'i modellerin ayarlanması ve eğitimi için kullanılırken, geri kalan 8 olay tahmin edilmiştir. Özellikle BZM I'e ait girdi-çıktı ayrıntıları Çizelge 4.2 ve 4.3'te sunulmuştur, ancak bazı veriler "*" işareti ile kapatılmıştır.

Çizelge 4.2 : BZM I için eğitim girdi ve çıktıları.

Olay no	Toprak nemi belirleme aşaması				Eğitim				
	Toplam Yağış$_t$ (mm)	Süre$_s$ (saat)	Ortalama Sıcaklık (^{o}C)	Toprak nemi (%)	Süre$_d$ (x10 dk)	Toplam Yağış$_1$ (mm)	Toplam Yağış$_2$ (mm)	Toprak nemi (%)	Uç Debi (m^3/s)
1	2	30	20	0.474	2	11.8	0.8	0.474	*
2	2	50	25.6	0.375	4	3	0.8	0.375	*
3	3.4	0.75	17.2	0.742	5	0	*	0.742	2.011
4	2.8	1	22	0.64	2	5	*	0.64	2.371
5	2	300	22.5	0.081	3	*	4.6	0.081	3.849
6	2.8	25	13	0.533	*	1.2	3.4	0.533	5.263
7	1.4	95	*	0.247	3	5.4	2.6	0.247	2.494
8	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*	*	*	*	*	*
11	2.6	1	*	0.59	5	5	1.8	0.59	1.649
12	0.6	17	*	0.333	3	4.8	2	0.333	2.766
13	4	*	17.7	0.608	4	6.8	1.8	0.608	3.522
14	*	2	14.5	0.634	3	2.8	2	0.634	5.216
15	1	0.4	22.6	0.359	4	54.6	3.8	0.359	*
Girdi-Çıktı	**Girdi-1**	**Girdi-2**	**Girdi-3**	**Çıktı**	**Girdi-1**	**Girdi-2**	**Girdi-3**	**Girdi-4**	**Çıktı**
BÇY	**Mamdani**				**Sugeno (ANFIS)**				

Çizelge 4.3 : BZM I için deneme girdi ve çıktıları.

Olay no	Toprak nemi belirleme aşaması				Eğitim					Uç Debi Gözlem (m^3/s)
	Toplam Yağış$_t$ (mm)	Süre$_s$ (saat)	Ortalama Sıcaklık (^oC)	Toprak nemi (%)	Süre$_d$ (x10 dk)	Toplam Yağış$_1$ (mm)	Toplam Yağış$_2$ (mm)	Toprak nemi (%)	Uç Debi Tahmini (m^3/s)	
16	6	10	16	0.649	4	6	*	0.649	3.05	3.546
17	2	1.5	21.5	0.511	2	*	1.2	0.511	2.80	2.957
18	0.4	0.5	14.3	0.303	*	7.8	3.4	0.303	3.66	5.516
19	*	*	*	*	*	*	*	*	13.86	13.606
20	*	*	*	*	*	*	*	*	3.52	3.433
21	2	1.5	*	0.511	3	5.2	1.2	0.511	4.19	3.309
22	2	*	7.6	0.505	5	8.6	2.4	0.505	3.80	3.560
23	*	30	15	0.646	4	4.2	1.8	0.646	2.96	3.522
Girdi-Çıktı	**Girdi-1**	**Girdi-2**	**Girdi-3**	**Çıktı**	**Girdi-1**	**Girdi-2**	**Girdi-3**	**Girdi-4**	**Çıktı**	**Ölçüm**
BÇY	**Mamdani**				**Sugeno (ANFIS)**					

SCS-Snyder için WMS programı altında çalışan HEC-1 ile yapılan eğitim sayesinde SCS kayıp yöntemi ve Snyder için ilgili tüm değer ve katsayılar ayarlanmıştır. Bu değerler sayesinde hidrograf çizdirilebilecek durumdadır, ancak ilk adımda sadece tepe debi değerleri diğer modellerle kıyaslamak için kullanılacaktır (Çizelge 4.4). Yeni önerilen yaklaşım ve diğer modeller sadece tepe debi tahmini üretme yeteneğine sahiptir.

Tez çalışmasındaki mevzu bahis ölçümlerde önceki nem koşulları SCS yöntemine göre AMC I yani kuru sınıfına girmektedir. Bu durumda havza için belirlenen EN tüm SCS-Snyder uygulamaları için azaltılmalıdır. Ancak bu durumda SCS-Snyder çıktı değerleri azalmak suretiyle 8 olaydan biri hariç tahminler daha da kötüleşecektir. Bu sebeple SCS yönteminin ilk hali (AMC II) nazarı itibara alınarak hidrograflar ortaya koyulacaktır. Çizelge 4.4'te SCS-Snyder'e göre her iki tahmine yer verilirken iki durumda da SCS-Snyder en kötü tahminci konumundadır.

Çizelge 4.4 : Gözlenmiş tepe debi değerleri ve modellerin tahmin sonuçları (m^3/s).

Olay no	Gözlem	BZM I	BZM II	BM I	BM II	SCS-Snyder (AMC II)	SCS-Snyder (AMC I)
1	3.55	3.05	3.49	2.91	2.52	0.59	0.54
2	2.96	2.80	1.67	2.25	2.17	0.88	0.81
3	5.52	3.66	4.15	4.11	4.08	2.98	2.73
4	13.61	13.86	29.10	12.88	15.54	37.22	34.10
5	3.43	3.52	3.85	5.30	4.26	2.61	2.39
6	3.31	4.19	4.75	2.81	2.35	0.18	0.16
7	3.56	3.80	2.21	2.03	4.38	2.75	2.52
8	3.52	2.96	3.57	2.76	1.71	0.09	0.08

BM I ve BM II tek aşamalı tasarlandığından dolayı üç girdiye (birinci ve ikinci noktada ölçülen yağış miktarı ve süresi) karşılık uç debi ve iki girdiye (ölçülen yağışın ortalaması ve yağış süresi) karşılık uç debi şeklinde ANFIS ile eğitim yaptırılmıştır. Bu aşamadan sonra BM modelleri tahmin yapmaya hazır hale gelmiştir ve tahminler elde edilmiştir (Çizelge 4.4). Bu modeller tek aşamadan şekillenmesi açısından literatürdeki (önceki) çalışmalara benzemektedir.

BZM I ve BZM II iki halkadan meydana geldiğini yukarıda belirtmiştik. ANFIS ile tahmin aşamasından önce nemlilik değerlerinin sayısallaştırılması gerekmektedir. Dolayısı ile, önce Mamdani BÇY ile yüzde olarak her olay için toprak nemi değerleri belirlenmiştir. Burada kurallar belirlenirken ilk önce üç girdinin (Ortalama Sıcaklık,

Süre$_s$, Toplam Yağış$_t$) nemlilikle ilişkileri mantıki anlamda aşağıdaki gibi düşünülmüş ve ona göre kural tabanı ortaya koyulmuştur;

1) Bir önceki yağış ile şimdiki yağış arasında geçen sürede ortalama sıcaklık ile toprak nemi arasında ters orantı vardır. Mesela, ortalama sıcaklık fazla ise toprak nemi azdır.

2) Bir önceki yağış ile şimdiki yağış arasında geçen süre ile toprak nemi arasında ters orantı vardır. Mesela, iki yağış arasındaki süre az ise toprak nemi fazladır.

3) Bir önceki yağış miktarı ile toprak nemi arasında doğru orantı vardır. Mesela, bir önceki yağış miktarı fazla ise toprak nemi de fazladır.

İlk aşamada bu mantıki düşünce ile toprak nemi değerleri belirlenmiş ve ANFIS eğitimi için hazır hale getirilmiştir. İkinci aşamada dört girdiye (toprak nemi, birinci ve ikinci noktada ölçülen yağış miktarı ve süresi) karşılık uç debi ve üç girdiye (toprak nemi, ölçülen yağışın ortalaması ve yağış süresi) karşılık uç debi şeklinde ANFIS ile eğitim yaptırılmıştır. Bu aşamadan sonra BZM'leri tahmin yapmaya hazır hale getirilerek tahminler elde edilmiştir (Çizelge 4.4).

Karşılaştırma için olaylar debi değerlerinin büyüklük ve küçüklüğüne göre ikiye ayrılmıştır. Buna göre büyük değerli 4. olay ve geriye kalan diğer olaylar için ayrı ayrı kıyaslama yapılmıştır. Çizelge 4.5 ve 4.6'da tüm modellerin hataları Ortalama Mutlak Hata (OMH)'ya göre hesaplanarak yazılmıştır. Denklemdeki N dikkate alınan olay sayısıdır.

$$\mathrm{OMH}=\frac{1}{\mathrm{N}}\sum\sqrt{(\text{Ölçüm}-\text{Tahmin})^2} \tag{4.1}$$

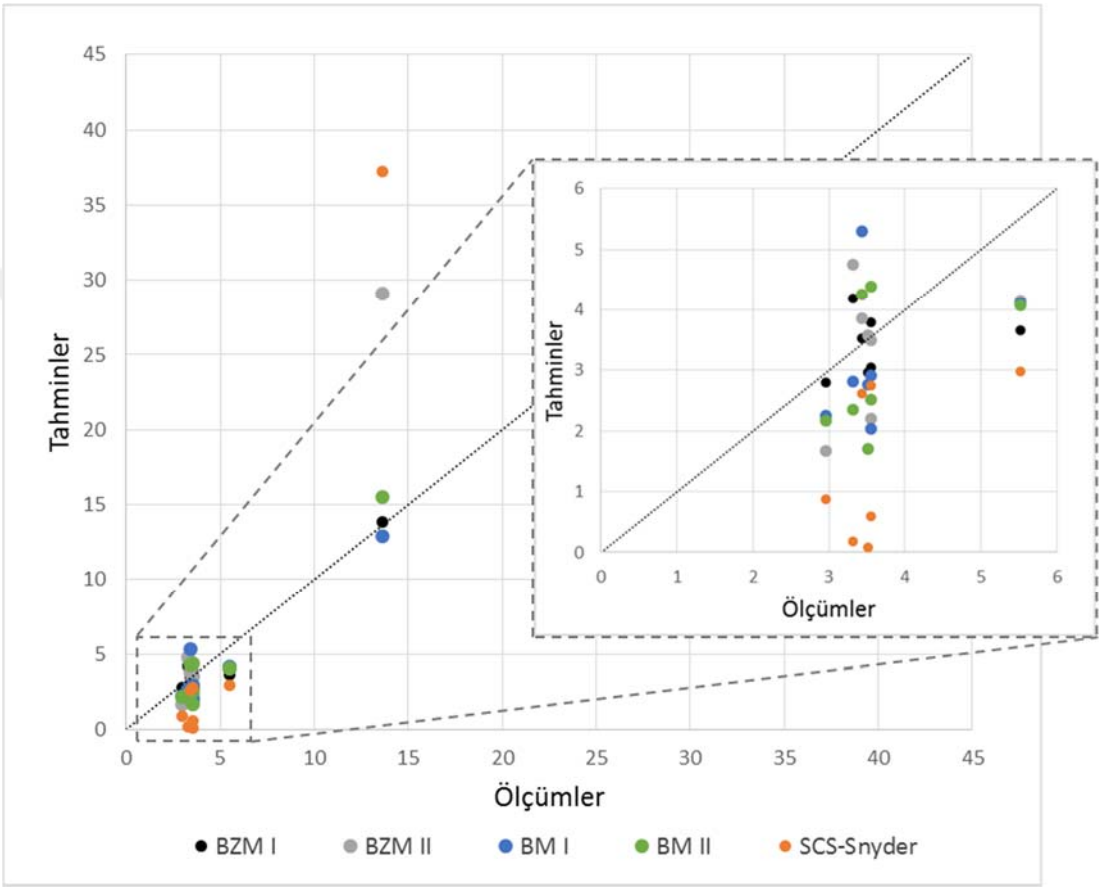
Çizelge 4.5 : Büyük değerli 4. olay için modellerin hataları (m^3/s) (N=1).

BZM I	BZM II	BM I	BM II	SCS-Snyder (AMC II)	SCS-Snyder (AMC I)
0.26	15.49	0.72	1.93	23.61	20.49

Çizelge 4.6 : Diğer olaylar için modellerin hataları (m^3/s) (N=7).

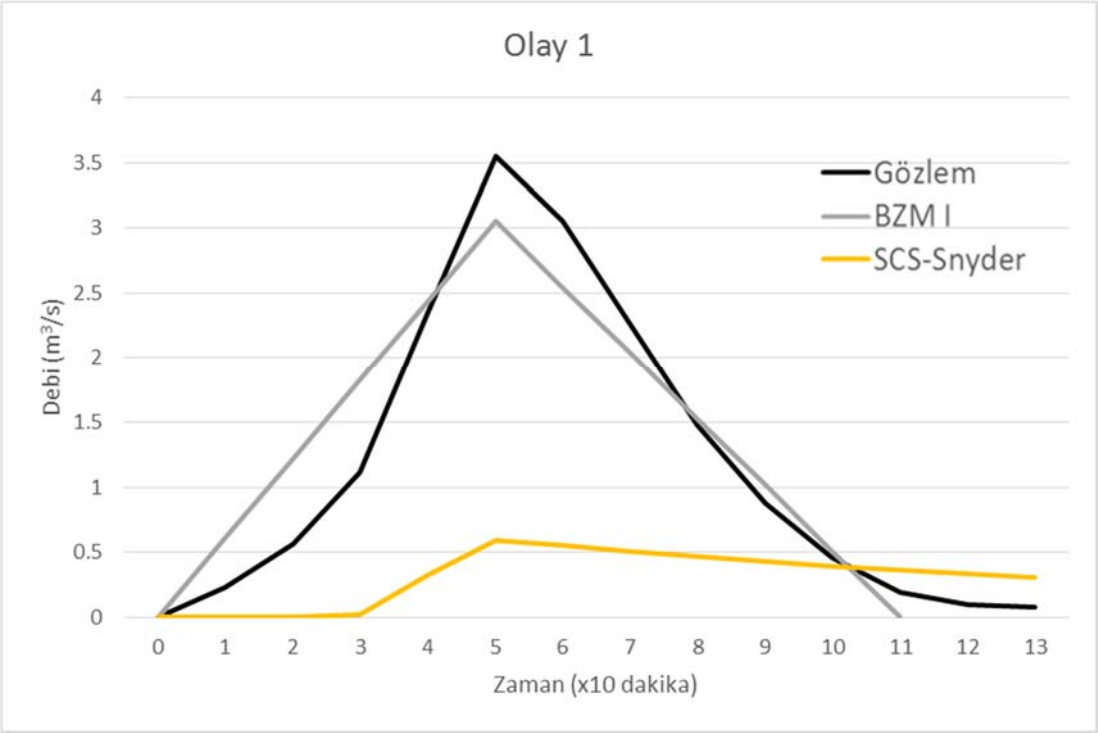
BZM I	BZM II	BM I	BM II	SCS-Snyder (AMC II)	SCS-Snyder (AMC I)
0.61	0.85	1.06	1.10	2.25	2.46

Çizelge 4.5 ve 4.6'dan görüldüğü üzere BZM I'in OMH değerleri tüm modellere kıyasla son derece tatmin edici olarak ortaya çıkmıştır. BZM I'in üstünlüğünü Şekil 4.3'te bulunan 1:1 mükemmeliyet doğrusuna yakınlığı ile de gösterilmiştir. En iyi model ürettiği tahminleri tahmin-ölçüm değerlerini üzerinde toplayan mükemmeliyet doğrusuna en çok yaklaştıran modeldir. Şekil üzerinde kıyaslanan SCS-Snyder çıktıları AMC II koşulu altında elde edilen tahminlerdir.

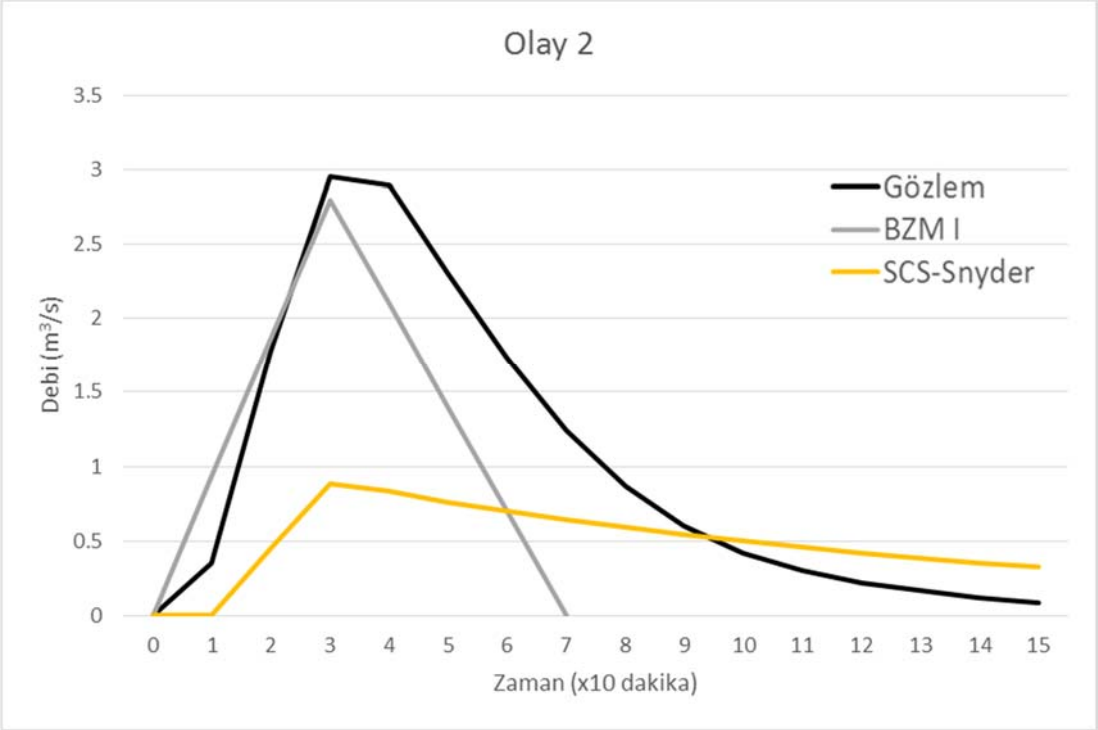


Şekil 4.3 : Modellerin mükemmeliyet doğrusuna göre konumu.

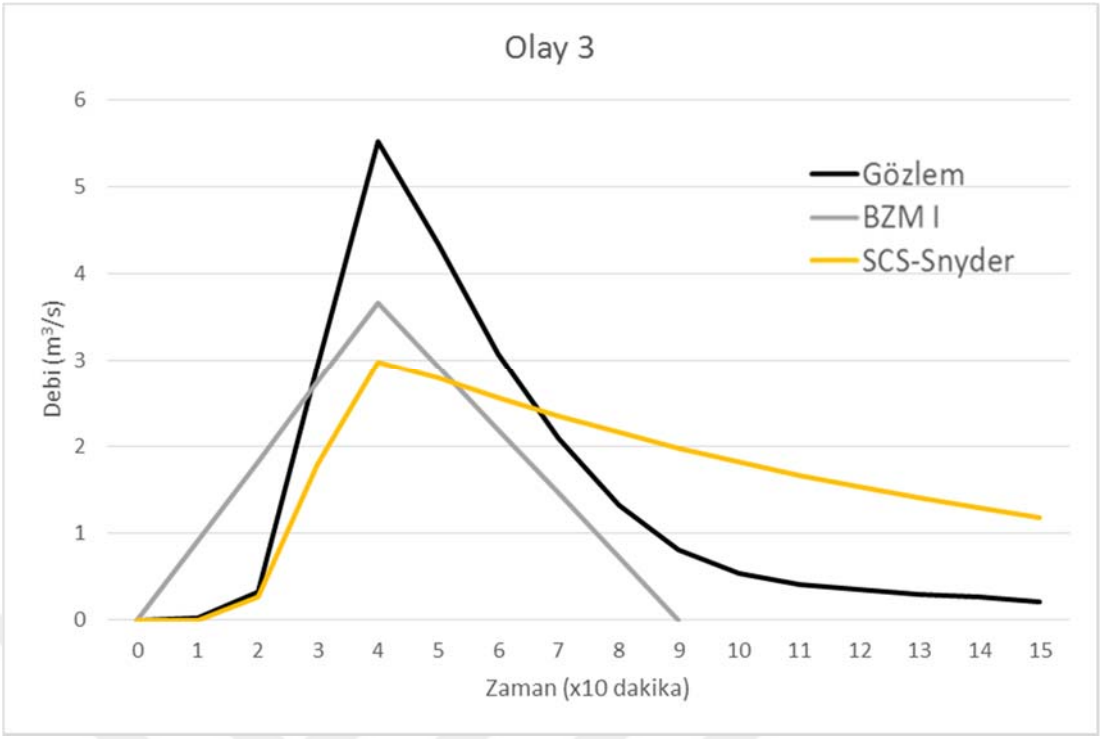
Denklem 3.1 ve 3.2'deki c_{pe} ve c_d değerleri uç debi tahmininden sonra belirlenmek durumundadır. Burada, c_{pe} ve c_d 15 tane olay ile eğitim yaptırılarak 10 dakika şeklinde belirlenmiştir. Dolayısıyla üçgen hidrografları 8 adet deneme olayı için çizdirmek mümkündür (Şekil 4.4-11). Şekil üstünde bu tezde önerilen en iyi model özelliğine sahip BZM I ve SCS-Snyder (AMC II) kıyaslanacaktır. Ayrıca bu modellerin gözlenmiş hidrograflara yakınlık derecesi de aynı şekiller üzerinde görülmektedir.



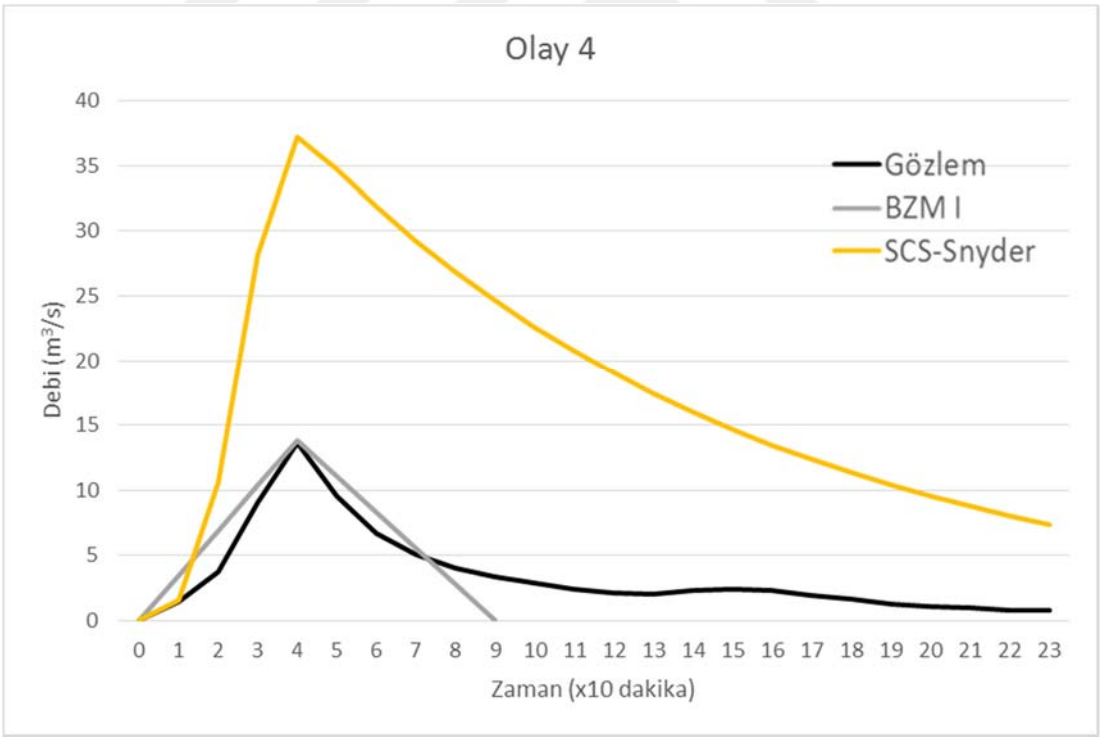
Şekil 4.4 : Birinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



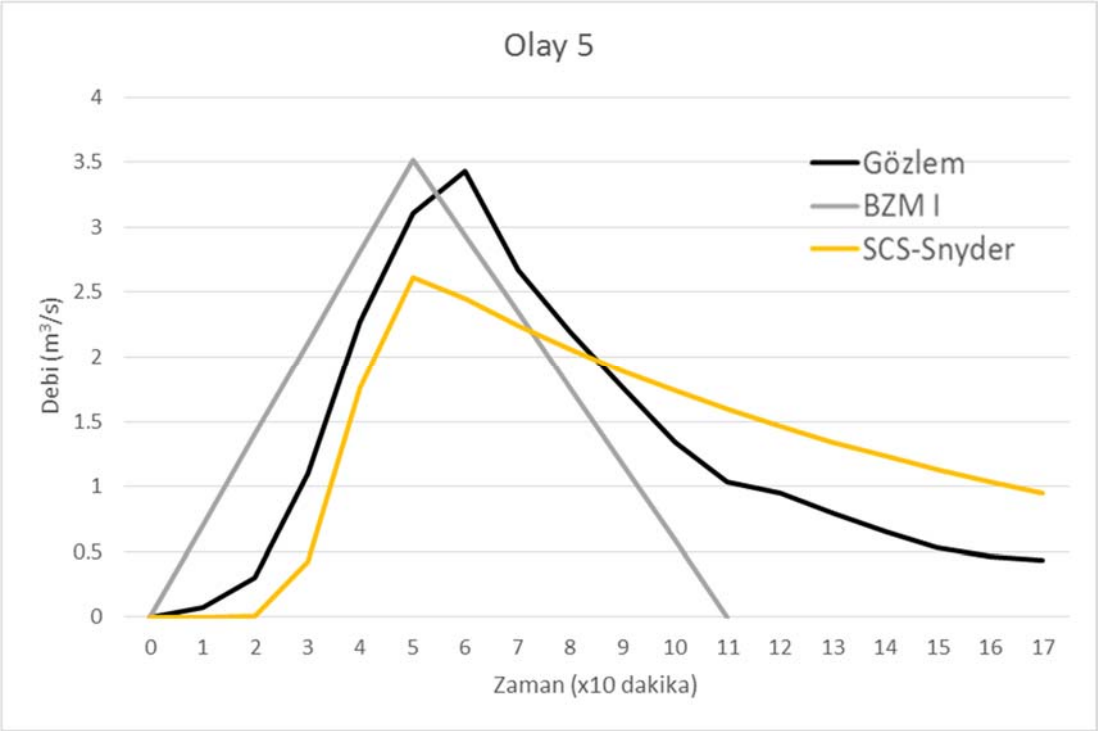
Şekil 4.5 : İkinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



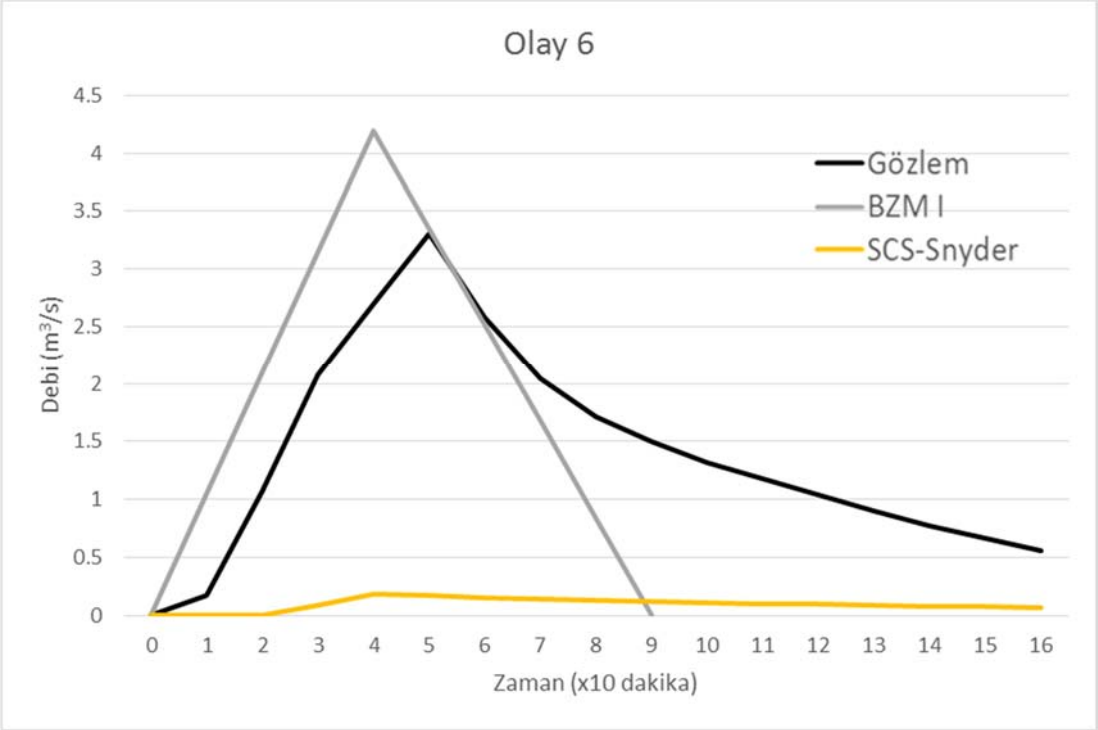
Şekil 4.6 : Üçüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



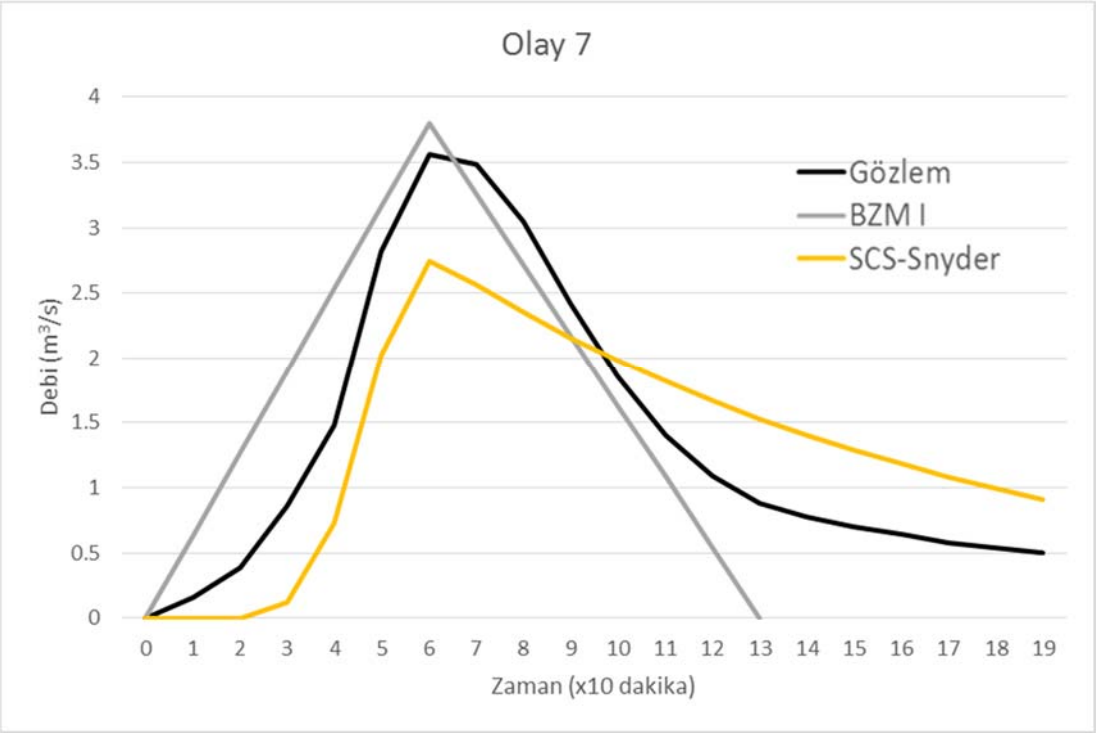
Şekil 4.7 : Dördüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



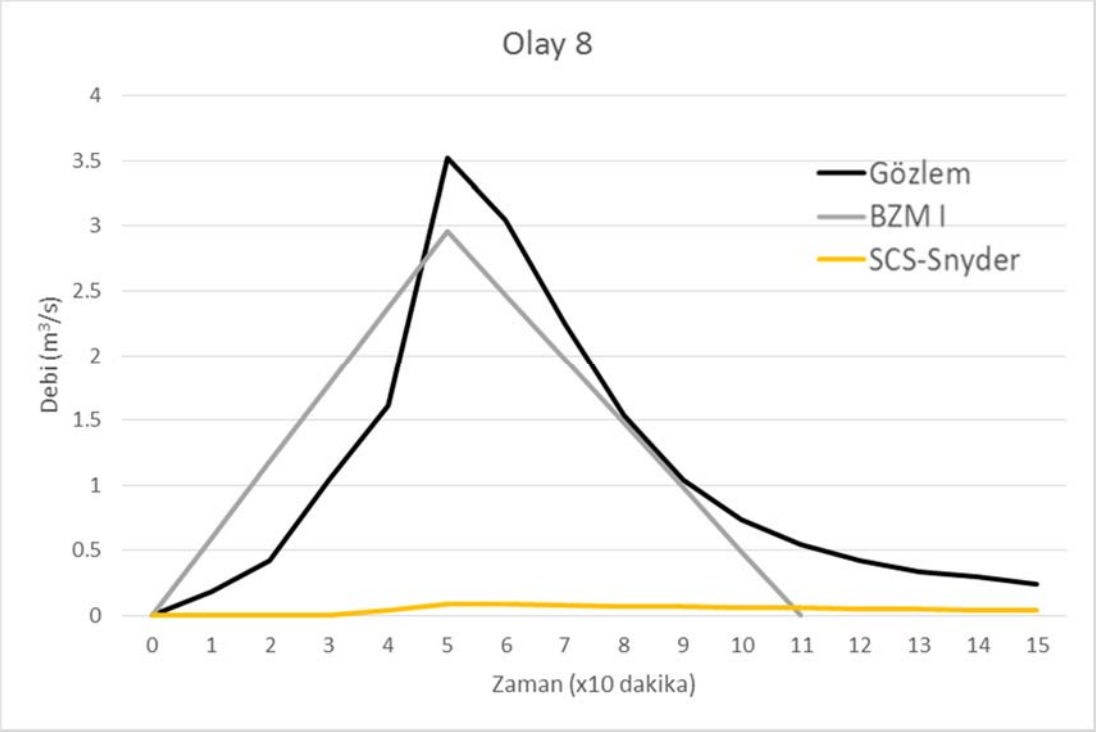
Şekil 4.8 : Beşinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



Şekil 4.9 : Altıncı olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



Şekil 4.10 : Yedinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.



Şekil 4.11 : Sekizinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BZM I üçgen hidrografı.

Taşkın tehlike (risk) yönetiminde hidrografın ani yükselen ve düşen kısmlarının altındaki alan dikkate alınmalı ve hacim hesabı yapılmalıdır. Taşkına sebebiyet veren ve su basmasını meydana getiren su hacimi bu kısımdaki hacimdir çünkü uç kısımda

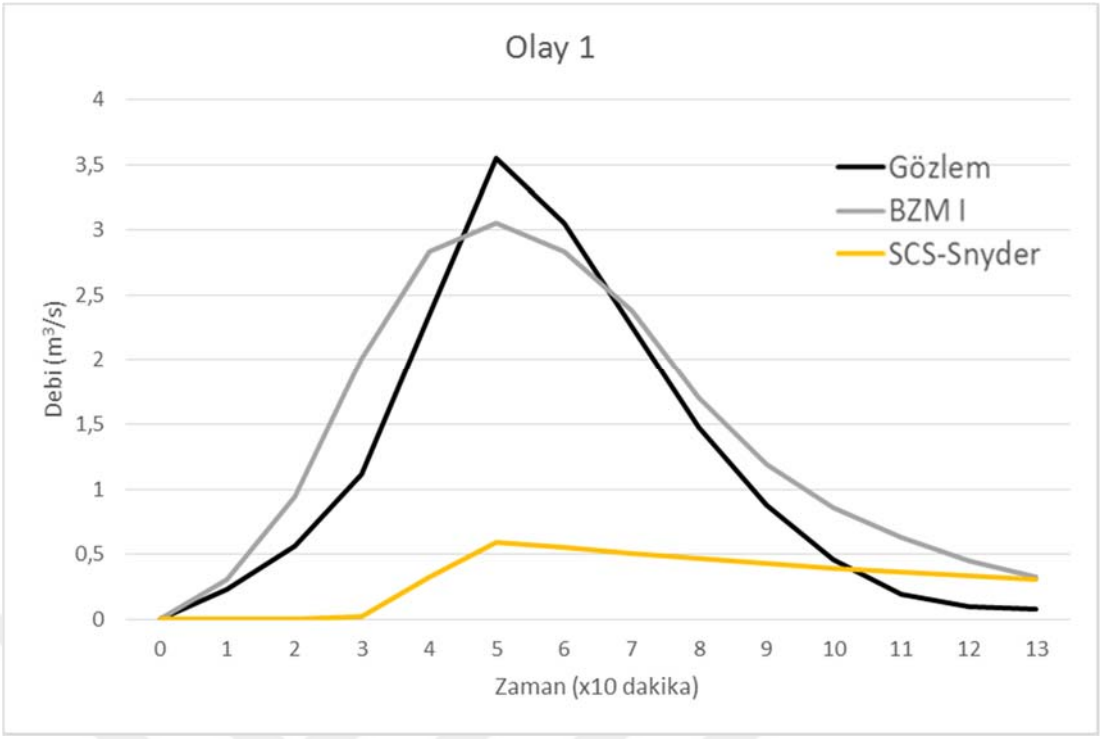
kalan debi değerleri mecradan taşmak suretiyle felakete neden olacaktır ve kuyruk kısmı bu açıdan dikkate alınmayacaktır. Bu düşünceler çerçevesinde şekiller ile alakalı değerlendirmeler aşağıda sunulacaktır.

Şekil 4.4 (Olay 1) üzerinde BZM I üçgen hidrografı gözleme yakın bir halde belirmiştir. Önceden belirtildiği gibi kuyruk kısmı ihmal edilmiştir. Snyder kuyruk kısmını dikkate alsa da asıl önem arz eden uç bölümden uzak kalmıştır. Olay 4, 5, 6, 7 ve 8 için tahmin edilen BZM I üçgen hidrografı birinci olaya benzer biçimde vuku bulmuştur. Olay 2 için tezde önerilen hidrograf her ne kadar uç kısmı doğru tahmin etse de taban genişliği gerçeğe göre bir miktar dar kalmıştır. Olay 3'te ise önerilen model, SCS-Snyder'e göre daha iyi tahmin yapsa da diğer olaylara kıyasla neticesi en uzak tahmin niteliğindedir. Sonuçta, tüm olaylar taşkın açısından göz önüne alındığında üçgen hidrograflar ölçümlere daima en yakın hidrograflar konumundadır. SCS-Snyder yöntemi Olay 1, 2, 4, 6 ve 8 için ürettiği tahminlerde büyük oranda yanılmıştır. Snyder, sadece dördüncü olayda gerçeğin üzerinde tahmin yaparken diğer tüm olaylarda ise gerçeğin hep altında kalmıştır. Üçgen hidrografa nazaran zayıf kalan bu meşhur (klasik) yöntem Olay 3, 5 ve 7 değerlerine yaklaşmıştır. Bu olaylar için hesaplanacak hacim değerleri (hidrografın altındaki tüm alan) SCS-Snyder ile tahmin edilen hacim değerlerine yakın çıkacaktır çünkü bu klasik yöntem hidrografın kuyruk kısmını da içermektedir.

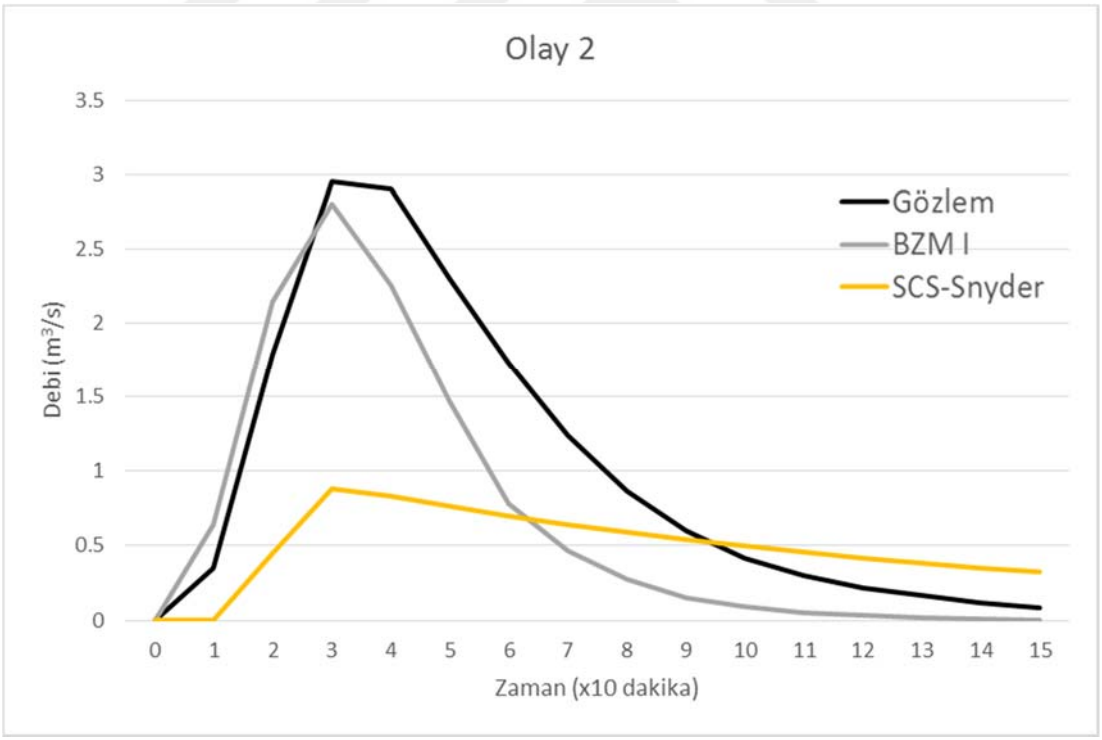
BZM I ile elde edilen üçgen hidrografın yanı sıra aynı modelin uç debi ve ilgili süre değerleri kullanılarak BBH yardımıyla eğrisel ve gerçeğe yakın hidrograflar ortaya çıkarılmıştır (Şekil 4.12-19). Açıkça görülmüştür ki BZM I toprak nemi değerini içermesi sayesinde, hem gerçek uç debi hem de hidrografa yakın sonuçlar üretmiştir.

BBH ile çizdirilen hidrograflar ile üçgen hidrograf arasında uç debi ve ortaya çıkış zamanı arasında hiç bir fark yoktur. BBH, sonuçlarının eğrisel olmasının yanında hidrografın kuyruk kısmını da içermektedir. Dolayısıyla hidrografın bu hali hem taşkın tehlike hem de su kaynakları yönetimi açısından son derece kullanışlıdır.

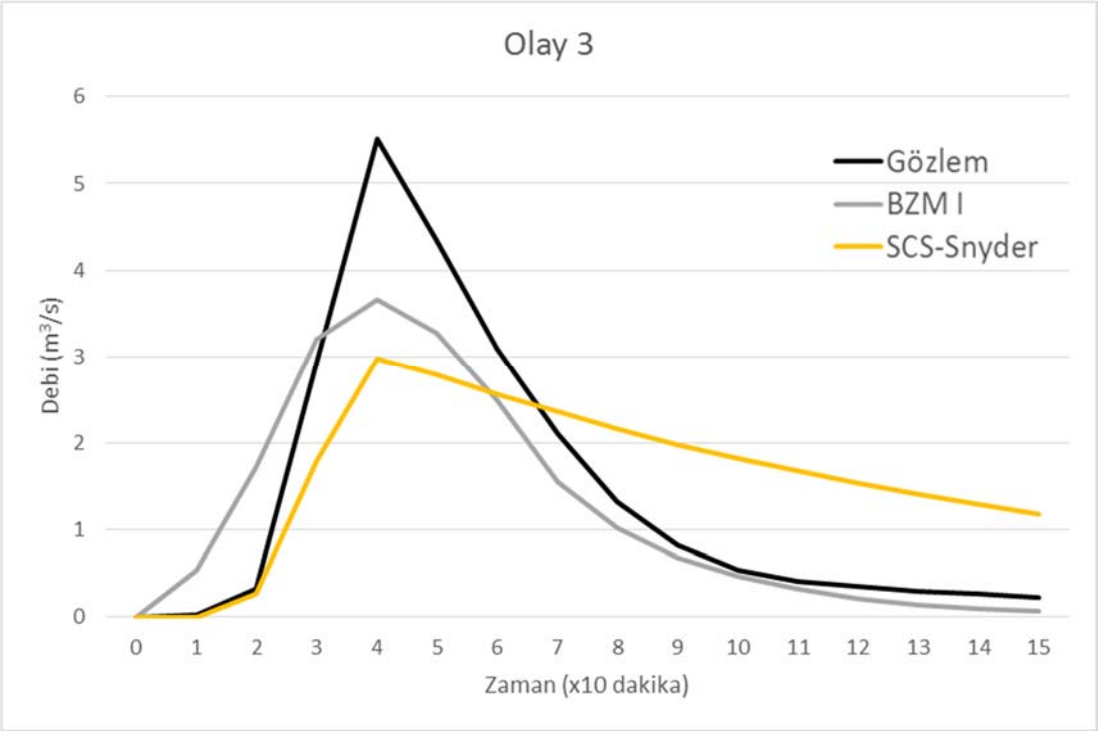
BBH ile belirlenen olayların tek tek değerlendirilmesi halinde üçgen hidrograf ile ilgili yorumları tekrar yazmak mümkündür. Ancak burada kuyruk ile alakalı şunları da eklemek gerekmektedir. Tahmini hidrograf Olay 3, 5 ve 8'de gözlem ile neredeyse tam örtüşürken, Olay 1, 4 ve 7'de ise kısmen örtüşmüştür.



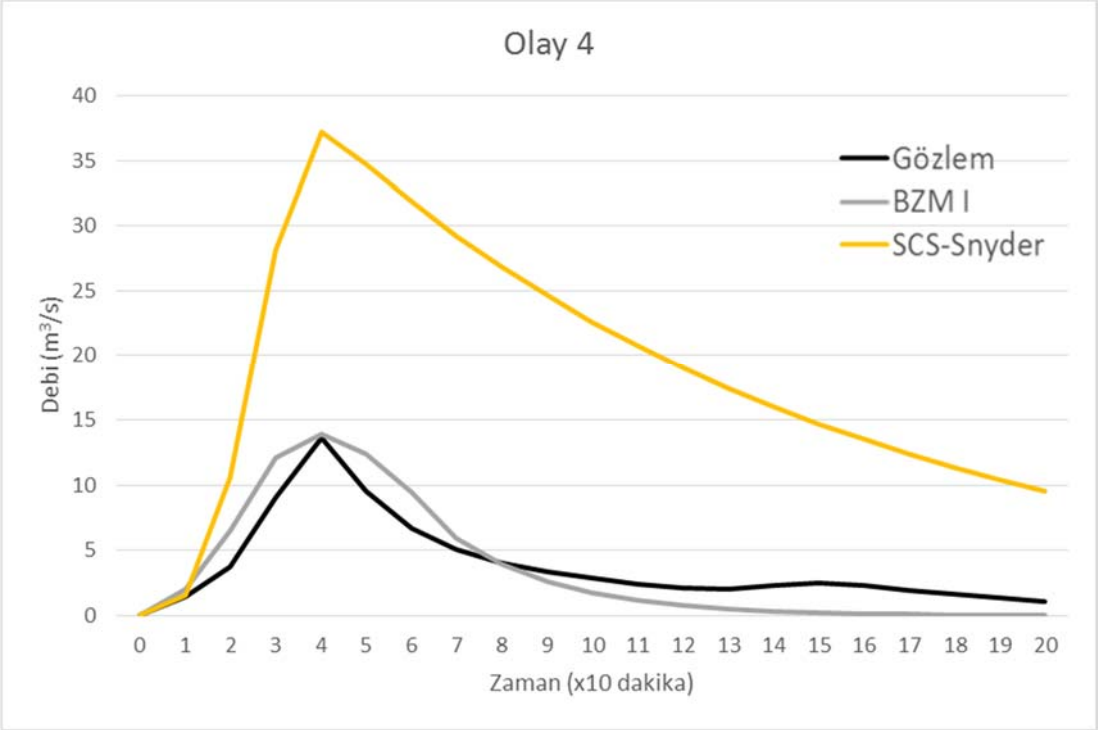
Şekil 4.12 : Birinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



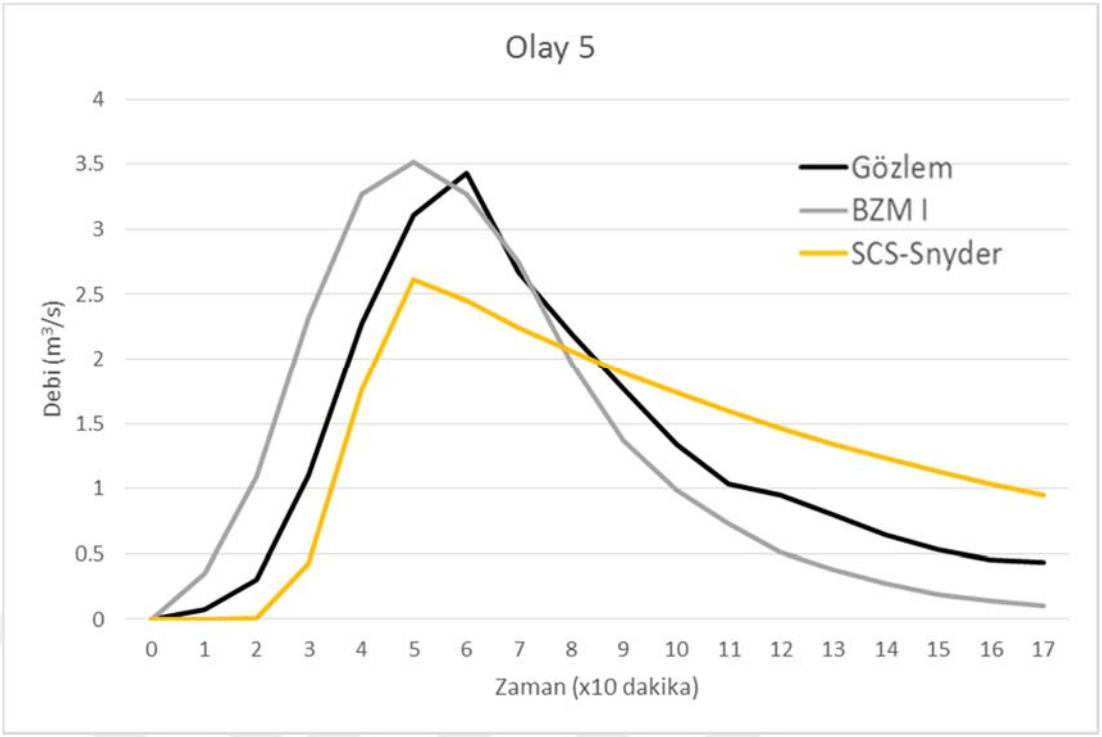
Şekil 4.13 : İkinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



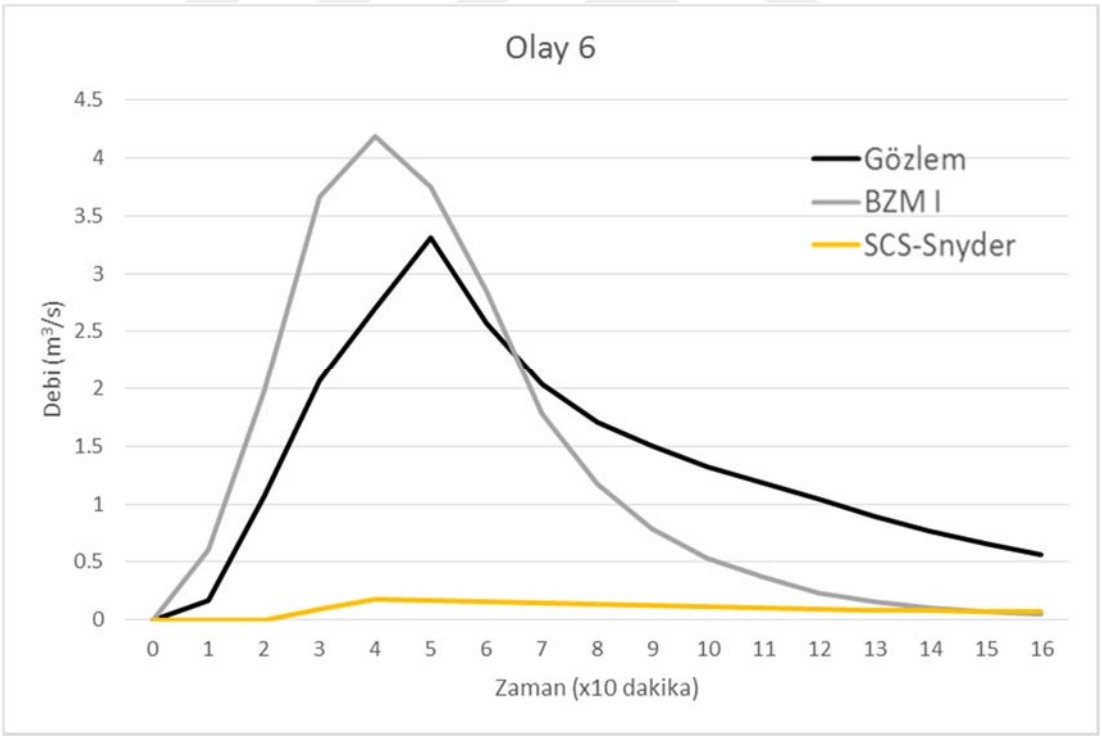
Şekil 4.14 : Üçüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



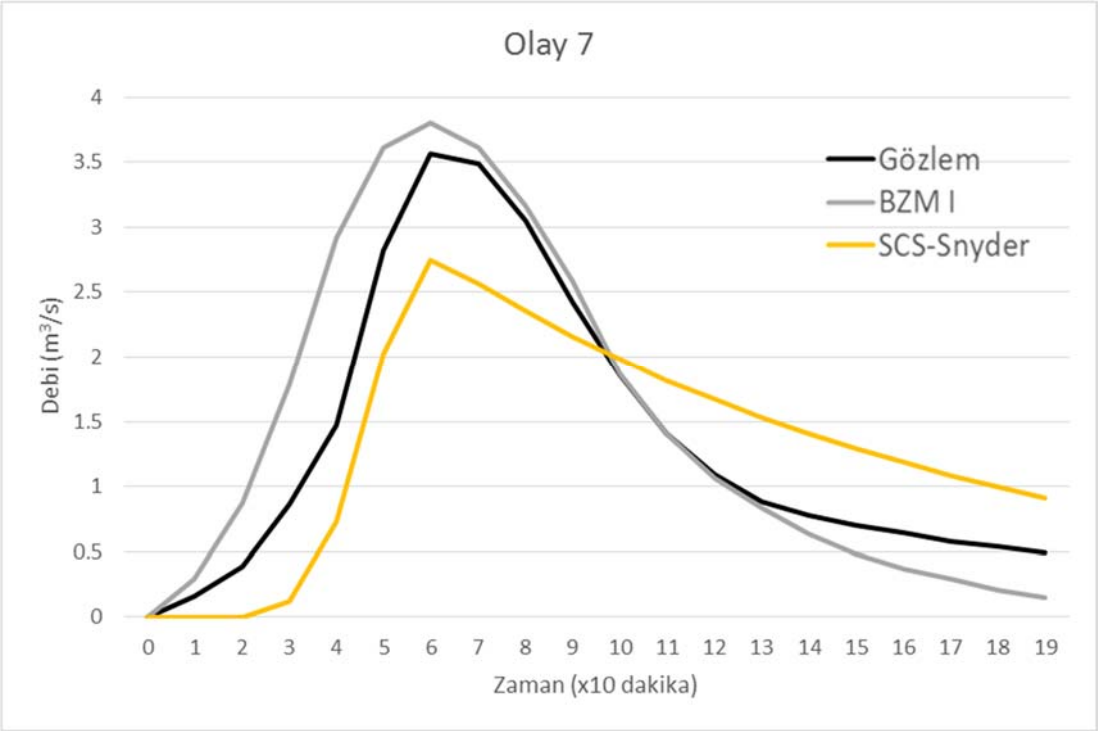
Şekil 4.15 : Dördüncü olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



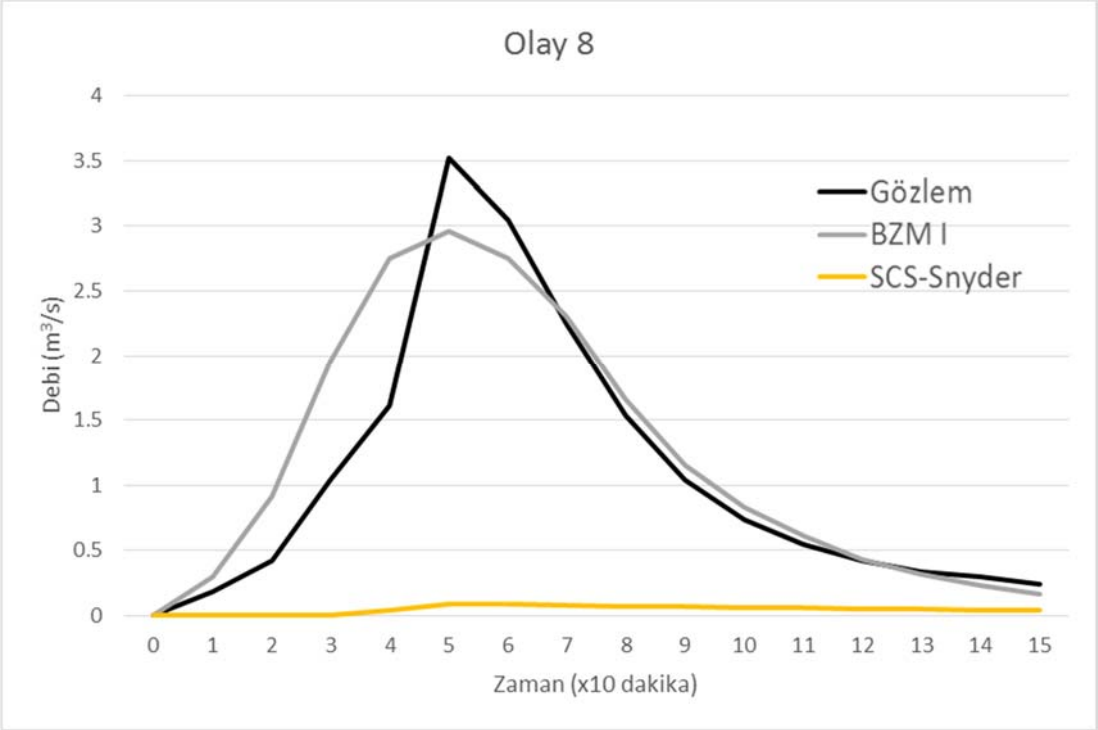
Şekil 4.16 : Beşinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



Şekil 4.17 : Altıncı olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



Şekil 4.18 : Yedinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.



Şekil 4.19 : Sekizinci olayın gerçek hidrografı, SCS-Snyder yapay hidrografı ve BBH oranları ile BZM I hidrografı.

5. EK BZM UYGULAMASI

5.1 Giriş

Buharlaşma hidrolojik çevrimde ana bileşenlerdendir ve hesaplamalarda kayıp şeklinde dikkate alınmaktadır. Aynı yükseklikteki Ekvator'a yakın bölgelerde artan buharlaşma kuzey ve güneye gidildikçe daha da azalmaktadır. Buharlaşma, özellikle baraj haznelerinden ve göllerden ortaya çıkan en önemli kayıp olarak dikkate alınmakta ve hesaplanmaktadır. Bunun için birim alandan ortaya çıkacak buharlaşma miktarı Dalton yasasına göre akılcı bir yaklaşımla ilk defa hesaplanmıştır. Bölgesine göre birçok değişkene bağlanan buharlaşma bazı durumlarda "tava" ("pan") isimli aletlerle ölçme yoluyla elde edilebilmektedir. Aynı zamanda kütlenin ve enerjinin korunumuna dayanan bütçe denklemlerine göre de buharlaşma (evaporasyon) hesapları yapılabilmektedir.

Diğer bir kayıp türü terleme (transpirasyon) bitkilerin hayatlarını ve gelişimini sürdürürken topraktan kökleri vasıtasıyla aldıkları suyun bir kısmını fotosentezle dışarı vermesi olayına denmektedir. Terleme, bitkilerin fotosentezi ile ilgili bir olay olduğundan sadece gündüz saatlerinde görülmektedir. Küçük (mikro) ölçekte önemli bir araştırma konusu olan terleme; su kaynakları yönetimi, sulama ve kurutma gibi büyük (makro) ölçekteki konularda araştırma yapanlar tarafından buharlaşma ile birlikte düşünülmüş ve buharlaşma+terleme (BT) [Evapotranspirasyon (ET)] başlığında araştırılmıştır.

BT zeminin toprak ve bitki ile değişik oranlarda örtülmesi durumunda suyun sıvı halden gaz haline geçişine denmektedir. Yukarıda tanımlanmış iki olayı birden içeren BT birçok araştırmacı tarafından bir takım denklemler önerilerek hesaplanmıştır (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Makkink, 1957; Turc, 1961; Blaney ve Criddle, 1962; Jensen ve Haise, 1963; Monteith, 1965; Priestley ve Taylor, 1972; Hargreaves, 1974; Linacre, 1977; Hargreaves ve Samani, 1985). Buhalaşma ve BT ölçümleri ve tahmini konusunda açıklamalar yapan Abtew ve Melesse (2013) bu yöntemlerin bir çoğuna değinmiş ve tüm ayrıntıları ile aktarmıştır.

Yukarıda isimleri ile bilinen BT hesaplama yöntemleri meteorolojik ölçümleri girdi olarak kullanmaktadır. Bazısı birkaç, bazısı çok fazla girdiyi kullanmak suretiyle sonuçlar üretmektedir. Jensen ve diğ. (1990) BT hesaplama yöntemlerinden en önemli 20 tanesini kurak ve nemli bölgelerde kıyaslayarak en hassas sonuçları üreten yöntemi araştırmışlardır. Sonuçta, Allen (1986) tarafından şekillendirilmiş ve birçok girdiyi (hava sıcaklığı, göreceli (rölatif) nem, rüzgâr hızı ve güneş ışınımı) içeren Penman-Monteith (PM) yönteminin hem kurak hem de nemli bölgeler için en hassas yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır. PM yönteminin diğer bir adı ve son hali FAO-56 (Food and Agriculture Organization-56)'dır ve Allen ve diğ. (1998) son derece kapsamlı bir şekilde yönteme dair bilgi vermişlerdir.

PM kitabi (teorik esaslı) bir denklem olmakla birlikte enerji ve kütle dengesini de içerecek şekilde elde edilmiştir. PM hassas sonuç üretmesi sebebiyle birçok araştırmacının BT hesaplaması için kullandığı vazgeçilmez bir denklemdir (Trajkovic, 2009; ElNesr ve diğ., 2010; Todorovic ve diğ., 2013; Valiantzas, 2013; Almorox ve diğ., 2015; Mossad ve Alazba, 2016). Günümüzde PM denklemi yoğun bir şekilde kullanılırken yapay zekâ yöntemleri de kullanılarak BT tahmini konusunda yol alınmaktadır. Farklı yapay zekâ yöntemleri BM, yapay sinir ağı, GA ve bunların türevleri kullanılmak suretiyle farklı girdi türleri ile BT modelleri kurulmuş ve tahminler üretilmiştir (Kim ve Kim, 2008; Kumar ve diğ., 2011; Chang ve diğ., 2013; Aghajanloo ve diğ., 2013; Adamala ve diğ., 2014; Gocic ve diğ., 2015; Fenga ve diğ., 2016). Gerçekleştirilen tüm çalışmalarda ilgili ölçüm noktasının kendi verisi dikkate alınarak o nokta için BT tahmini ve hesabı yapılmıştır.

Bu çalışmada Arap yarımadasının en büyük ülkesi Suudi Arabistan'da bulunan bazı ölçüm noktaları üçerli öbekler halinde dikkate alınacaktır. İlk defa iki noktanın verilerinden bu iki noktaya yakın olan üçüncü bir ölçüm noktası için BT tahmini yapılacaktır. Bu maksat için Güçlü ve Şen (2016)'in bulanık zincir modeline (BZM) benzer bir zincirleme akış diyagramı geliştirilmiştir. Buna ek, iki noktaya ait PM ile hesaplanan BT'ler ile üçüncü noktann BT'sini tahmin etmek için bulanık model geliştirilecektir.

BT hesabı konusunda hassas sonuçlar ürettiği ispatlanan PM denklemi bu çalışmada kullanılırken önerilen tahmin modelleri için de Sugeno bulanık mantık ilkelerinden faydalanılacaktır. Sonuçta, bu çalışma için biri bulanık diğeri de BZM iki model üretilmiştir.

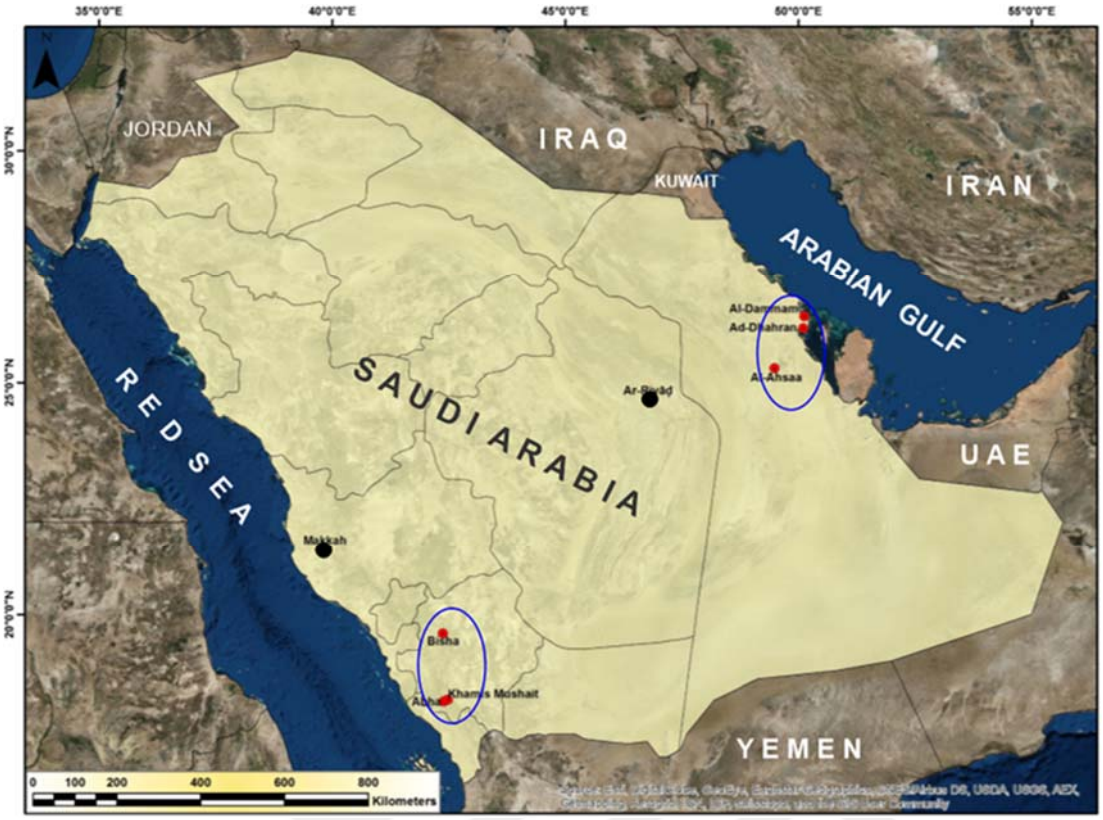
5.2 Bölge Tanıtımı ve Ölçümler

Arap yarımadasının en geniş ülkesi Suudi Arabistan yaklaşık 2.15 milyon km² alana sahiptir. Yarımadanın dörtte üçünden fazlasını kaplayan ve ekvatora çok yakın konumlanan Suudi Arabistan 16°21'58"K ve 32°09'57"K enlemleri 34°33'48"D ve 55°41'29"D boylamları arasında kalmaktadır (Şekil 5.1). Çöl (kurak) iklimine sahip bu ülkede kum fırtınaları sıklıkla görülmekte ve sıcaklıkların 30-35°C dereceye kadar seyrettiği bilinmektedir (ElNesr ve diğ., 2010). Çöl bölgelerinde sıcaklık değişim aralığı çok fazla iken göreceli (rölatif) nemin üst seviyelerde bulunduğu sahil kesimlerinde sıcaklık değişim aralığı azdır. En fazla yağış alan güneybatı bölgelerinde yıllık yağış yüksekliği 300 mm iken doğu çöllerinde bu miktar çoğunlukla sıfırdır (Abdullah ve Al-Mazroui, 1998).

Suudi Arabistan Krallığı (SAK) Meteoroloji ve Çevre Başkanlığı ülkenin 13 bölgenin tamamını kapsayacak şekilde 29 tane meteoroloji noktasında birçok verinin ölçümünü günlük yapmaktadır. Bazı ölçüm noktalarında 1970 yılından 2012 yılına kadar yaklaşık 43 yıllık ölçümler mevcuttur ve bazılarında daha az süreyle (1999-2012, 14 yıl) ölçümler yapılmıştır. Bu noktalardan birbirine yakın konumlananların bir kısmı üçlü öbekler halinde seçilmiştir ve sonuçta 6 tane noktanın verisi kullanılıcaktır. Seçilen tüm noktaların bölgesi, adı, enlemi, boylamı, yüksekliği ve kayıt süresi bilgileri ayrıntılı bir şekilde Çizelge 5.1'de verilmiştir ve istasyonlar Şekil 5.1'de ayrıca gösterilmiştir. Ölçülen günlük veri çeşitleri arasında sıcaklık, göreceli (rölatif) nem, atmosfer basıncı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, gökyüzü örtüsü (Sky Coverage) ve yağış kayıtları bulunmaktadır. Ölçümler çoğunlukla en büyük (maksimum), en küçük (minimum) ve ortalama şeklindedir.

Çizelge 5.1 : Ölçüm noktalarının konum bilgileri.

Bölge Adı	Ölçüm Noktası Adı	Enlem, K (Derece)	Boylam, D (Derece)	Yükseklik (m)	Kayıt Süresi (Yıl)
Doğu (Eş-Şarkıye)	Dahran	26.16	50.10	17	34
	Dammam	26.42	50.12	1	14
	Ahsa	25.30	49.48	179	29
Asir	Bişa	19.59	42.37	1163	34
	Abha	18.14	42.39	2093	34
	Hamis Muşayt	18.18	42.48	2057	34



Şekil 5.1 : SAK Meteoroloji ve Çevre Başkanlığı'na bağlı 6 adet meteoroloji ölçüm noktası ve çember içine alınmış üçlü öbekler.

5.3 Yöntemler

Bu çalışma iki adımdan meydana gelmiştir. İlk aşamada, birçok araştırmacı tarafından yoğun bir şekilde kullanılan PM (FAO-56) denklemi tanıtılacaktır. Sonraki aşamada ise bulanık mantık ilkelerine dayalı düz ve zincirleme modeller önerilecektir.

5.3.1 Penman-Monteith denklemi

BT hesabı için yaklaşık 70 yıldır, bazı girdiler dikkate alınarak birçok deneysel (ampirik) denklem üretilmiştir. Göreceli nem, sıcaklık, güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve atmosfer basıncı gibi değerlerin tamamını veya birkaçını içerecek şekilde önerilen bu denklemlerin birçoğu Penman (1948) denkleminin türevleri şeklinde ortaya çıkmıştır. Penman isimli araştırmacı girdilerin tamamını dikkate alarak enerji ve kütlenin korunumu ilkelerine göre buharlaşmayı hesaplayabileceği bir denklem ortaya koymuştur.

$$BT = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta\left(R_n - G\right) + \left(\gamma\lambda E_a\right)}{\left(\Delta + \lambda\right)} \quad (5.1)$$

Denklemdeki terimlerin açıklamaları şu şekildedir;

BT = buharlaşma+terleme (evapotranspiration) (mm d^{-1}),

Δ = doygun buhar basıncı eğrisinin eğimi (slope of the saturated vapor pressure curve), [$\delta e_o/\delta T$, where e_o = doygun buhar basıncı (saturated vapor pressure) (kPa) ve T = günlük ortalama sıcaklık (daily mean temperature) (°C)],

R_n = net ışınım (net radiation) (MJ m^{-2} d^{-1}),

G = toprak ısı akısı (sensible heat flux into the soil) (MJ m^{-2} d^{-1}),

λ = buharlaşmanın latent ısısı (latent heat of vaporization) (MJ kg^{-1}),

γ = psikrometrik sabit (psychrometric constant) (kPa $°C^{-1}$),

E_a = akının buhar taşınımı (vapor transport of flux) (mm d^{-1}).

Penman'dan sonra çeşitli denklemler ortaya koyulmuştur ve Monteith (1965) Penman'ın denklemine buhar iletimine karşı yüzey direnci terimini de ekleyerek aşağıdaki ifadeyi türetmiştir. Bu aşamadan sonra ilgili denklem Penman-Monteith denklemi olarak adlandırılmıştır.

$$BT = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta\left(R_n - G\right) + 86400\ \dfrac{\rho_a C_p \left(e_s^o - e_a\right)}{r_{av}}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{r_s}{r_{av}}\right)} \quad (5.2)$$

Denklemdeki yeni simgelerin açıklamaları şu şekildedir;

ρ_a = havanın yoğunluğu (air density) (kg m^{-3}),

C_p = kuru havanın özgül sıcaklığı (specific heat of dry air) (MJ kg^{-1} $°C^{-1}$),

e_s^o = havanın doygun buhar basıncı (mean saturated vapor pressure) (kPa),

e_a = havanın o andaki buhar basıncı (mean daily ambient vapor pressure) (kPa),

r_{av} = buhar iletimi ve duyumsanabilir ısıya karşı aerodinamik direnç (bulk surface aerodynamic resistance for water vapor) (s m^{-1}),

r_s = buhar iletimine karşı yüzey direnci (the canopy surface resistance) (s m^{-1}).

Allen ve diğ. (1998) PM denklemine bazı sabitler, hava sıcaklığı ve rüzgâr hızı terimini de ekleyerek daha da geliştirmişlerdir. Bu haliyle denklem FAO-56 olarak da adlandırılmaktadır. Bu denklem birçok araştırmacı tarafından kullanılmakta ve önerilmektedir.

$$BT = \frac{0.408\,\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma \dfrac{900}{T + 273} u_2 \left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34\,u_2\right)} \tag{5.3}$$

Denklemdeki yeni ifadelerin açıklamaları şu şekildedir;

T = ortalama hava sıcaklığı (mean air temperature) (°C),

u_2 = yerden 2 metre yükseklikteki rüzgâr hızı (wind speed at 2 m above the ground) (m s^{-1}).

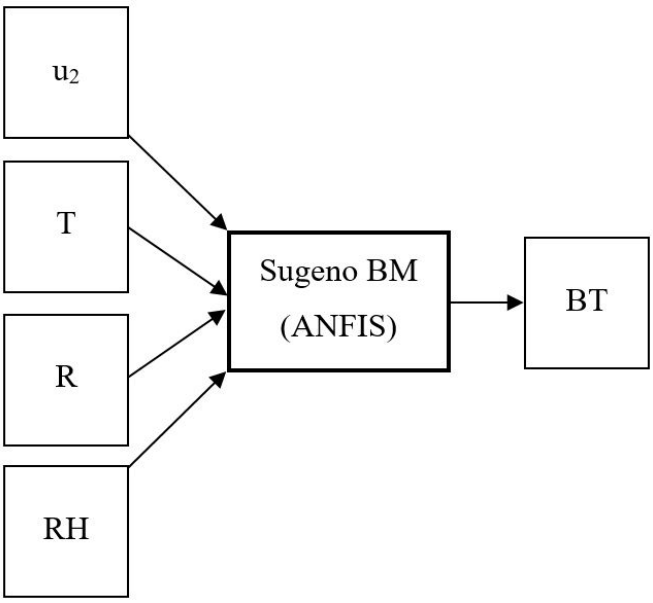
Zotarelli ve diğ. (2015) PM denklemlerinin adım adım gelişimini anlatmış ve hesap aşamalarına dair önemli bilgiler sunmuştur.

5.3.2 Bulanık modeller

Bu çalışmada ANFIS yazılımı kullanılarak iki tane farklı bulanık model önerilecek ve BT tahminleri üretilecektir. Aynı zamanda mevcut bulanık model tanıtılacak ve uygulamada da ayrıca kullanılacaktır.

5.3.2.1 Mevcut bulanık model

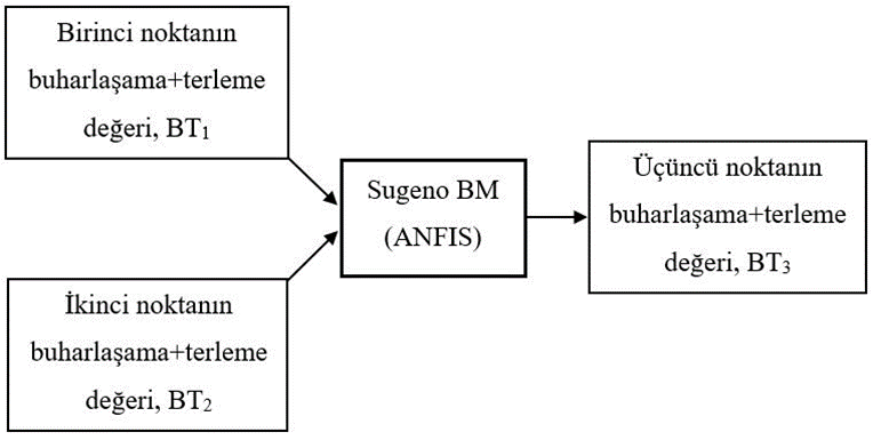
Şimdiye kadar araştırmacılar bulanık mantık ilkeleri ile ölçüm noktasının kendi verilerinden faydalanarak model kurmuşlardır (Şekil 5.2). Ölçüm noktalarında verilerin eksiksiz olması durumunda bu modeller son derece kullanışlı iken çok da hassas sonuçlar üretmişlerdir. Ancak eksik veri (girdi) bulunması durumunda bu model işlevini kaybetmektedir. Şekil 5.2'de u_2, yerden iki metre yükseklikteki rüzgâr hızı, T, ortalama sıcaklık, R, net güneş ışınımı ve RH, göreceli nem değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 5.2 : Mevcut bulanık model şeması.

5.3.2.2 Bölgesel bulanık model (BBM)

Araştırmacıların BM ile istasyonların kendi verilerini kullanarak BT tahmini yaptıkları belirtilmişti. Bu çalışmada aynı bölgedeki üç noktanın (istasyonun) birbirine olan bağımlılığı doğrusal regresyon ile ispat edilecek ve iki noktanın BT'si ile üçüncü noktanın BT değeri tahmin edilecektir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : Bölgesel bulanık model (BBM) şeması.

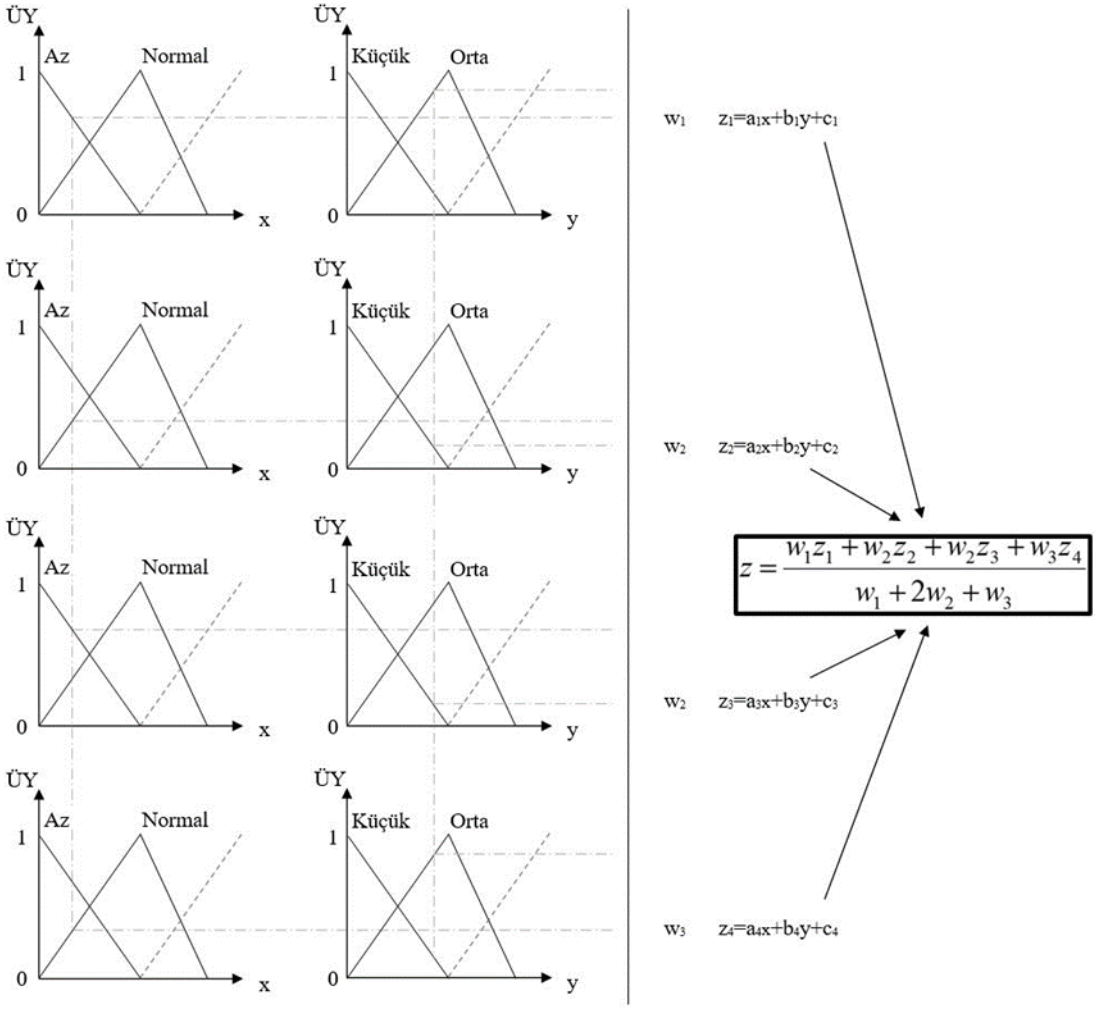
Burada, BT tahmini için iki girdi-bir çıktı Sugeno BM kurularak çıktı kısmı denklem ile eğitilecektir. Şekil 5.4'te girdileri x ve y, çıktısı z olan örnek model resmedilmiştir (ÜY: Üyelik Derecesi). Ayrıca, Şekil 5.4'teki w_i'ler üyelik derecesi değerlerini, z_i'ler denklemlerin sonuçlarını, a_i, b_i, ve c_i'ler denklemlerin sabitlerini, z ise ana sonucu ifade etmektedir. Örnek model, dört örnek kural ile kurulmuştur ve kurallar şu şekildedir;

Kural 1: Eğer x Az ve y Orta ise z $z_1=a_1x+b_1y+c_1$'dir,

Kural 2: Eğer x Normal ve y Küçük ise z $z_2=a_2x+b_2y+c_2$'dir,

Kural 3: Eğer x Az ve y Küçük ise z $z_3=a_3x+b_3y+c_3$'tür,

Kural 4: Eğer x Normal ve y Orta ise z $z_4=a_4x+b_4y+c_4$'tür.

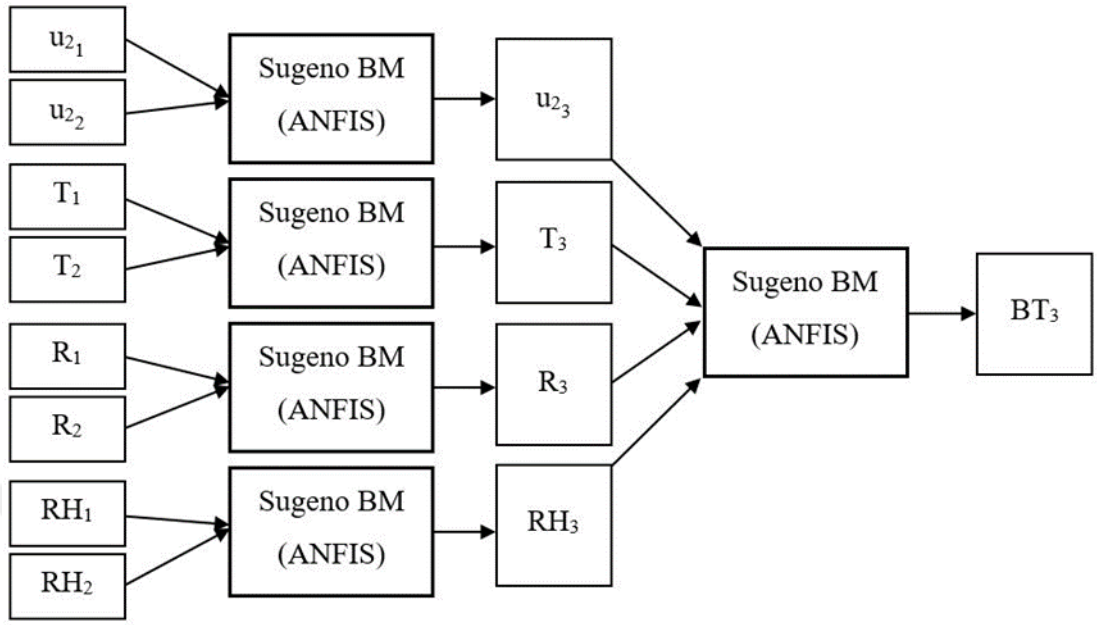


Şekil 5.4 : Örnek dört kural ile iki girdi (x, y)-bir denklem çıktı (z) Sugeno modeli.

5.3.2.3 Bölgesel bulanık zincir modeli (BBZM)

İlk defa önerilen bu model BBM gibi aynı bölgedeki üç noktayı (istasyonu) dikkate almaktadır. Ancak bu model iki aşamadan meydana gelecektir, çünkü öncelikle iki noktanın her bir girdisine karşılık üçüncü noktanın ilgili girdisi tek tek tahmin edilecektir ve sonra tahmin edilen tüm değerler girdi olarak kullanılarak ANFIS ile üçüncü noktanın BT'si tahmin edilecektir (Şekil 5.5). Şekil 5.5'te u_{2_i}, yerden iki metre yükseklikteki rüzgâr hızı, T_i, ortalama sıcaklık, R_i, net güneş ışınımı ve RH_i,

göreceli nem değerlerini ve i (1, 2 ve 3) ise ölçüm noktası numaralarını ifade etmektedir.



Şekil 5.5 : Bölgesel bulanık zincir model (BBZM) şeması.

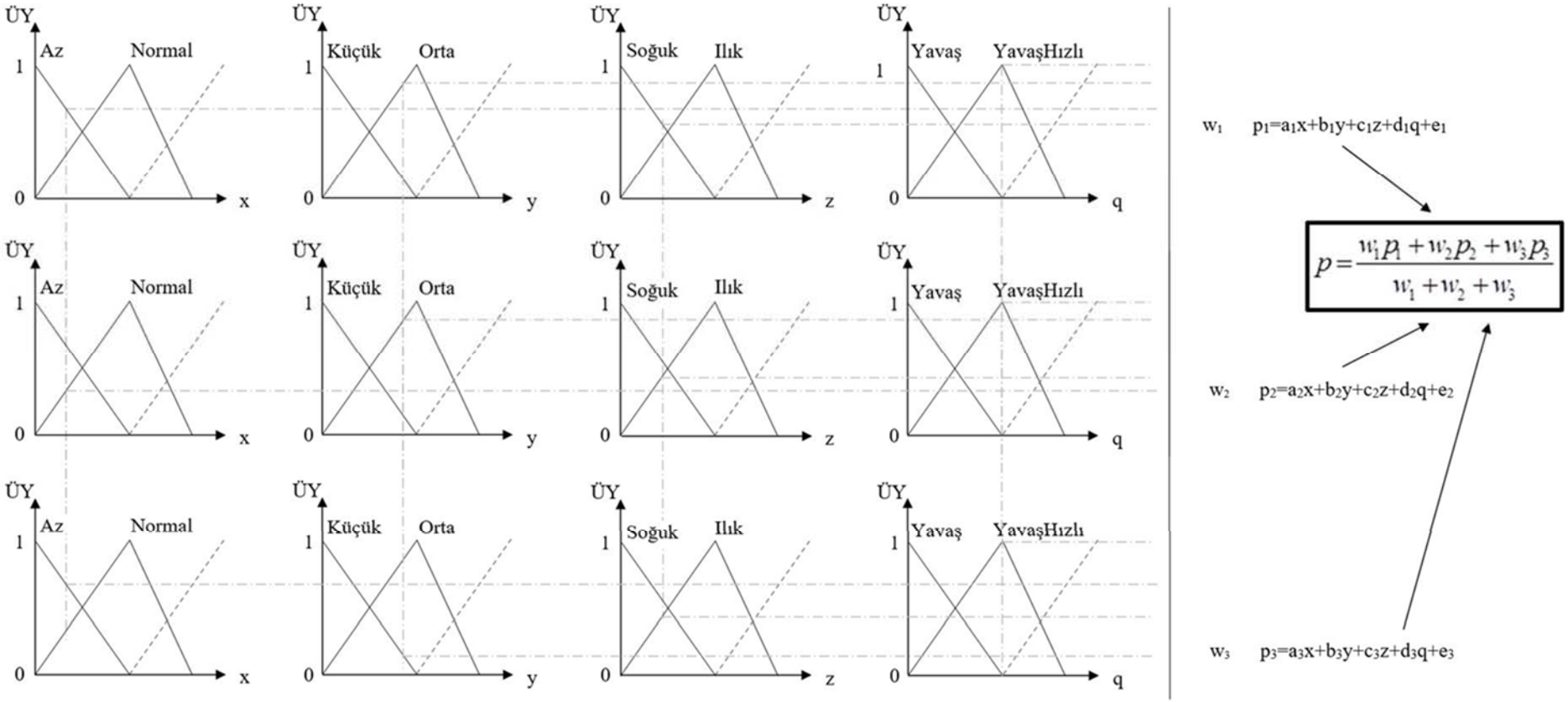
Üçüncü noktanın BT tahminlerini üretmek için ilk aşamada, yani zincirin ilk halkasında, iki girdi-bir çıktı Sugeno BM'leri kurularak çıktı kısmı denklem şeklinde her bir girdi üçüncü nokta için tahmin edilecektir. BBZM'nin ikinci halkasında ise dört girdi-bir çıktı Sugeno BM'leri kurulacak ve çıktı kısmı denklem şeklinde model yeniden eğitilecektir. Şekil 5.6'da girdileri x, y, z ve q, çıktısı ise p olan örnek model resmedilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.6'daki w_i'ler üyelik derecesi değerlerini, p_i'ler denklemlerin sonuçlarını, a_i, b_i, c_i, d_i ve e_i'ler denklemlerin sabitlerini, p ise ana sonucu ifade etmektedir. Örnek model, üç örnek kural ile kurulmuştur ve kurallar şu şekildedir;

Kural 1: Eğer x Az ve y Orta ve z Soğuk ve q YavaşHızlı ise p $p_1=a_1x+b_1y+c_1z+d_1q+e_1$'dir,

Kural 2: Eğer x Normal ve y Orta ve z Ilık ve q YavaşHızlı ise p $p_2=a_2x+b_2y+c_2z+d_2q+e_2$'dir,

Kural 3: Eğer x Az ve y Küçük ve z Ilık ve q YavaşHızlı ise p $p_3=a_3x+b_3y+c_3z+d_3q+e_3$'tür.

Güçlü ve diğ. (2017) tezde kullanılan BBM ve BBZM'yi önceki çalışmalara (literatüre) dahil etmişlerdir. Bu makalenin tüm metni EK-B'de ayrıca sunulmuştur.



Şekil 5.6 : Örnek üç kural ile dört girdi (x, y, z, q)-bir denklem çıktı (p) Sugeno modeli.

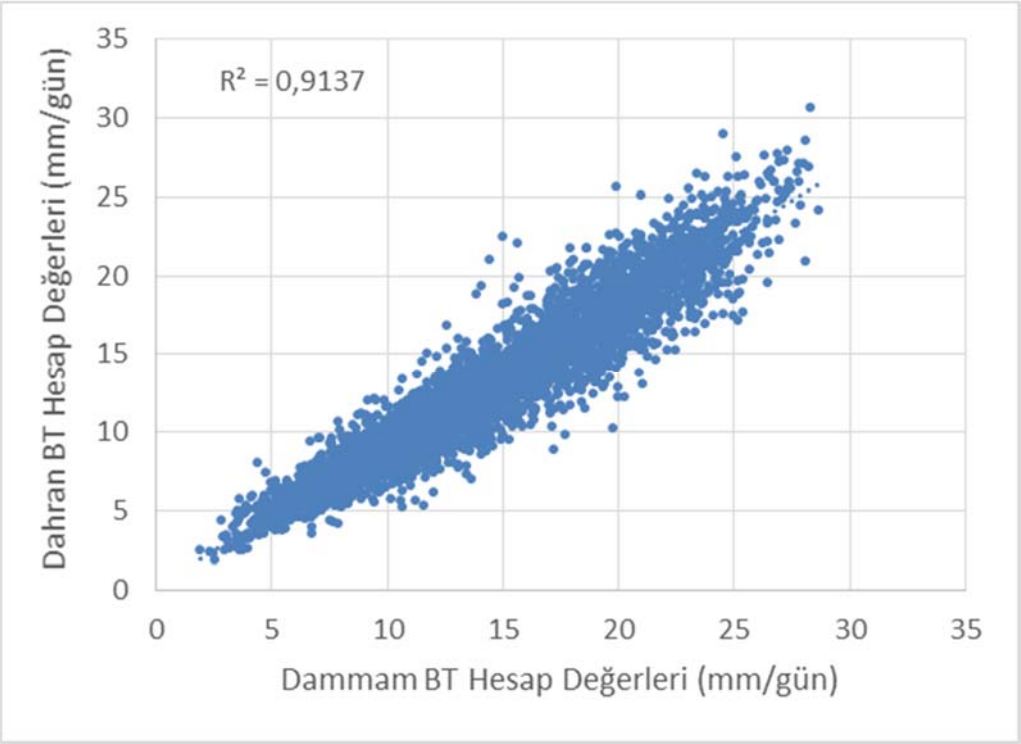
5.4 Model Uygulamaları ve Kıyaslamaları

Bu ek çalışmada Suudi Arabistan'ın farklı özellikteki iki bölgesi için PM ile BT hesabı ve iki tanesi bu çalışmada önerilen üç tane bulanık modelle de BT tahmini yapılacaktır. Bir istasyonda PM denkleminin ihtiyaç duyduğu tüm veri çeşitlerinin bulunması halinde sorunsuz bir şekilde BT değerleri hesaplanabilmektedir. Diğer taraftan, bir istasyonda yeterli veri çeşidi yoksa o zaman mevcut bulanık model kullanılmakta ve iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak bir istasyonda hiç veri yoksa ve etrafındaki komşu istasyonlardaki verilerden faydalanılarak BT tahmini mümkün olmaktadır. Nitekim bu çalışmada ilk defa önerilen bölgesel iki bulanık model sayesinde ilgili bölgelerdeki istasyonlar için iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Uygulamadaki tüm bulanık modeller PM denklemi ile hesaplanan BT değerleri ile karşılaştırılacaktır.

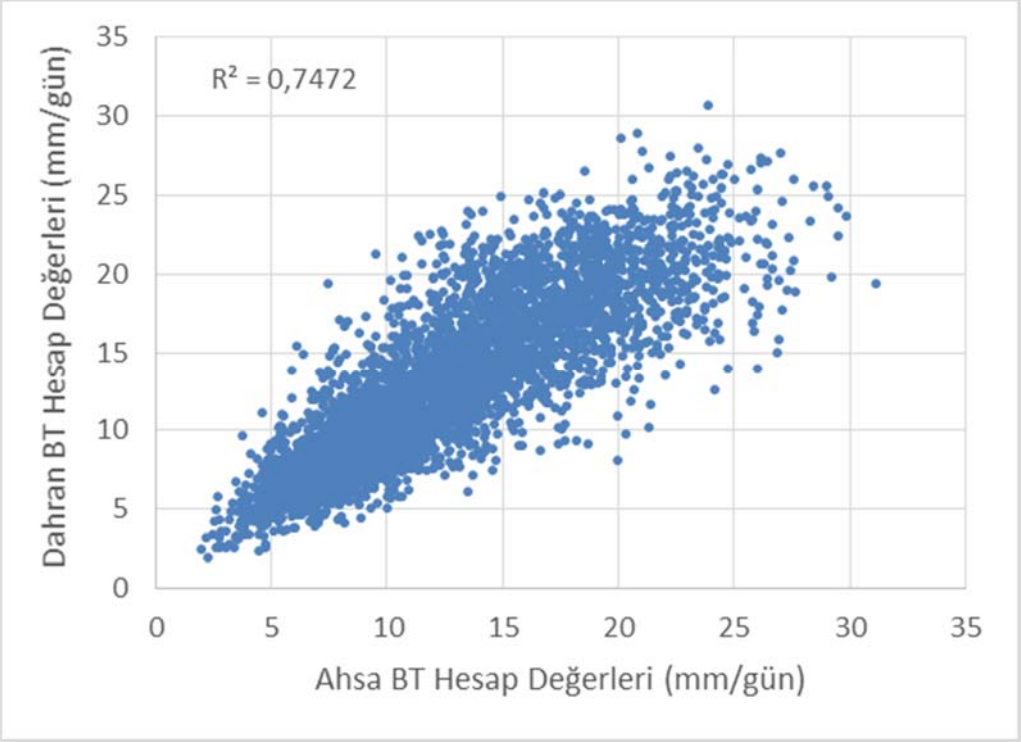
Suudi Arabistan'ın doğusunda kalan ve düz bir bölge özelliğindeki Eş-Şarkıye bölgesi için 1999-2012 yılları arasında ölçülen veriler kullanılacaktır. ANFIS (Bulanık Mantık) ile ortaya koyulan modellerin eğitimi için 1999-2007 (9 yıl) ve deneme için de 2008-2012 (5 yıl) yılları arasındaki veriler dikkate alınacaktır. Bu bölgenin üç istasyonu arasından Dahran BT'si tahmin edilecek istasyon olarak seçilecektir.

Suudi Arabistan'ın güneyinde kalan ve dağlık bir bölge olan Asir bölgesi için 1978-2012 yılları arasında ölçülen veriler kullanılacaktır. ANFIS (Bulanık Mantık) ile ortaya koyulan modellerin eğitimi için 1978-1998 (21 yıl) ve deneme için de 1999-2012 (14 yıl) yılları arasındaki veriler dikkate alınacaktır. Bu bölgenin üç istasyonu arasından Hamis Muşayt, BT'si tahmin edilecek istasyon seçilecektir.

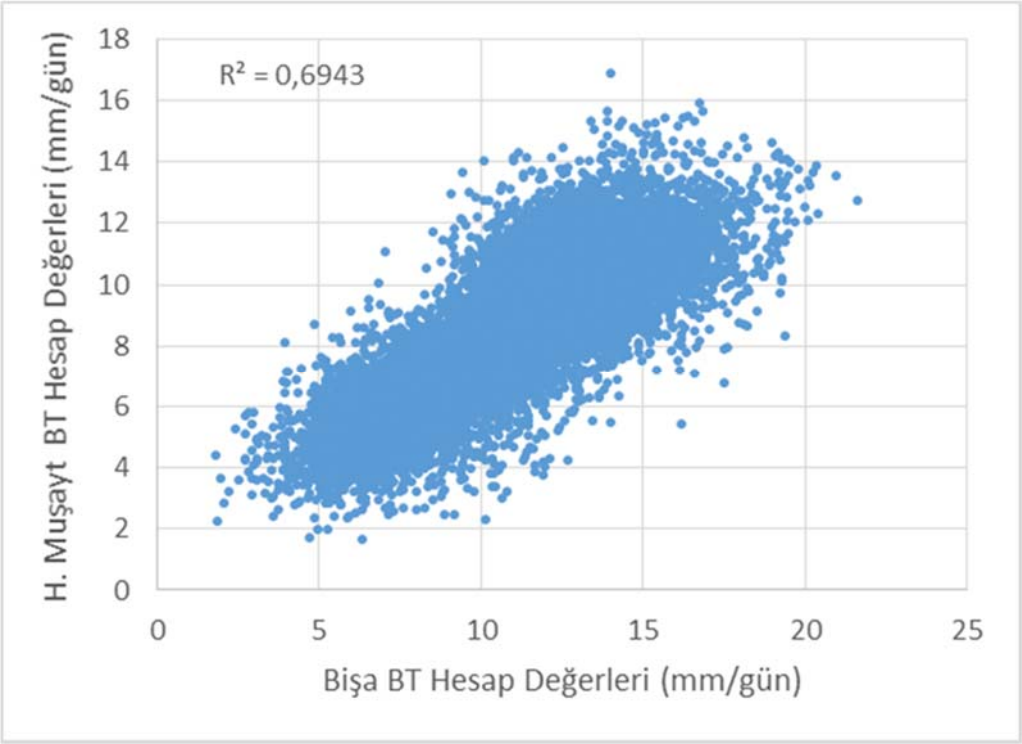
Aynı bölgedeki üç istasyonun ikisi ile kalan diğer istasyon için BT tahmini elde edileceğinden istasyonlar arasındaki bağımlılığı gösteren şekilleri (Şekil 5.7-5.10) eklemek fayda sağlayacaktır. Şekillerden de görüleceği üzere tahmini yapılacak noktanın diğer noktalar ile ilişkisi (R^2) yüksek çıkmıştır. Bu aşamadan sonra BT tahminleri gerçekleştirilerek ilgili kıyaslamalar ortaya koyulacaktır.



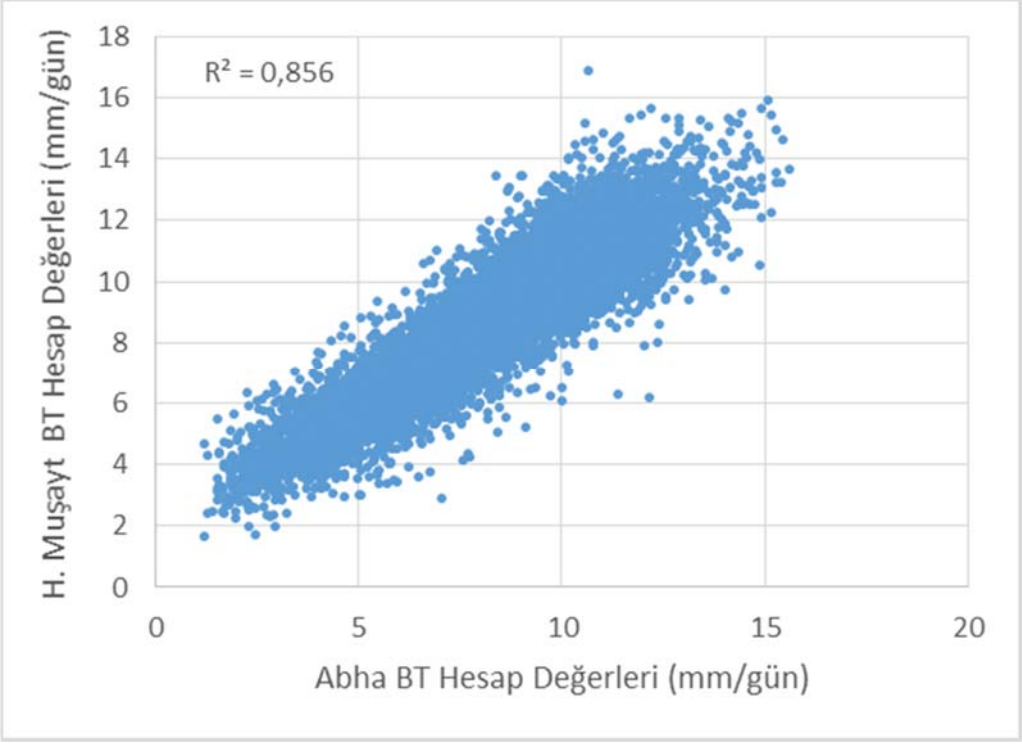
Şekil 5.7 : Dahran-Dammam BT değerleri karşılaştırması.



Şekil 5.8 : Dahran-Ahsa BT değerleri karşılaştırması.

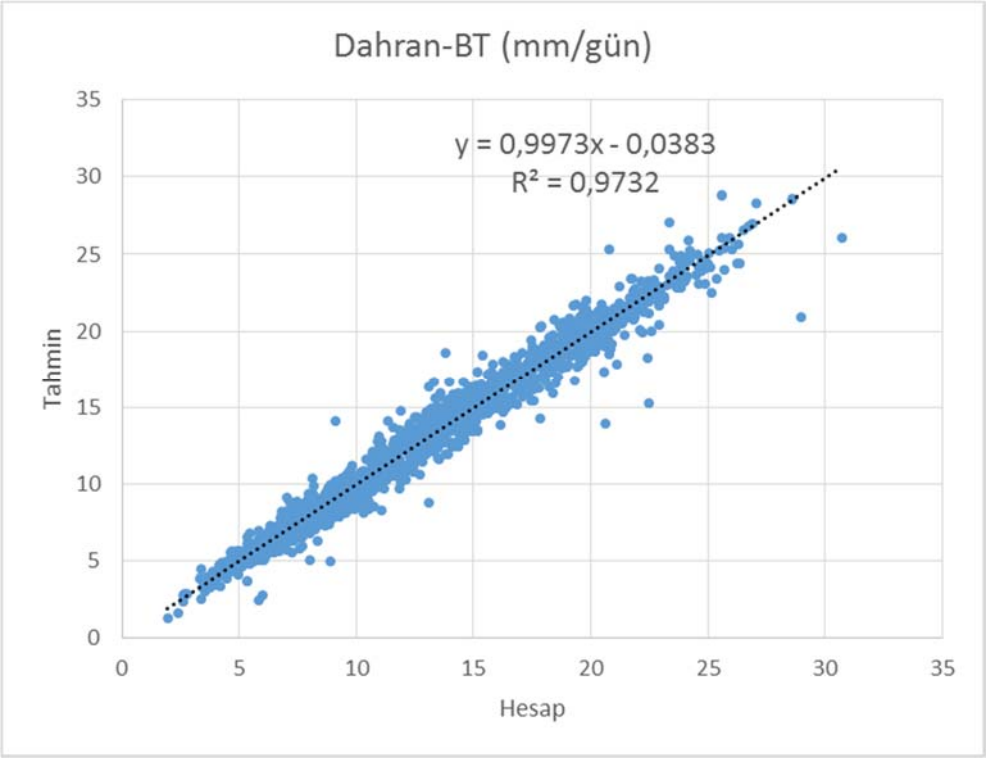


Şekil 5.9 : H. Muşayt-Bişa BT değerleri karşılaştırması.

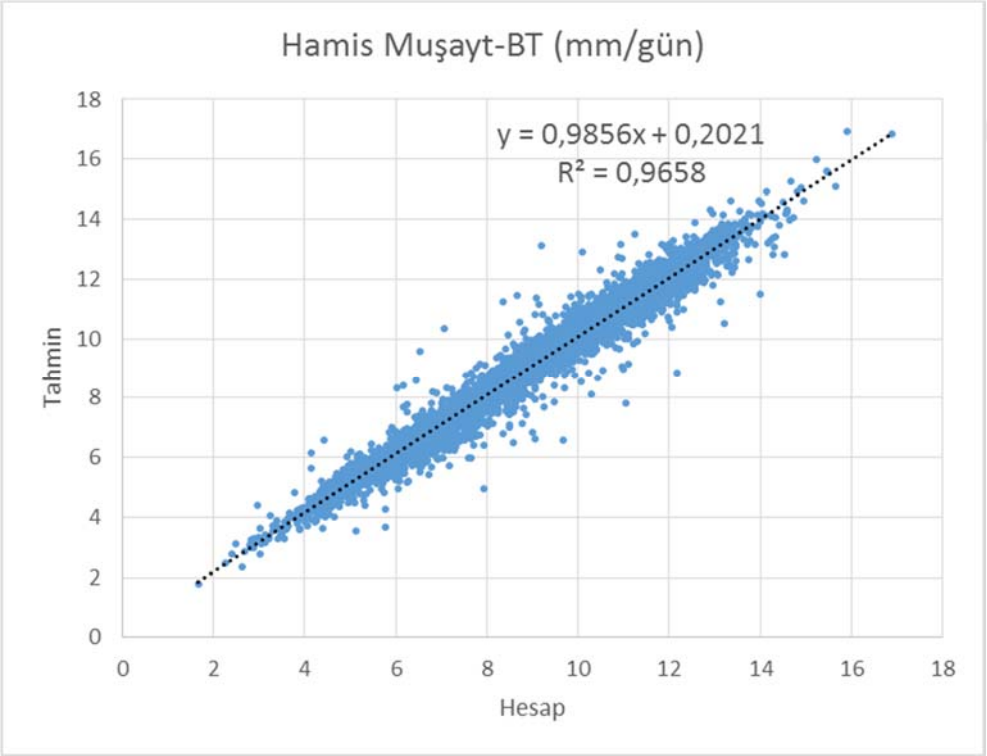


Şekil 5.10 : H. Muşayt-Abha BT değerleri karşılaştırması.

BT değerleri hesaplandıktan sonra Dahran ve Hamis Muşayt istasyonları için üç bulanık modele göre BT değerleri tahmin edilmiştir. Şekil 5.11 ve 5.12'de mevcut bulanık modelin (BM) BT tahminleri ve hesaplanmış BT değerlerinin kıyaslaması görülmektedir.



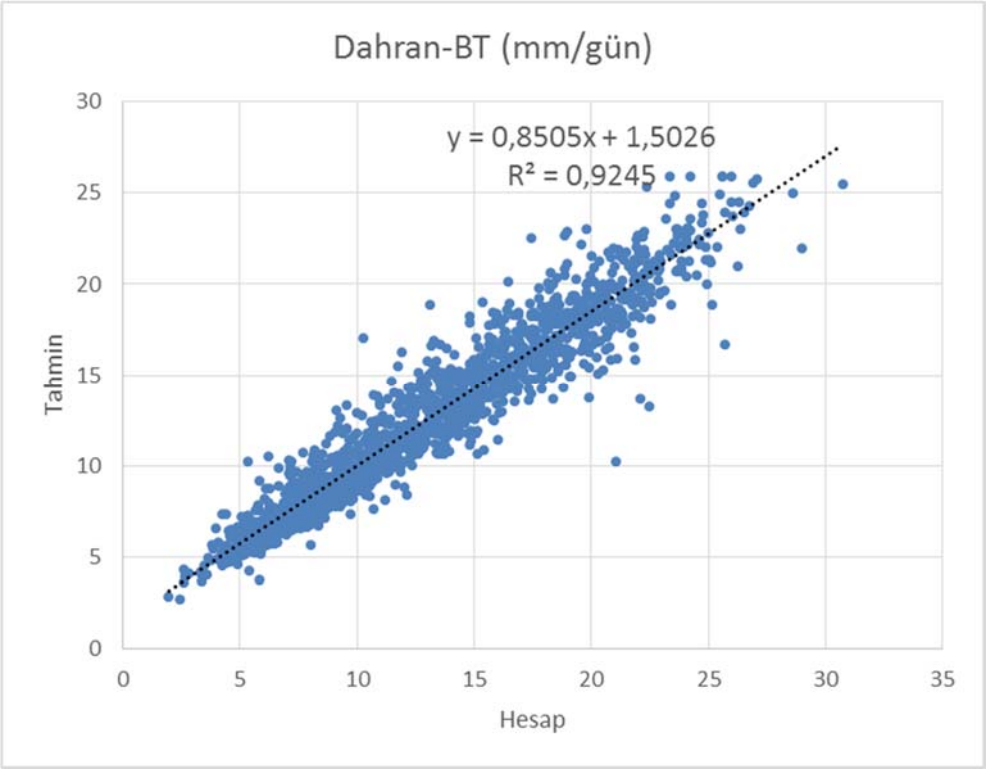
Şekil 5.11 : Dahran istasyonu için mevcut BM ile BT tahminleri.



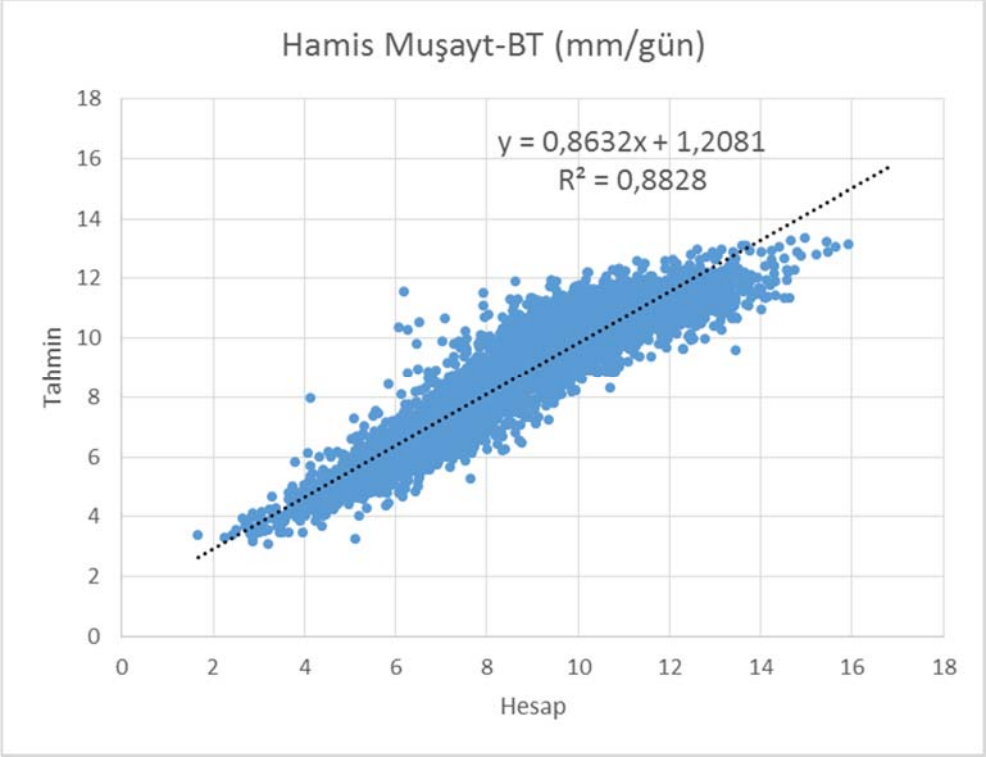
Şekil 5.12 : Hamis Muşayt istasyonu için mevcut BM ile BT tahminleri.

Şekillerden açıkça görülmektedir ki istasyonların kendine ait yeteri kadar veri çeşidi olması durumunda çok iyi tahminlere ulaşılmaktadır. Ortaya çıkan hata miktarları sayısal biçimde Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Verilerin olmaması durumunda tahmine

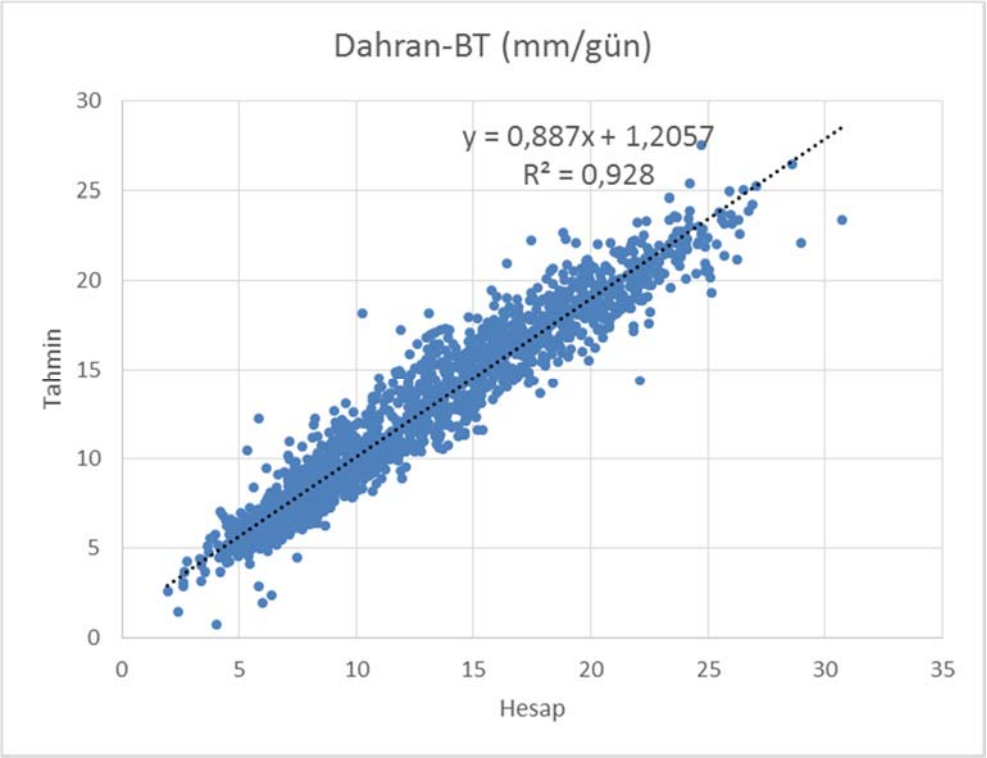
imkân sağlayan ve bölgesellikten faydalanarak önerilen iki modelin sonuçlarına gelince; BBM'nin çıktıları Şekil 5.13 ve 5.14'te kıyaslanmıştır.



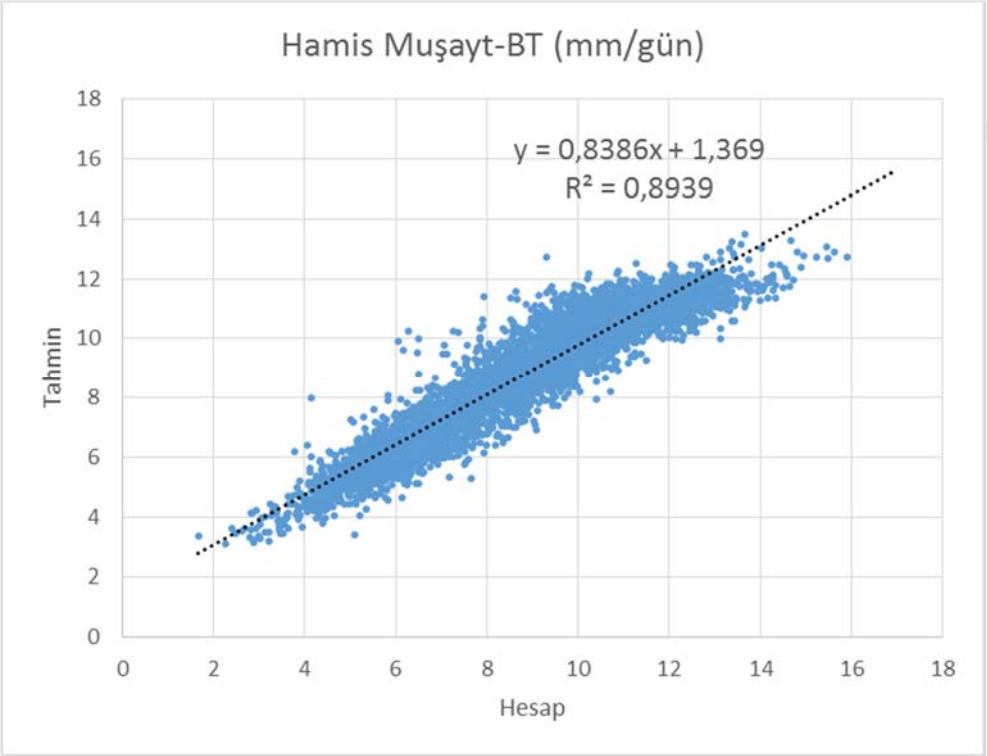
Şekil 5.13 : Dahran istasyonu için BBM ile BT tahminleri.



Şekil 5.14 : Hamis Muşayt istasyonu için BBM ile BT tahminleri.



Şekil 5.15 : Dahran istasyonu için BBZM ile BT tahminleri.



Şekil 5.16 : Hamis Muşayt istasyonu için BBZM ile BT tahminleri.

Şekil 5.13 ve 5.14'ten görüleceği üzere tahminlerde sapma bir miktar artmıştır zaten beklenti de bu yönde ortaya çıkmıştır. Çünkü ilgili istasyonun BT değerleri aynı bölgedeki diğer iki istasyonun verileri ile tahmin edilmiştir. Ancak şu da önemli bir

gerçektir ki bu model sayesinde verisi olmayan istasyonun BT değerlerinin tahminine olanak sağlanmıştır. Çizelge 5.2'de ortaya çıkan hata miktarları sayısal olarak da sunulmuştur. Bu aşamadan sonra tahminleri bir miktar daha iyileştirmek gerekmektedir. Bunun için de BT'yi etkileyen önemli dört girdi tek tek tahmin edilerek daha sonra BT'nin tahmin edildiği BBZM önerilmiştir. BBM gibi bölgesellikten faydalanan BBZM'nin sonuçları Şekil 5.14 ve 5.15'te sunulmuştur.

BBZM sayesinde her iki istasyonda da tahminler biraz daha iyileştirilmiştir. Ayrıca, Çizelge 5.2'de BBZM tahminlerinin sahip olduğu hataların sayısal değerleri yazılmıştır. Hatalar belirlenirken OMH'ya göre hesap yapılmıştır. Çizelge 5.3 ise yüzde hataları içermektedir. Yüzde hata hesaplanırken, OMH değeri PM denklemi ile hesaplanmış BT'nin ortalama değerine bölünüp yüz ile çarpılmıştır.

Çizelge 5.2 : Modellerin PM denklem sonuçlarına göre hataları.

Hamis Muşayt			Dahran		
BM	BBZM	BBM	BM	BBZM	BBM
0.649	1.162	1.207	0.339	0.633	0.651

Çizelge 5.3 : Modellerin PM denklem sonuçlarına göre % hataları.

Hamis Muşayt			Dahran		
BM	BBZM	BBM	BM	BBZM	BBM
%5.1	%9.1	%9.5	%3.9	%7.2	%7.4

6. SONUÇ

Yağışın ortaya çıkardığı sonuç özelliğindeki akış olayı özellikle küçük havzalarda tahmin edilmesi güç bir meseledir, çünkü akış miktarı birçok değişkenin etkisi altında ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada uç (tepe) debi tahmini gibi karmaşık bir olayın etkilendiği değişkenleri bulanık mantık (BM) bulanıklaştırma ilkesi ile tahminler klasik yöntemlere göre daha da iyileştirilmeye çalışılmıştır. İlk aşamada bulanık zincir modeli (BZM) I üretilmiştir ve bu modelden BZM II, bulanık model (BM) I ve BM II türetilmiştir. BZM I toprak nemliliğini ve her bir yağış ölçüm noktasını ayrı ayrı dikkate alması özelliğiyle diğer modellere göre çok daha hassas tahminler üretmiştir. BZM II'nin üretilmesindeki maksat ortalama yağışa nazaran her bir ölçüm noktasının değerlerini modele ayrı ayrı girmenin daha fazla fayda sağladığını göstermektir. BM I'in tasarlanma sebebi ise her havzada topram nemlilik için ilgili verilerin bulunmamasıdır. BM II üretilerek iki ölçüm noktasını ayrı ayrı dikkate alan BM I'e göre hassasiyetin kaybolduğu gösterilmek istenmiştir. Metindeki çizelgelerden (Çizelge 4.4, 4.5 ve 4.6'dan) görüleceği üzere, asıl vurgulanan BZM I en az hata ile en hassas tahminleri üretmiştir. Önerilen diğer modellere bakıldığında, küçük değerli olaylarda sırasıyla en iyi tahminler BZM II, BM I ve II tarafından yapılmıştır. Büyük değerli olaylarda ise bu sıralama BM I, II ve BZM II şeklinde gerçekleşmiştir. Bilinen yöntemlerden SCS-Snyder her iki tür olayda da en uzak tahminleri üretmiştir. Özetle, bu çalışmada önerilen dört model bilindik modele göre çok daha hassas tahmin yaparken yeni modeller arasından en iyi dereceyi BZM I almıştır. Modeller türetilirken ve eğitilirken İstanbul'un Avrupa yakasındaki küçük havzalarından Ayamama Havzası'nın 40.1 km^2'lik üst bölümünde gerçekleşen 23 olayın 15'i kullanılmıştır. Geriye kalan 8 olay ise modellerin sınanması ve kıyaslanması için dikkate alınmıştır.

Tez çalışması iki aşamadan müteşekkildir. İlk aşamasında uç debi açısından değerlendirmelerde bulunulmuştur. İkinci aşamada ise önerilen modeller arasından en iyi tahminci niteliğindeki BZM I ile üçgen hidrograf ve boyutsuz birim hidrograf (BBH) yardımıyla eğrisel (gerçekçi) hidrograflar üretilmiştir. Neticede, yine

metindeki şekillerden (Şekil 4.4-4.19'dan) görüleceği gibi BZM I çıktılarından yola çıkarak çizdirilen hidrograflar gözlemlenmiş hidrograflara en yakın şekilde ortaya çıkmıştır.

Tez çalışmasından türetilen ve Bölüm 1-4'ü içeren makale (Güçlü ve Şen, 2016) "Ekler" başlığı altında EK-A ile verilmiştir.

Bu tezde önerilen BZM ilkelerinin kullanışlılığı Bölüm 5'te sunulan ve farklı bir konuda gerçekleştirilen ek uygulama ile ayrıca gösterilmiştir. Bu ek uygulamanın neticeleri aşağıda aktarılan paragrafda sunulmuştur.

BT tahmini Kurak ve yarı kurak bölgelerde dikkate alınması gereken birinci konulardandır ve birçok araştırmacı bu konuda literatüre önemli katkılar yapmışlardır. Geniş bir kullanıma sahip PM denklemi BT hesabı için son derece kullanışlıdır. Ancak denklemde kullanılan tüm değerlerin sürekli ölçülmesi gerekmektedir. Bu durumu hafifletmek için bazı yapay zeka yöntemleri devreye sokularak modeller kurulmuştur ve üç-dört veri çeşidi ile de BT tahminleri yapılmıştır. En çok uygulanan bulanık model çeşidi bu çalışmada kullanılarak ayrıca kıyaslama için kullanılmıştır. Mevcut bulanık modeli istasyonun kendi verisi ile kullanıldığından beklendiği gibi daha az hata yapmıştır ki bu da Dahran ve Hamis Muşayt için sırasıyla yaklaşık %5 ve %4'tür. Bu çalışmanın asıl amacı ise bir istasyonda veri bulunmaması durumunda aynı bölgenin diğer istasyonlarına ait verilerle BT tahmininin yapılabilirliğini göstermektir. Suudi Arabistan'ın hem dağlık hem de düz bölgelerinde yapılan uygulamalar neticesinde tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Nisbeten basit bir model niteliğindeki BBM bir bölgeye ait istasyonların BT değerleri ile aynı bölgedeki diğer istasyon için BT'nin tahmin edilebilirliğini gözler önüne sermiştir. Model sırasıyla, Dahran ve Hamis Muşayt ölçüm noktaları için kabul edilebilir hata değerleri %9.5 ve %7.4 ile sonuç üretmiştir. BBZM ise tahminleri iyileştirmek için zincirleme bir şekilde tahmin yolu izlemiştir. Sonuçta, tahminlerdeki hatalar ilgili iki istasyon için yaklaşık %9 ve %7'ye kadar düşürülmüştür. Netice itibari ile bulanık mantık ilkelerine dayanan BBM ve BBZM kurak ülke Suudi Arabistan'ın farklı özellikteki iki bölgesinde kabul edilebilir tahminler üreterek BT tahmini için literatüre önemli katkılar sunmuştur.

Bulanık zincir model temellerinden faydalanılarak sunulan Bölüm 5 EK-B'de sunulan başka bir makale (Güçlü ve diğ., 2017) ile literatüre dahil edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abdullah, M. A., & Al-Mazroui, M. A. (1998). Climatological study of the southwestern region of Saudi Arabia. I. Rainfall analysis. *Climate Research*, *9*(3), 213-223.

Abtew, W., & Melesse, A. (2013). *Evaporation and Evapotranspiration*. Springer Netherlands.

Adamala, S., Raghuwanshi, N. S., Mishra, A., & Tiwari, M. K. (2013). Evapotranspiration modeling using second-order neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, *19*(6), 1131-1140.

Aghajanloo, M. B., Sabziparvar, A. A., & Talaee, P. H. (2013). Artificial neural network–genetic algorithm for estimation of crop evapotranspiration in a semi-arid region of Iran. *Neural Computing and Applications*, *23*(5), 1387-1393.

Allen, R. G. (1986). A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *112*(4), 348-368.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, *300*(9), D05109.

Almorox, J., Quej, V. H., & Martí, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*, *528*, 514-522.

Atalay, O. (2008). *Taşkın hidrografının elde edilmesiyle ilgili yöntemlerin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bayazıt, M., & Önöz, B. (2008). *Taşkın ve kuraklık hidrolojisi.* Nobel Yayın Dağıtım.

Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1962). *Determining consumptive use and irrigation water requirements* (No. 1275). US Department of Agriculture.

Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers.

Burnash, R. J. C., & Singh, V. P. (1995). The NWS river forecast system-Catchment modeling. *Computer models of watershed hydrology*, 311-366.

Carpenter, T. M., Sperfslage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T., & Fread, D. L. (1999). National threshold runoff estimation utilizing GIS in

support of operational flash flood warning systems. *Journal of Hydrology, 224*(1), 21-44.

Chang, F. J., Sun, W., & Chung, C. H. (2013). Dynamic factor analysis and artificial neural network for estimating pan evaporation at multiple stations in northern Taiwan. *Hydrological Sciences Journal*, *58*(4), 813-825.

Chang, T. K., Talei, A., Alaghmand, S., & Ooi, M. P. L. (2017). Choice of rainfall inputs for event-based rainfall-runoff modeling in a catchment with multiple rainfall stations using data-driven techniques. *Journal of Hydrology*, *545*, 100-108.

Chau, K. W., Wu, C. L., & Li, Y. S. (2005). Comparison of several flood forecasting models in Yangtze River. *Journal of Hydrologic Engineering, 10*(6), 485-491.

CRED (2016). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, EM-DAT the International Disaster Database. Erişim: 22 Eylül 2016, http://www.emdat.be/disaster_list/index.html.

El-Nesr, M., Alazba, A., & Abu-Zreig, M. (2010). Analysis of evapotranspiration variability and trends in the Arabian Peninsula. *American journal of environmental sciences*, *6*(6), 535-547.

Erdoğan, S. (2011). *Web servislerine dayalı bir afet ve acil durum yönetim sisteminin tasarlanması: Taşkın tahmin ve erken uyarı sistemleri örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Feldman, A. D., & Goldman, D. M. (1984). *Infiltration and Soil Moisture Redistribution in HEC-1* (No. HEC-TP-95). Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Feng, Y., Cui, N., Zhao, L., Hu, X., & Gong, D. (2016). Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, *536*, 376-383.

Finnerty, B. D., Smith, M. B., Seo, D. J., Koren, V., & Moglen, G. E. (1997). Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs. *Journal of Hydrology, 203*(1), 21-38.

Foster, H. A. (1924). Theoretical Frequency Curves and Their Application to Engineering Problem. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 88*(1), 142-173.

Fuller, W. E. (1914). Flood flows. *ASCE Trans., 77*, 567–617.

Gocić, M., Motamedi, S., Shamshirband, S., Petković, D., Ch, S., Hashim, R., & Arif, M. (2015). Soft computing approaches for forecasting reference evapotranspiration. *Computers and Electronics in Agriculture*, *113*, 164-173.

Güçlü, Y. S., Yeleğen, M. Ö., Dabanlı, İ., & Şişman, E. (2014). Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angström–Prescott and dependency models. *Solar Energy, 109*, 118-124.

Güçlü, Y. S., Dabanlı, İ., Şişman, E., & Şen, Z. (2015). HARmonic–LINear (HarLin) model for solar irradiation estimation. *Renewable Energy, 81*, 209-218.

Güçlü, Y. S., & Şen, Z. (2016). Hydrograph estimation with fuzzy chain model. *Journal of Hydrology, 538*, 587-597.

Güçlü, Y. S., Subyani, A. M., & Şen, Z. (2017). Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation, *Journal of Hyrology, 544*, 233–241.

Gumbel, E. J. (1941). The return period of flood flows. *The annals of mathematical statistics, 12*(2), 163-190.

Hargreaves, G. H. (1974). Estimation of Potential and Crop Evapotranspiration. *Trans. ASAE, 17*(4), 701-704.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric*, *1*(2), 96-99.

Hazen, A. (1921). Discussion of 'The probable variations in yearly runoff as determined from a study of California streams' by L. Standish Hall. *ASCE Trans, 84*, 214-222.

Hollister, G. B., & Leighton, M. O. (1903). *The Passaic flood of 1902* (No. 88). Geological Survey (US).

Jang, J. S. (1992). Self-learning fuzzy controllers based on temporal backpropagation. *IEEE Transactions on neural networks, 3*(5), 714-723.

Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *89*, 15-41.

Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. Amer. Soc. Civil Eng. Man. Rep. On Eng. Prac. No. 70. NY, USA.

Kadıoğlu, M. (2008). Sel risk yönetimi. *DSİ XI. Bölge Taşkın Konferansı,* Edirne: 19-20 Haziran.

Kim, S., & Kim, H. S. (2008). Neural networks and genetic algorithm approach for nonlinear evaporation and evapotranspiration modeling. *Journal of Hydrology*, *351*(3), 299-317.

Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering, 10*(6), 362.

Kuichling, E. (1889). The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 20*(1), 1-56.

Kumar, M., Raghuwanshi, N. S., & Singh, R. (2011). Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. *Irrigation science*, *29*(1), 11-25.

Linacre, E. T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural meteorology*, *18*(6), 409-424.

Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng*, *11*(3), 277-288.

Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 121*(12), 1585-1588.

Mascarenhas, F. C. B., Toda, K., Miguez, M. G., & Inoue, K. (2005). *Flood risk simulation.* WIT.

Mockus, V. (1957). *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. American Geophysical Union, Pacific Southwest Region, Sacramento, CA.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In *Symp. Soc. Exp. Biol*, *19*, 205-234.

Morita, M., & Fukuda, T. (2002). Decision support system for flood control facility planning based on inundation simulation and flood damage estimation using GIS. In *Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage*.

Mossad, A., & Alazba, A. A. (2016). Simulation of temporal variation for reference evapotranspiration under arid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, *9*(5), 1-9.

Mukerji, A., Chatterjee, C., & Raghuwanshi, N. S. (2009). Flood forecasting using ANN, neuro-fuzzy, and neuro-GA models. *Journal of Hydrologic Engineering, 14*(6), 647-652.

Ntelekos, A. A., Georgakakos, K. P., & Krajewski, W. F. (2006). On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods. *Journal of Hydrometeorology, 7*(5), 896-915.

O'Connell, P. P. L. (1868). On the relation of the fresh-water floods of rivers to the areas and physical features of their basins; and on a method of classifying rivers and streams, with reference to the magnitude of their floods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 27*(1868), 204-217.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145). The Royal Society.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, *100*(2), 81-92.

Senaviratne, G. A., Udawatta, R. P., Anderson, S. H., Baffaut, C., & Thompson, A. (2014). Use of Fuzzy rainfall–runoff predictions for claypan watersheds with conservation buffers in Northeast Missouri. *Journal of Hydrology*, *517*, 1008-1018.

Shamir, E., Lee, B. J., Bae, D. H., & Georgakakos, K. P. (2010). Flood forecasting in regulated basins using the ensemble extended Kalman filter with the storage function method. *Journal of Hydrologic Engineering, 15*(12), 1030-1044.

Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News Record, 108*, 501-505.

Snyder, F. F. (1938). Synthetic unit□graphs. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 19*(1), 447-454.

Soil Conservation Service (SCS) (1972). National Engineering Handbook (Sec. 4). Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington DC.

Sönmez, O., Öztürk, M., & Doğan, E. (2012). İstanbul Derelerinin Taşkın Debilerinin Tahmini. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16*(2), 130-135.

Sugeno, M. (1985). *Industrial applications of fuzzy control*. Elsevier Science Inc.

Şen, Z. (2001). *Bulanık mantık ve modelleme ilkeleri*. Bilge Kültür Sanat, İstanbul.

Şen, Z. (2004). *Yapay sinir ağları ilkeleri*. Su Vakfı, İstanbul.

Şen, Z. (2009). *İklim Değişikliği İçerikli Taşkın Afet ve Modern Hesaplama Yöntemleri.* Su Vakfı, İstanbul.

Şen, Z. (2009). *Fuzzy logic and hydrological modeling*. CRC Press, Boca Raton.

Şen, Z. (2011). *Mühendislikte felsefe, mantık, bilim ve etik.* Su Vakfı, İstanbul.

Şen, Z. (2013). Rational method irrationality with rectification, *6th International Perspective on Water Resources & the Environment conference*, İzmir, Turkey: January 7-9.

Tabari, M. M. R. (2016). Prediction of River Runoff Using Fuzzy Theory and Direct Search Optimization Algorithm Coupled Model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *41*(10), 4039-4051.

Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 15*(1), 116-132.

Tayfur, G., & Singh, V. P. (2006). ANN and fuzzy logic models for simulating event-based rainfall-runoff. *Journal of Hydraulic Engineering, 132*(12), 1321-1330.

Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review, 39*(7), 1082-1089.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, *38*(1), 55-94.

Todorovic, M., Karic, B., & Pereira, L. S. (2013). Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, *481*, 166-176.

Trajkovic, S. (2009). Comparison of radial basis function networks and empirical equations for converting from pan evaporation to reference evapotranspiration. *Hydrological processes*, *23*(6), 874-880.

Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron*, *12*(1), 13-49.

Url-1 < http://www.eu-orchestra.org/index.shtml>, erişim tarihi 20.09.2016.

Url-2 < http://www.worldbank.org/projects/P058877/emergency-flood-earthquake-recovery-project?lang=en> erişim tarihi 17.09.2016.

Url-3 <http://www.nws.noaa.gov/ohd/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/23sacsma.pdf>, erişim tarihi 22.09.2016.

USDA-NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55 (TR-55)*. US Government Printing Office, Washington, DC.

USDA-NRCS. (2004). *National Engineering Handbook* (Part 630, Chapter 16). Hydrology, Michigan.

Valiantzas, J. D. (2013). Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman–Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Hydrology*, *505*, 13-23.

Wu, X. L., Xiang, X. H., Wang, C. H., Chen, X., Xu, C. Y., & Yu, Z. (2013). Coupled hydraulic and Kalman filter model for real-time correction of flood forecast in the Three Gorges interzone of Yangtze River, China. *Journal of Hydrologic Engineering, 18*(11), 1416-1425.

Yaseen, Z. M., El-Shafie, A., Jaafar, O., Afan, H. A., & Sayl, K. N. (2015). Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000–2015. *Journal of Hydrology*, *530*, 829-844.

Yılmaz, K. K. (2007). *Towards improved modeling for hydrologic predictions in poorly gauged basins* (Doktora Tezi). The University of Arizona, ABD.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control, 8*(3), 338-353.

Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2015). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*. Florida, USA.

EKLER

EK-A: Tezden türetilen birinci makale (Güçlü ve Şen, 2016)

EK-B: Tezden türetilen ikinci makale (Güçlü ve diğ., 2017)

EK-A: Tezden türetilen birinci makale (Güçlü ve Şen, 2016)

Journal of Hydrology 538 (2016) 587–597

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Hydrograph estimation with fuzzy chain model

Yavuz Selim Güçlü *, Zekai Şen

Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Hydraulics Laboratory, Maslak, Istanbul, Turkey
King Abdulaziz University, Faculty of Earth Sciences, Department of Hydrogeology, Jeddah, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 February 2016
Received in revised form 17 April 2016
Accepted 26 April 2016
Available online 30 April 2016
This manuscript was handled by Andras Bardossy, Editor-in-Chief, with the assistance of Fi-John Chang, Associate Editor

Keywords:
Fuzzy
Hydrograph
Peak discharge
SCS
Snyder
Clark

SUMMARY

Hydrograph peak discharge estimation is gaining more significance with unprecedented urbanization developments. Most of the existing models do not yield reliable peak discharge estimations for small basins although they provide acceptable results for medium and large ones. In this study, fuzzy chain model (FCM) is suggested by considering the necessary adjustments based on some measurements over a small basin, Ayamama basin, within Istanbul City, Turkey. FCM is based on Mamdani and the Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) methodologies, which yield peak discharge estimation. The suggested model is compared with two well-known approaches, namely, Soil Conservation Service (SCS)-Snyder and SCS-Clark methodologies. In all the methods, the hydrographs are obtained through the use of dimensionless unit hydrograph concept. After the necessary modeling, computation, verification and adaptation stages comparatively better hydrographs are obtained by FCM. The mean square error for the FCM is many folds smaller than the other methodologies, which proves outperformance of the suggested methodology.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Due to intensive rainfall events surface water in the forms of floods or flash floods has occasional harms on human life and properties. Many cities, industrial and agricultural areas are subject to inundation. Rainfall, snowfall and snowmelt are taken into account in various water disasters related damages (Norbiato et al., 2008).

First time in the history of water disasters, O'Connell (1868) proposed flood forecasting even without rainfall measurements. He expressed the peak discharge as a non-linear function of the watershed area. With the start of rainfall measurements, Kuichling (1889) introduced the rational method, for peak discharge estimation in small basins. The first written report on floods was on Passaic River (Garfield, New Jersey, United States) (Hollister and Leighton, 1903), which included flood hydrographs and their consequent damages with numerical examples, without peak discharge estimation. With the start of simultaneous rainfall and runoff measurements Fuller (1914) presented statistical analysis for flood calculations. Later, Foster (1924), Hazen (1921) and Gumbel (1941) demonstrated the importance of the flood forecasting based on the normal (Gaussian), logarithmic-normal, Gamma and Pearson probability distribution functions (pdf's).

On the other hand, unit hydrograph (UH) methodology as rainfall–runoff model is suggested by Sherman (1932). Later, Snyder (1938) suggested a synthetic UH for flood forecasting based on the geomorphological features of drainage basin. Kirpich (1940) and Clark (1945) also proposed slightly different hydrograph methodologies. Subsequently, Soil Conservation Service (SCS) method (1972), Sacramento Soil Moisture Accounting (Sac-SMA) model (Burnash et al., 1973) and other techniques started to appear in the literature (Bhunya et al., 2005; Saghafian, 2006; Koutroulis and Tsanis, 2010; Zhang et al., 2012; Singh et al., 2013; Che et al., 2014).

Recently, the researchers started to use intelligent methods for hydrograph peak discharge estimation. Among these methods are the fuzzy inference system approaches (Chau et al., 2005; Casper et al., 2007; Talei et al., 2010a,b; Kar et al., 2012), artificial neural networks (Tayfur and Singh, 2006; Mukerji et al., 2009; Feng and Lu, 2010; Lohani et al., 2014), Kalman filter (Shamir et al., 2010; Wu et al., 2013) and genetic algorithm (Sedki et al., 2009; Chen et al., 2013). Additionally, Gericke and Smithers (2014) have presented a review of the time parameter estimation methods used internationally for the purpose of peak discharge estimation.

On the other hand, as for the rainfall–runoff transformation modern fuzzy logic methodology, especially Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS), has been employed in recent years for different water resources aspects such as water management and operation, drought and flood. As for the reservoir

* Corresponding author at: Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Hydraulics Laboratory, Maslak, Istanbul, Turkey. Tel.: +90 2122853715; fax: +90 2122853710.
E-mail address: gucluya@itu.edu.tr (Y.S. Güçlü).

http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.057
0022-1694/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

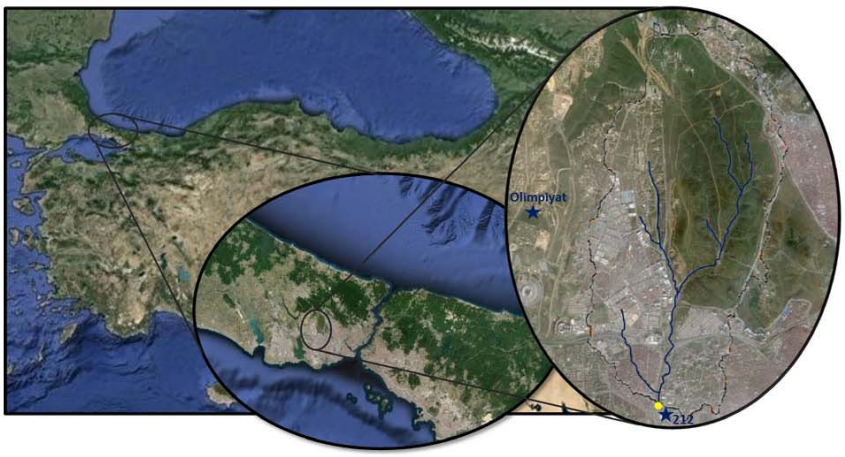


Fig. 1. Ayamama basin with the meteorology stations (stars) and the outlet (yellow point). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 1
Storm rainfall records.

Event number	Previous rainfall amount, R_P (mm)	Duration between the previous and the next rainfall event, D_B (h)	Average temperature between the previous and the next rainfall event, T (°C)	Rain duration, R_D (×10 min)	Olimpiyat rainfall amount, R_O (mm)	212 AVM rainfall amount, R_{212} (mm)	Peak discharge, Q_P (m^3/s)
1	2.0	30	20.0	2	11.8	0.8	*
2	2.0	50	25.6	4	3	*	1.21
3	3.4	0.75	17.2	5	*	2.8	2.01
4	2.8	1	22.0	2	5	0.6	2.37
5	2.0	300	22.5	3	5.8	4.6	3.85
6	2.8	25	13.0	3	1.2	3.4	5.26
7	1.4	95	7.6	3	5.4	2.6	*
8	4.0	5	11.5	4	14.2	*	11.59
9	8.0	150	24.5	3	*	2.8	4.01
10	2.0	250	21.5	3	2.8	2	2.81
11	2.6	1	17.5	5	5	1.8	1.65
12	0.6	17	22.0	3	4.8	2.0	2.77
13	4.0	12	17.7	4	6.8	1.8	*
14	3.0	2	14.5	3	2.8	*	5.22
15	1.0	0.4	22.6	4	*	3.8	42.72
16	6.0	10	16.0	4	6	1.6	3.55
17	2.0	1.5	21.5	2	7	1.2	2.96
18	0.4	0.5	14.3	3	7.8	*	5.52
19	3.0	0.5	13.3	3	*	3.6	13.61
20	15.0	125	24.5	4	8.2	2.6	3.43
21	2.0	1.5	6.8	3	5.2	1.2	3.31
22	2.0	11	7.6	5	8.6	*	3.56
23	8.0	30	15.0	4	*	1.8	3.52
Mean	3.48	48.66	17.3	3.4	9.1	2.5	5.77

* Covered data.

operation fuzzy rule base principles are applied as optimization and operation techniques coupled with other approaches by Saad et al. (1996), Russell and Campbell (1996) and Shrestra et al. (1996). Along this line rule base derivations from observations are presented by Bárdossy and Duckstein (1995). In the meantime, Russell and Campbell (1996) suggested that specifically increase in the fuzzy rule number may cause to unidentifiable and unmanageable solutions. In this paper by the chain affect this point is relieved to a certain extent.

A spatio-temporal lumping of radar rainfall modeling inflow forecasts to mitigate time-lag problems is suggested as forecast accuracy improvement by Chang and Tsai (2016). They have employed Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) models coupled with a 2-staged Gamma Test (2-GT) procedure that identified the optimal non-trivial rainfall inputs. It is observed that ANFIS models with only two fuzzy if-then rules can effectively categorize inputs into two levels (i.e. high and low) and provide an insightful view (perspective) of the rainfall–runoff process, which

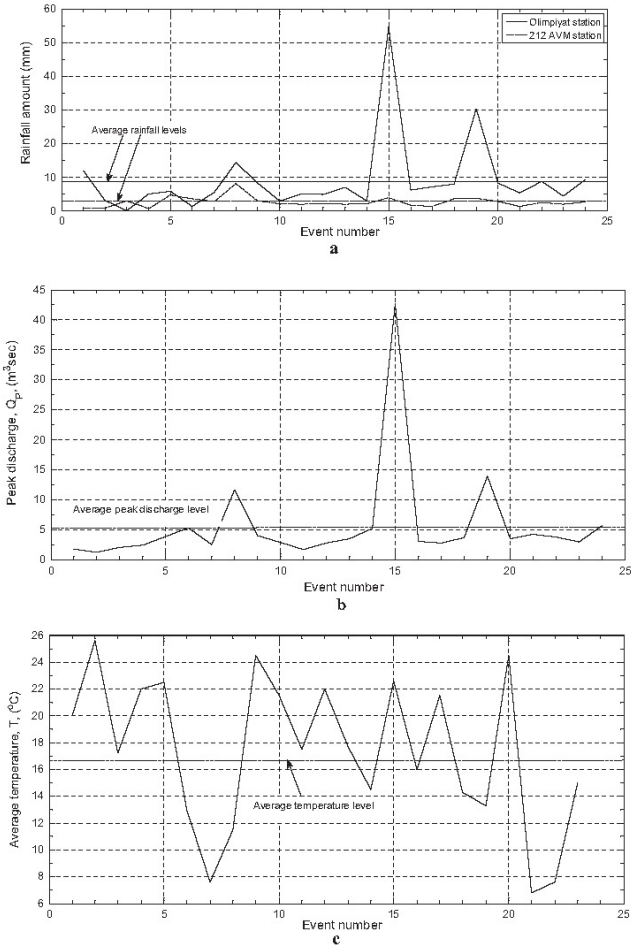


Fig. 2. Ayamama basin variables (a) total storm rainfall, (b) peak discharge, (c) average temperature.

demonstrate their capability in modeling the complex rainfall–runoff process. Rainfall–runoff modeling procedures are presented by various authors by means of the Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS), which is an automatic approach for converting the rainfall input into runoff output through a set of fuzzy rules (Talei et al., 2010a,b, 2013).

The ANFIS is adopted to construct the mechanism between designed inputs (water discount rate and the exceedance probabilities of hydrological conditions) and simulated outputs (water deficiency levels) with applications to Shihmen Reservoir watershed of northern Taiwan (Chang and Wang, 2013).

In this paper, fuzzy logic inference principles are used and a fuzzy chain model (FCM) is developed for estimation of peak discharge and hydrograph generation based on available numerical and linguistic data. The application is presented for a small basin, Ayamama basin, within Istanbul City, Turkey.

2. Study area and data

Istanbul megacity has its foundations on seven hills and it has about 200 km extension from east to west; 60 km long from south to north with 647 km coastline and 5343 km^2 surface area including 247 streams of various sizes.

Occasional floods threaten the safety of the residential and suburban areas. One of the up-stream sub-basins from Ayamama basin (see Fig. 1) is chosen for the application of FCM. It is a small

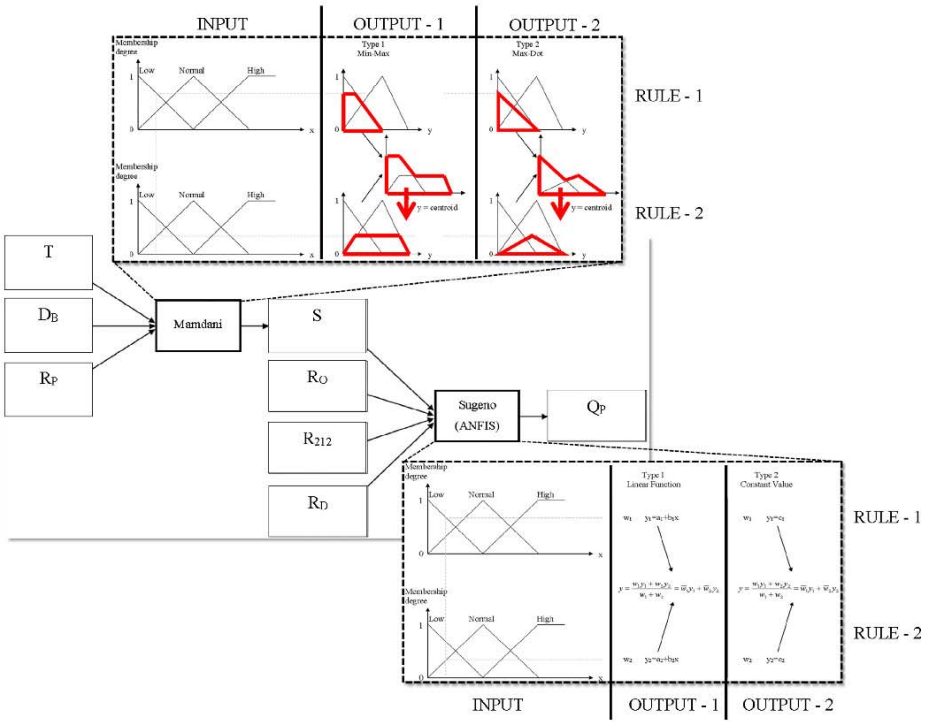


Fig. 3. One input and one output Mamdani and Sugeno FIS examples on FCM scheme.

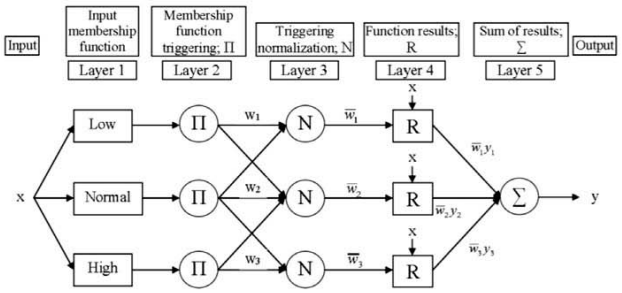


Fig. 4. ANFIS structure for one input and one output.

sub-basin with area of 40.1 km^2, which is subject to potential flood risks. For instance, in 2009, an unprecedented flood occurred in this basin, which had 300-year recurrence interval causing deaths and property losses.

The precipitation measurements are available at two stations in addition to the flow data at the outlet. After data reliability analysis only 23 storm rainfall records are taken into consideration during the period from 2013–2014. The numerical data of these events are given in Table 1 and the graphical representations for some of the data sets are given in Fig. 2, separately.

It is obvious from Fig. 2a that the upper drainage basin receives higher storm rainfall amounts than the lower part, besides

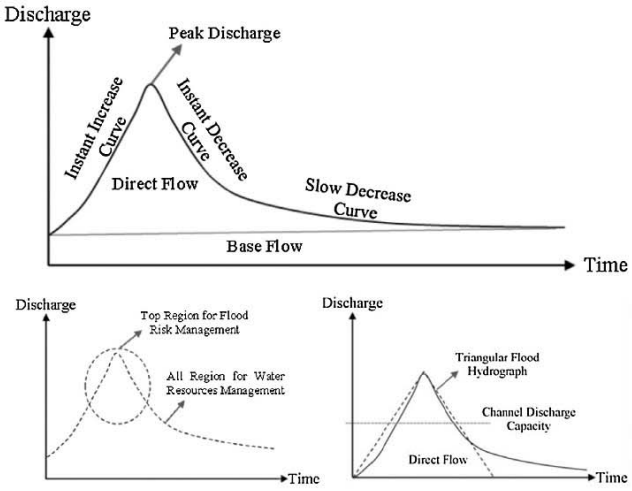


Fig. 5. Triangular flood hydrograph.

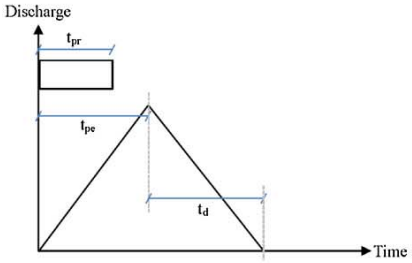


Fig. 6. Determination of t_{pr}, t_{pe}, and t_d on triangular flood hydrograph.

extremely high rainfall occurrences at the upper region do not have the same response at the lower part of the Ayamama drainage basin. Fig. 2b indicates that the runoff responses are in accord with the upper drainage basin rainfalls (Olimpiyat meteorology station), whereas the lower part meteorology station (212 AVM) rainfall does not have a significant impact on the peak flood discharges. There are three flood incidences compared with the average runoff value. The most extreme flood amount reaches up to 47 m^3/sec, which is about 42.72/5.7 = 7.5 folds greater than the average runoff; the next one is 13.86/5.7 = 2.43 times greater than the average and the third is 11.59/5.7 = 2.0 times bigger.

In the application of the suggested methodology, 15 of these records are considered for model training stage whereas the remaining 8 events are kept for testing.

3. Methodology

There are different methods in the hydrology literature, for peak discharge estimation and hydrograph generation. Among them the

Table 2
DUH coordinates.

Time ratio (t/t_p)	Discharge ratio (q/q_p)	Time ratio (t/t_p)	Discharge ratio (q/q_p)
0.0	0.000	1.7	0.460
0.1	0.030	1.8	0.390
0.2	0.100	1.9	0.330
0.3	0.190	2.0	0.280
0.4	0.310	2.2	0.207
0.5	0.470	2.4	0.147
0.6	0.660	2.6	0.107
0.7	0.820	2.8	0.077
0.8	0.930	3.0	0.055
0.9	0.990	3.2	0.040
1.0	1.000	3.4	0.029
1.1	0.990	3.6	0.021
1.2	0.930	3.8	0.015
1.3	0.860	4.0	0.011
1.4	0.780	4.5	0.005
1.5	0.680	5.0	0.000
1.6	0.560		

Snyder (1938) and Clark (1945) approaches are combined with SCS (1972) methodology for the comparisons with the methodology suggested in this paper all required parameters of SCS-Snyder and SCS-Clark methods are calculated using Flood Hydrograph Package, HEC-1 (Hydrologic Engineering Center) software that runs under Watershed Modeling System (WMS) software.

The Snyder method has two parameters, one for peak discharge (c_p) and the other for time lag (t_p) calculations. These parameters are dependent on the drainage basin geomorphologic features such as the drainage area, main stream length, slope and the distance between the centroid projection on the main stream and the outlet point (Bhunya et al., 2005). In this study, they are calculated using the observed rainfall–runoff records according to the following expression.

$$c_p - \frac{Q_p t_p}{2.78A} \quad (1)$$

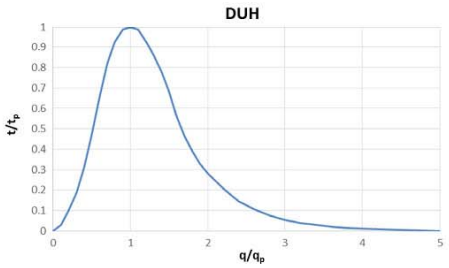


Fig. 7. Dimensionless unit hydrograph (USDA-NRCS, 2007).

Herein, Q_p is the peak discharge in m^3/s, t_p is the time in hours to reach the peak and A is the drainage area in km^2.

Clark method has also two parameters as watershed storage coefficient (r) and time of concentration (t_c) for the basin (Che et al., 2014). In theory, this method uses a conceptual basis of a linear channel, which flows into a linear reservoir. In general, it is the response time from the most remote location in the watershed to the outlet. On the other hand, r can be estimated by taking into consideration the discharge value at the inflection point of the recession limb of the hydrograph after dividing it by the recession limb slope at the same point. Synthetic hydrographs are produced by some empirical equations similar to the Snyder method.

Excess rainfall is calculated according to SCS loss method. For this purpose, the SCS Curve Number (CN) and initial abstraction rate, (I_A), expressing the losses, are calibrated according to the following expression,

$$P_e - \frac{(P - I_A)^2}{P - I_A + \left(\frac{25{,}400}{CN} - 254\right)} \tag{2}$$

Herein, P_e and P are the excess and total rainfall amounts, respectively. After the peak discharge and delay time calculations, the hydrograph is generated from the dimensionless unit hydrograph values.

3.1. Fuzzy chain model

Digital computers have the ability to process uncertain, incomplete, vague and linguistic information by means of approximate

Table 3
Training part inputs and outputs.

Event number	Soil moisture determination prior to training				Training				
	Previous rainfall amount, R_P (mm)	Duration between the previous and the next rainfall event, D_B (h)	Average temperature between the previous and the next rainfall event, T (°C)	Soil moisture, S (%)	Rain duration, R_D (×10 min)	Olimpiyat rainfall amount, R_O (mm)	212 AVM rainfall amount, R_{212} (mm)	Soil moisture, S (%)	Peak discharge, Q_P (m^3/s)
1	2	30	20	0.474	2	11.8	0.8	0.474	*
2	2	50	25.6	0.375	4	3	*	0.375	1.214
3	3.4	0.75	17.2	0.742	5	*	2.8	0.742	2.011
4	2.8	1	22	0.64	2	5	0.6	0.64	2.371
5	2	300	22.5	0.081	3	5.8	4.6	0.081	3.849
6	2.8	25	13	0.533	3	1.2	3.4	0.533	5.263
7	1.4	95	7.6	0.247	3	5.4	2.6	0.247	*
8	4	5	11.5	0.753	4	14.2	*	0.753	11.592
9	8	150	24.5	0.244	3	*	2.8	0.244	4.011
10	2	250	21.5	0.0817	3	2.8	2	0.0817	2.809
11	2.6	1	17.5	0.59	5	5	1.8	0.59	1.649
12	0.6	17	22	0.333	3	4.8	2	0.333	2.766
13	4	12	17.7	0.608	4	6.8	1.8	0.608	*
14	3	2	14.5	0.634	3	2.8	*	0.634	5.216
15	1	0.4	22.6	0.359	4	*	3.8	0.359	42.719
Inputs–output Fuzzy models	Input-1 Mamdani	Input-2	Input-3	Output	Input-1 ANFIS	Input-2	Input-3	Input-4	Output

* Covered data.

Table 4
Testing part inputs and outputs.

Event number	Soil moisture determination prior to testing				Testing					Peak discharge observation, Q_P (m^3/s)
	Previous rainfall amount, R_P (mm)	Duration between the previous and the next rainfall event, D_B (h)	Average temperature between the previous and the next rainfall event, T (°C)	Soil moisture, S (%)	Rain duration, R_D (×10 min)	Olimpiyat rainfall amount, R_O (mm)	212 AVM rainfall amount, R_{212} (mm)	Soil moisture, S (%)	Peak discharge estimation by FCM, Q_{FMC} (m^3/s)	
16	6	10	16	0.649	4	6	1.6	0.649	3.05	3.546
17	2	1.5	21.5	0.511	2	7	1.2	0.511	2.80	2.957
18	0.4	0.5	14.3	0.303	3	7.8	*	0.303	3.66	5.516
19	3	0.5	13.3	0.601	3	*	3.6	0.601	13.86	13.606
20	15	125	24.5	0.350	4	8.2	2.6	0.350	3.52	3.433
21	2	1.5	6.8	0.511	3	5.2	1.2	0.511	4.19	3.309
22	2	11	7.6	0.505	5	8.6	*	0.505	3.80	3.560
23	8	30	15	0.646	4	*	1.8	0.646	2.96	3.522
Inputs-Output Fuzzy models	Input-1 Mamdani	Input-2	Input-3	Output	Input-1 ANFIS	Input-2	Input-3	Input-4	Output	Measurement

* Covered data.

Table 5
SCS loss method, Snyder and Clark parameters.

SCS loss method		Snyder		Clark	
I_A (mm)	SCS-CN	t_d (h)	c_p (unitless)	t_c (h)	r (h)
2.5	95	0.295	0.15	0.18	1.75

Table 6
Observed and estimated peak discharges (m^3/s).

Event number, i	Observation peak discharge (m^3/s), Q_O	Model peak discharge (m^3/s), Q_M		
		FCM	SCS-Snyder	SCS-Clark
1	3.55	3.05	0.59	0.66
2	2.96	2.80	0.88	0.98
3	5.52	3.66	2.98	3.29
4	13.61	13.86	37.22	40.93
5	3.43	3.52	2.61	2.89
6	3.31	4.19	0.18	0.20
7	3.56	3.80	2.75	3.02
8	3.52	2.96	0.09	0.10
MSE		0.3280	7.6832	19.8765

reasoning through fuzzy logic principles (Zadeh, 1965; Şen, 2010). Fuzzy logic plays the major role in approximate reasoning through computers based on the fuzzy logic rule bases.

There are several fuzzy inference systems (FIS), with slightly different outputs. In Mamdani (1974) FIS both input and output variables are in the form of fuzzy membership functions (MF), where linguistically expressions in the form of rule base are dominant. However, in the Sugeno FIS, although input is in the form of fuzzy MFs, but the output is crisp either as a constant or a first order linear function (Takagi and Sugeno, 1985; Sugeno, 1985) (see Fig. 3). In this figure w_1 and w_2 represent membership degrees (MDs) that vary between 0 and 1. In this figure there are two successive parts, and therefore, it is referred to as FCM.

In the figure the shapes in the upper dashed box are for the classical Mamdani FIS application, where there are two rules concerning the inputs and a single output. Two different types of inference systems are presented in this box as OUTPUT-1 for minimization of the input MDs and then maximization of the output part. It is also possible to deduce the output as in the OUTPUT-2 case by minimization of the input MDs and then multiplication of the outputs from each rules. More detailed information about the FISs is given by Ross (1995). It is important to state at this point that although the outputs in the Mamdani FIS are in the form of polygons, the crisp values are obtained at the centroids of these polygons as shown in the figure by downward arrows.

The shapes in the bottom dashed box are for the Sugeno FIS, where the outputs are either in the forms of linear (OUTPUT-1) or a constant (OUTPUT-2) value.

In the medium part of this figure is the suggested FCM with Mamdani inputs and Sugeno output as the peak discharge. The input variables are individual total storm rainfall amounts, time duration and the mean temperature as explained in the Study Area and Data section. The symbols in the rectangulars are in accordance with the notation in Table 1.

In short, FCM includes Mamdani and Sugeno FISs in the form of two chain rings as upper and lower dashed rectangulars in Fig. 3. Mamdani approach is used as the first part of the chain with the output soil moisture data. Both input and output data should be known for the execution of FCM steps.

On the other hand, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) software train input and output variables and provides estimations in the best possible way (Jang, 1992). ANFIS uses mainly Sugeno FIS and gets support from the artificial neural network (ANN) in training phase (Şen, 2004). In Fig. 4, a sample single input and single output FIS is given according to ANFIS (Güçlü et al., 2014).

There are always uncertainties in any drainage basin hydrograph and its peak discharge calculations, but the fuzzy logic inference system can alleviate the uncertainties through fuzzification procedure (Ross, 1995).

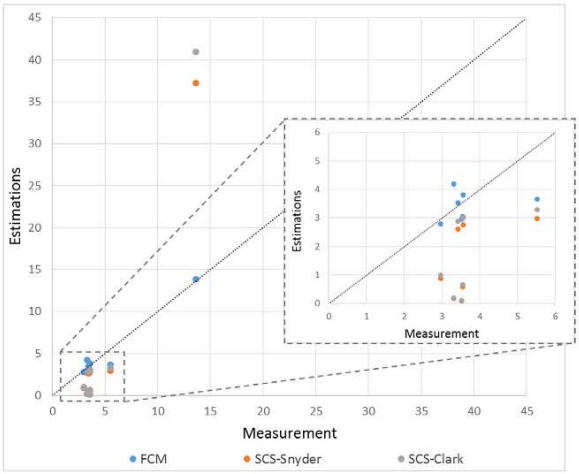


Fig. 8. Comparison of the peak discharges with respect to 1:1 straight line.

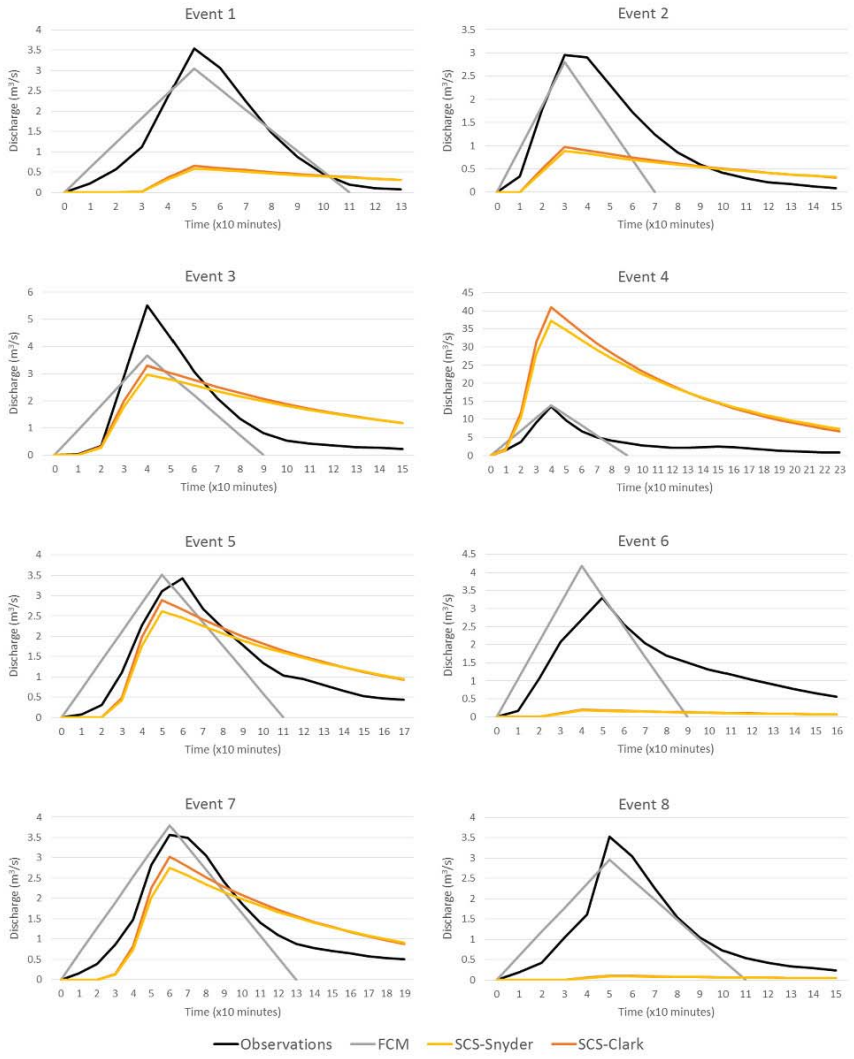


Fig. 9. Comparison of the hydrographs using triangular hydrograph for FCM.

FCM is used for peak discharge estimation by taking into consideration the following list of variables.

(1) Average temperature, T (°C): The mean temperature during period between previous and present precipitation events.
(2) Interval duration, D_E (h): The duration between previous and present precipitation events.
(3) Total average rainfall, R_P (mm): The total average rainfall measured at two stations during previous precipitation event.
(4) Soil moisture, S (%): Percentage value of soil moisture as the output whose inputs are T, D_E, and R_P in Mamdani FIS.
(5) Total rainfall in Olimpiyat, R_O (mm): The total rainfall measurement or estimation during present precipitation event at the first station.

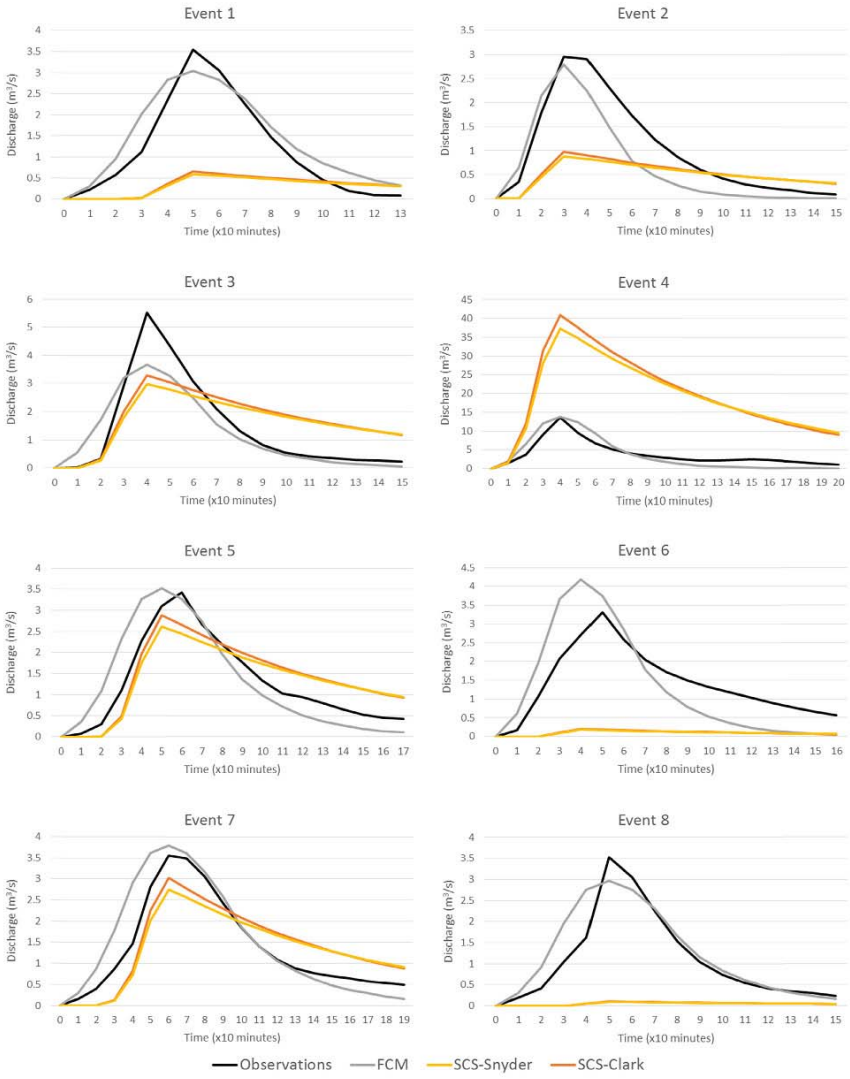


Fig. 10. Comparison of the hydrographs using DUH for FCM.

(6) Total rainfall in 212 AVM, R_{212} (mm): The total rainfall measurement or estimation during present precipitation event at the second station.
(7) Rainfall duration, R_D (min): The duration of present precipitation event.
(8) Peak discharge, Q_P (m^3/s): The peak discharge value as the output whose inputs are all the variables mentioned in the previous items for the ANFIS software.

Classical models yield constant peak discharge for precipitation events that occur with the same characteristics at different times, but in case of FCM peak discharges are different, because soil moisture variability is taken into consideration. Soil moisture percentages are calculated according to the R_P variable. For this purpose, Thiessen (1911) method is used to calculate each rainfall event R_P

measurements, which are considered separately through the ANFIS software, and hence, the results become more accurate.

The total area under the hydrograph is practically important for water resources, and flood risk and inundation managements (Fig. 5).

In this paper the simplest forms of the hydrograph are obtained from the triangular flood hydrograph and the dimensionless unit hydrograph. For the construction of triangular hydrograph three time instances are important, namely, the precipitation (t_{pr}), the peak flow (t_{pe}) and recession limb (t_d) durations (Fig. 6). While peak discharge is estimated by FCM and the duration of rainfall and its amount are obtained by meteorological predictions, the remaining two durations (t_{pe} and t_d) should be determined for hydrograph completion. During the training stage, t_{pe} is related to t_{pr}, and t_d to t_{pe} through two constants, c_{pe} and c_d, as, follows.

$$t_{pe} - t_{pr} + c_{pe} \tag{3}$$

$$t_d - t_{pe} + c_d \tag{4}$$

On the other hand, dimensionless unit hydrograph (DUH) developed by United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) (2007) provides a basis for generation of the hydrograph provided that the peak discharge and its time of occurrence are known. DUH time and discharge ratios are given as in Table 2 with its shape in Fig. 7. In Table 2 and Fig. 7, t_p is the time to peak, and q_p is the peak discharge.

4. Application

The classical and FCM model applications are presented for the upper part of Ayamama basin in Istanbul (see Fig. 1). Among the 23 records, 15 events are considered for training to obtain the model parameter estimations and the model is then verified according to the remaining 8 events. The necessary calculation details are given in Tables 3 and 4 for training and testing parts, respectively.

SCS-Curve Number (SCS-CN) and initial abstraction (IA) for SCS loss method, delay time (t_d) and peak discharge coefficient (c_p) for Snyder, concentration time (t_c) and storage coefficient (r) for Clark method, totally 6 parameters are adjusted for SCS-Snyder and SCS-Clark models through HEC-1 software running under WMS software (Table 5).

For FCM application, the soil moisture value must be digitized prior to the use of ANFIS. Moisture values are determined as percentages by Mamdani FIS. Relationships between three inputs (T, D_E, and R_F) and soil moisture have been considered fuzzy logically, and then the rules and rule base are established accordingly.

(1) There is an inverse ratio between T and S. For example, if T is high then S is low.
(2) There is an inverse ratio between D_E and S. For example, if D_E is short then S is high.
(3) There is a direct ratio between R_F and S. For example, if R_F is high then S is high.

Four inputs versus peak discharge in FCM are trained by ANFIS software for the second chain ring. Finally, FCM peak discharge forecasts are obtained and they are given in Table 6. The comparison of the three methodologies can be made on the basis of the mean square error, MSE, which is defined as,

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{8}(Q_{Oi} - Q_{Mi})^2 \tag{5}$$

where Q_{Oi} and Q_{Mi} are the observation and model peak discharges from Table 6 and $i = 1, 2, 3, \ldots, 8$.

It is very obvious that the overall MSE for FCM is many folds smaller than the other two methodologies. Another way of comparison among the three methodologies is the scatter diagram in Fig. 8, which shows the scatter of the measurement values versus model predictions. The significance of this graph is that 1:1 (45°) straight-line is the indicator of the perfect model estimations. The closer are the model scatter points to this straight-line the better is the model. The scatter of all the model results indicates clearly that the FCM points have the closest positions to the 1:1 straight-line than others, and hence, FCM model outperforms others.

Parameter values, c_{pe} and c_d, in Eqs. (3) and (4) are determined after the peak discharges estimation by FCM. Herein, c_{pe} and c_d are calculated at 10 min with the experience gained from 15 training cases. The triangular flood hydrographs for 8 events are obtained with FCM.

For each event, observed and estimated hydrographs from three different models are compared visually on the same graph. In this way, a total of 8 cases are presented in Fig. 9 for the case of triangular hydrograph approach. As can be seen from this figure, FCM hydrographs are closer to observation hydrograph.

Fig. 10 is for the dimensionless unit hydrograph based calculations, which shows the hydrographs in a better curvature form and again the FCM results are far better than other two methodologies.

After all the explanations and application to gaged data, it is recommended that the proposed methodology is preferable over the classical ones, because its mean square error is many folds smaller than others. The proposed methodology is useful especially in cases of soil moisture component incorporation directly into the overall FCM modeling.

5. Conclusion

Peak discharge estimation is a difficult issue and especially in large basins temporal or spatial averages reduce the uncertainty ingredient. Hydrograph shows time variability of discharge in addition to peak discharge value. In this study, peak discharge estimation improvement is supported by fuzzification of affective variables in the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) approach. In this context, FCM is suggested especially for incorporation of the soil moisture component for better model output hydrograph determination. The FCM is capable to estimate peak discharge more precisely for all events than the classical models. The application of each methodology is presented for a small drainage basin from Istanbul City, Turkey, where there are two meteorology stations with some variables in each as the temperature and precipitation in addition to the peak discharge measurement at the basin outlet. In the application of all the methods, the hydrographs are obtained mainly by the use of the dimensionless unit hydrograph approach. However, for the FCM also triangular hydrograph calculations are presented. After all the calculations, it is observed that the FCM yields peak discharge results far better, because its mean square error (MSE) is many folds smaller than the classical alternatives. In order to confirm this point further, the scatter of points as observations versus each model estimations shows that the FCM model points are comparatively very close to 1:1 (45°) straight-line, which is valid for accurate model. As for the maximum peak discharge estimation the SCS-Clark method performs for the worst case, while SCS-Snyder for the minimum values.

Acknowledgements

The authors express their appreciation to Istanbul Metropolitan Municipality Disaster Coordination Center (IBB-AKOM) and its

engineers in meteorological and mapping department to data being ready and sharing for this study.

References

Bárdossy, A., Duckstein, L., 1995. Fuzzy Rule-based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems. CRC Press, Boca Raton.

Bhunya, P.K. et al., 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. J. Hydrol. Eng. 10 (6), 458–467.

Burnash, R.J.C., Ferral R.L., McGuire, R.A., 1973. A generalized streamflow simulation system-Conceptual modeling for digital computers. Technical Report of the Joint Federal-State River Forecast Center, Department of Water Resources, State of California and National Weather Service, 204 pp.

Casper, M., Gemmar, P., Gronz, O., Johst, M., Stüber, M., 2007. Fuzzy logic-based rainfall–runoff modelling using soil moisture measurements to represent system state. Hydrol. Sci. J. 52 (3), 478–490.

Chang, F.J., Tsai, M.T., 2016. A nonlinear spatio-temporal lumping of radar rainfall for modelling multi-step-ahead inflow forecasts by data-driven techniques. J. Hydrol. 535, 256–269.

Chang, F.J., Wang, K.W., 2013. A systematical water allocation scheme for drought mitigation. J. Hydrol. 507, 124–133.

Chau, K.W., Wu, C.L., Li, Y.S., 2005. Comparison of several flood forecasting models in Yangtze River. J. Hydrol. Eng. 10 (6).

Che, D., Nangare, M., Mays, L., 2014. Determination of Clark's unit hydrograph parameters for watersheds. J. Hydrol. Eng. 19 (2), 384–387.

Chen, C.S., Jhong, Y.D., Wu, T.Y., Chen, S.T., 2013. Typhoon event-based evolutionary fuzzy inference model for flood stage forecasting. J. Hydrol. 490, 134–143.

Clark, C.O., 1945. Storage and the unit hydrograph. Trans. ASCE 110, 1419–1488.

Feng, L.H., Lu, J., 2010. The practical research on flood forecasting based on artificial neural networks. Expert Syst. Appl. 37 (4), 2974–2977.

Foster, H.A., 1924. Theoretical frequency curves. ASCE Trans. 87, 142–203.

Fuller, W.E., 1914. Flood flows. ASCE Trans. 77, 567–617.

Gericke, O.J., Smithers, J.C., 2014. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. Hydrol. Sci. J. 59 (11), 1935–1971.

Güçlü, Y.S., Yeleğen, M.Ö., Dabanlı, İ., Şişman, E., 2014. Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angström-Prescott and dependency models. Sol. Energy 109, 118–124.

Gumbel, E.J., 1941. The return period of flood flows. Ann. Math. Stat. 12, 163–190.

Hazen, A., 1921. Discussion of 'The probable variations in yearly runoffas determined from a study of California streams' by L. Standish Hall. ASCE Trans. 84, 214–222.

Hollister, G.B., Leighton, M.O., 1903. The Passaic Flood of 1902, Water Supply Paper 88. USGS, Washington, DC.

Jang, J.S.R., 1992. Self-learning fuzzy controller based on temporal back-propagation. IEEE Trans. Neural Networks 3 (5), 714–723.

Kar, A., Winn, L., Lohani, A., Goel, N., 2012. Soft computing-based workable flood forecasting model for Ayeyarwady River Basin of Myanmar. J. Hydrol. Eng. 17 (7), 807–822.

Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. Civ. Eng. 10 (6), 362, The original source for the Kirpich equation.

Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., 2010. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofyros basin, Crete. J. Hydrol. 385, 150–164.

Kuichling, E., 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 20, 1–56.

Lohani, A.K., Goel, N., Bhatia, K., 2014. Improving real time flood forecasting using fuzzy inference system. J. Hydrol. 509, 25–41.

Mamdani, E.H., 1974. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Proc. IEEE 121 (12), 1585–1588.

Mukerji, A., Chatterjee, C., Raghuwanshi, N.S., 2009. Flood forecasting using ANN, Neuro-Fuzzy, and Neuro-GA models. J. Hydrol. Eng. 14 (6).

Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., Anquetin, S., 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins. J. Hydrol. 362, 274–290.

O'Connell, P.E.L., 1868. On the relation of the freshwater floods of rivers to the areas and physical features of their basins and on a method of classifying rivers and streams with reference to the magnitude of their floods. Minutes Proc. Inst. Civ. Eng. 27 (1868), 204–217.

Ross, T.J., 1995. Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw Hill Co., New York.

Russell, S.O., Campbell, P.F., 1996. Reservoir operating rules with fuzzy programming. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 122 (3), 165–170.

Saad, M., Bigras, P., Turgeon, A., Duquette, R., 1996. Fuzzy learning decomposition for the scheduling of hydroelectric power systems. Water Resour. Res. 32 (1), 179–186.

Saghafian, B., 2006. Nonlinear transformation of unit hydrograph. J. Hydrol. 330, 596–603.

Sedki, A., Ouazar, D., El Mazoudi, E., 2009. Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall–runoff forecasting. Expert Syst. Appl. 36 (1), 4523–4527.

Shamir, E., Lee, B., Bae, D., Georgakakos, K.P., 2010. Flood forecasting in regulated basins using the ensemble extended Kalman Filter with the storage function method. J. Hydrol. Eng. 15 (12).

Sherman, L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Eng. News Rec. 108, 501–505.

Shrestra, B.P., Duckstein, L., Stakhiv, E.Z., 1996. Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 122 (4), 262–269.

Singh, P.K., Mishra, S.K., Jain, M.K., 2013. A review of the Synthetic Unit Hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. Hydrol. Sci. J. 59 (2), 239–261.

Snyder, F.F., 1938. Synthetic unit-graphs. Trans. Am. Geophys. Union 19, 447–454.

Soil Conservation Service (SCS), 1972. National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

Sugeno, M. (Ed.), 1985. Industrial Applications of Fuzzy Control North-Holland, New York.

Şen, Z., 2004. Yapay Sinir Ağları İlkeleri (in Turkish). Turkish Water Foundation Publications, Istanbul.

Şen, Z., 2010. Fuzzy Logic and Hydrological Modelling. CRC Press, Boca Raton.

Takagi, T., Sugeno, M., 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans. Syst.: Man Cybern. 15 (1), 116–132.

Talei, A., Chua, L.H.C., Quek, C., 2010. A novel application of neuro-fuzzy computational technique in event-based rainfall–runoff modeling. Expert Syst. Appl. 37, 7456–7468.

Talei, A., Chua, L.H.C., Wong, T.S., 2010. Evaluation of rainfall and discharge inputs used by Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS) in rainfall–runoff modelling. J. Hydrol. 391 (3), 248–262.

Talei, A., Chua, L.H.C., Quek, C., Jansson, P.E., 2013. Runoff forecasting using a Takagi-Sugeno neuro-fuzzy model with online learning. J. Hydrol. 488, 17–32.

Tayfur, G., Singh, V.P., 2006. ANN and fuzzy logic models for simulating event-based rainfall–runoff. J. Hydraulic Eng. 132 (12).

Thiessen, A.H., 1911. Precipitation for large areas. Mon. Weather Rev. 39, 1082–1084.

USDA-NRCS, 2007. National Engineering Handbook, Part 630 (Hydrology) Chapter 16, Michigan.

Wu, X., Xiang, X., Wang, C., Chen, X., Xu, C., Yu, Z., 2013. Coupled hydraulic and Kalman filter model for real time correction of flood forecast in the Three Gorges Interzone of Yangtze River, China. J. Hydrol. Eng. 18, 1416–1425.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. Inf. Control 8 (3), 338–353.

Zhang, Z., Koren, V., Reed, S., Smith, M., Zhang, Y., Moreda, F., Cosgrove, B.A., 2012. SAC-SMA a priori parameter differences and their impact on distributed hydrologic model simulations. J. Hydrol. 420–421, 216–227.

EK-B: Tezden türetilen ikinci makale (Güçlü ve diğ., 2017)

Journal of Hydrology 544 (2017) 233–241

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Research papers

Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation

Yavuz Selim Güçlü [a,b,*], Ali M. Subyani [b], Zekai Şen [a,c]

[a] Istanbul Technical University, Faculty of Civil Eng., Department of Hydraulics, Maslak, Istanbul, Turkey
[b] King Abdulaziz University, Faculty of Earth Sciences, Department of Hydrogeology, Jeddah, Saudi Arabia
[c] King Abdulaziz University, Center of Excellence for Climate Change Research, Department of Meteorology, Jeddah, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28 August 2016
Received in revised form 18 November 2016
Accepted 21 November 2016
Available online 22 November 2016
This manuscript was handled by Corrado Corradini, Editor-in-Chief, with the assistance of Gokmen Tayfur, Associate Editor

Keywords:
ANFIS
Evapotranspiration
FAO-56
Fuzzy
Penman-Monteith
Saudi Arabia

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is one of the main hydrological cycle components that has extreme importance for water resources management and agriculture especially in arid and semi-arid regions. In this study, regional ET estimation models based on the fuzzy logic (FL) principles are suggested, where the first stage includes the ET calculation via Penman-Monteith equation, which produces reliable results. In the second phase, ET estimations are produced according to the conventional FL inference system model. In this paper, regional fuzzy model (RFM) and regional fuzzy chain model (RFCM) are proposed through the use of adjacent stations' data in order to fill the missing ones. The application of the two models produces reliable and satisfactory results for mountainous and sea region locations in the Kingdom of Saudi Arabia, but comparatively RFCM estimations have more accuracy. In general, the mean absolute percentage error is less than 10%, which is acceptable in practical applications.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Evaporation is one of the main components in the hydrologic cycle and it is considered as a loss source in different surface and groundwater calculations. In regions close to the equator, it is comparatively more than northern or southern regions at same elevations. Evaporation from the dam reservoir and lakes are among the most important losses in many hydrological project design and water resources management studies. The amount of evaporation per unit area is calculated by Dalton's law as a rational approach. Depending on many factors, it can also be obtained by the pan-A evaporation instrument measurement. On the other hand, evaporation can be calculated also according to the budget equations, which takes into consideration the mass and energy conservation principles.

Transpiration implies water transfer from the soil through the plant roots maintaining the plant growth and a fraction of this water is lost via photosynthesis during daylight hours. Researches on macro scale subjects such as water resources management, irrigation and drainage take into account transpiration together with evaporation constituting evapotranspiration (ET).

A set equations are proposed by many researchers to calculate ET (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Makkink, 1957; Turc, 1961; Blaney and Criddle, 1962; Jensen and Haise, 1963; Monteith, 1965; Priestley and Taylor, 1972; Hargreaves, 1974; Linacre, 1977; Hargreaves and Samani, 1985). Additionally, Abtew and Melesse (2013) also presented detail calculations concerning evaporation and ET measurements leading to their estimations.

ET calculation models use meteorological measurements as input variables, but others consider several inputs and produce ET values. Jensen et al. (1990) presented the most accurate results by comparing top 20 ET calculation methods in arid and humid regions. As a result, they have concluded that Penman-Monteith (PM) method modified by Allen (1986) is the most sensitive one for all regions with many input parameters (air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation). The PM method is adapted by the Food and Agriculture Organization-56 (FAO-56) where Allen et al. (1998) gave comprehensive information about it.

PM has a theoretical model that is based on the energy and mass balance equations. It has been an essential equation to calculate ET by many researchers. (Trajkovic, 2009; ElNesr et al., 2010; Todorovic et al., 2013; Valiantzas, 2013; Almorox et al., 2015;

* Corresponding author at: Istanbul Technical University, Faculty of Civil Eng., Department of Hydraulics, Maslak, Istanbul, Turkey.
E-mail address: gucluya@itu.edu.tr (Y.S. Güçlü).

http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.045
0022-1694/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

Mossad and Alazba, 2016). Nowadays, PM equation is the classical way of ET calculation. Recently, artificial intelligence (AI) techniques are entering into the scene of ET estimation. Among the AI methods are fuzzy logic (FL), artificial neural networks (ANN), genetic algorithms (GA) and their derivatives with different input types for ET estimation (Kim and Kim, 2008; Kumar et al., 2011; Chang et al., 2013; Aghajanloo et al., 2013; Adamala et al., 2014; Gocic et al., 2015; Fenga et al., 2016). All studies are carried out by the consideration of meteorology station measurements for ET estimations and calculations.

In this study, some stations in the Kingdom of Saudi Arabia (KSA) are considered as two groups in three parts. Initially, ET is estimated by using two nearby stations data set for the third station in the same area. For this purpose, a regional chain flow chart is developed similar to Güçlü and Şen (2016) fuzzy chain model. The third station ET estimations are obtained by the suggested regional fuzzy model (RFM) based on the two stations' ET values that are calculated by PM equation, which produces the most accurate results of the ET estimation. Sugeno FL system inference principles are the bases of the proposed models. RFM and RFCM model results are compared with the PM calculations and they yield almost the same result within practically acceptable limits of error.

2. Study area and data

The Kingdom of Saudi Arabia (KSA) is the largest country in the Arabian Peninsula (AP) with surface area of about 2.15×10^6 km^2. It covers more than three-quarters of the AP and its location is close to the equator between 16°21′58″N - 32°09′57″N latitudes and 34°33′48″E - 55°41′29″E longitudes (Fig. 1).

Sand storms and 30–35 °C temperatures are often recorded in this arid climate and desert country (ElNesr et al., 2010). While the temperature variation range is high in desert regions, but comparatively lesser in the coastal areas, where there are high relative humidity levels. Maximum annual precipitation is about 300 mm in the southwest region, while it is generally zero in the eastern deserts (Abdullah and Al-Mazroui, 1998).

From Saudi Presidency of Meteorology and Environment (PME), 6 meteorology stations are considered in this study. In some stations, measurements are available from 1970 to 2012 (43-year), but others have shorter duration as 14-year (1999–2012). The stations are grouped into 2 parts among three stations that are close to each other and 6 stations' data are used for estimations. Region, name, latitude, longitude, altitude, and record year information are given in Table 1 with locations in Fig. 1.

Each station has daily records, which are used for estimations. Herein, station groups are chosen at two different elevations, namely, at the mountainous and sea levels for testing the proposed model reliability. Aseer region Bisha, Abha and Khamis Mushait stations are on the mountainous region, whereas Ad-Dhahran, Al-Dammam and Al-Ahsaa stations in Ash-Sharqia region are approximately at the sea level. In this study, the data with the shortest length is considered for each part such as the 14-year (1999–2012) data for Ash-Sharqia region and 35-year (1978–2012) for the Aseer region.

3. Methodology

The proposed methodology of this paper has three steps. In the first stage, PM (FAO-56) equation is used to calculate ET values. The

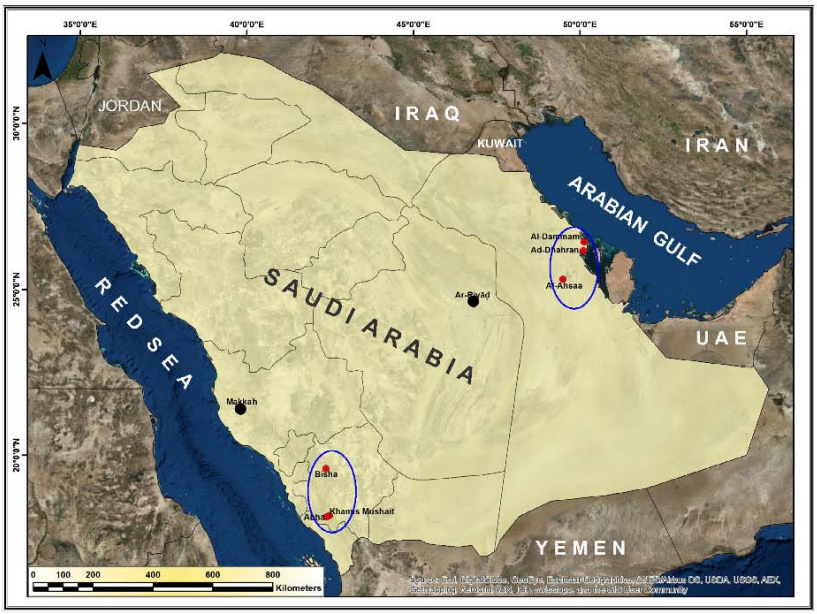


Fig. 1. Meteorology station locations and two groups of three stations inside the circles.

Table 1
Geographical information of the stations.

Region	Station name	Station coordinates			
		Latitude, N (Degree)	Longitude, E (Degree)	Altitude (m)	Record (Year)
Ash-Sharqia	Ad-Dhahran	26.16	50.10	17	43
	Al-Dammam	26.42	50.12	1	14
	Al-Ahsaa	25.30	49.48	179	28
Aseer	Bisha	19.59	42.37	1163	43
	Abha	18.14	42.39	2093	35
	Khamis Mushait	18.18	42.48	2057	43

next stage is practiced by many researchers and the classical model is based on the FL principles for ET estimations with four data types. Finally, in case of missing data at any station, RFM and RFCM approaches are proposed in the first stage for ET estimation by using the data from other stations in the same region.

3.1. Penman-Monteith (PM) equation

Since the last 70 years a set of empirical equations based on more than one parameter are proposed for ET estimations. Most of these equations are different versions of the original Penman (1948) equation, which includes parameters such as relative humidity, temperature, solar radiation, wind speed and atmospheric. The basic expression is based on mass and energy conservation principles and the ET can be estimated as,

$$ET - \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta(R_n - G) + (\gamma\lambda E_a)}{(\Delta + \lambda)} \quad (1)$$

In this expression, each term has the following meaning.

ET = evapotranspiration (mm d^{-1}),
Δ = slope of the saturated vapor pressure curve, [$\delta eo/\delta T_{mean}$, where e_o = saturated vapor pressure (kPa) and T_{mean} = daily mean temperature (°C)],
R_n = net radiation (MJ m^{-2} d^{-1}),
G = sensible heat flux into the soil (MJ m^{-2} d^{-1}),
λ = latent heat of vaporization (MJ kg^{-1}),
γ = psychrometric constant (kPa $°C^{-1}$),
E_a = vapor transport of flux (mm d^{-1}).

Consideration of Eq. (1) by Monteith (1965) lead to the following expression by adding some terms and the new version is referred to as Penman-Monteith (PM) expression.

$$ET - \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta(R_n - G) + 86400\frac{\rho_a C_p (e_s^o - e_a)}{r_{av}}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_{av}}\right)} \quad (2)$$

In this equation each term has the following meanings.

ρ_a = air density (kg m^{-3}),
C_p = specific heat of dry air (MJ kg^{-1} $°C^{-1}$),
e_s^o = mean saturated vapor pressure (kPa),
e_a = mean daily ambient vapor pressure (kPa),
r_{av} = bulk surface aerodynamic resistance for water vapor (s m^{-1}),
r_s = the canopy surface resistance (s m^{-1}).

Furthermore, Allen et al. (1998) improved PM equation by considering air temperature and wind speed, and finally, the PM expression became to be known as FAO-56 equation, which is commonly used and recommended by many researchers.

$$ET - \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

where the following meanings are attached to each term
T = mean air temperature (°C),
u_2 = wind speed at 2 m above the ground (m s^{-1}).

Zotarelli et al. (2015) has described the evolution of final equation in a historical way and also presented information about the calculation steps in detail.

3.2. Fuzzy models

Understanding of the true event is literally impossible, because of lack of human knowledge, but human can make comments by reviewing and simulating such events in the mind. On the other hand, as aid to human, computers have the ability to process information including uncertainties and for approximate reasoning through FL principles (Şen, 2010). Zadeh (1965) for the first time digitized the information by proposing FL rules to be handled in digital computers. FL plays the major role in approximate reasoning through computers based on the FL rule bases. Additionally, Tayfur (2012), explained the fundamentals and principles of FL using water resources applications.

In the literature, there are several fuzzy inference systems (FIS), whose outputs are rather different from each other. Mamdani (1974) suggested an inference system where input and output are considered as fuzzy sets and in the system literally verbal expressions are dominant. On the other hand, in the Sugeno FIS input is considered as fuzzy, while output is specified with deterministic terms (Takagi and Sugeno, 1985; Sugeno, 1985). Sugeno FIS can be considered including input as fuzzy and output as a constant coefficient or a linear function. Güçlü and Şen (2016) explained Mamdani and Sugeno FISs graphically as single-input-single-output modeling.

Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) software trains input and output variables and provides estimations and also allows estimation compliance between input and output in the best possible way (Jang, 1992). ANFIS uses mainly Sugeno FIS and gets support from the ANN in the training phase of the data (Şen, 2004). Güçlü et al. (2014, 2015) suggested an ANFIS structure of one input and one output as a sample and explained its principles.

In this study, two alternative fuzzy models are proposed using ANFIS software, and hence, ET estimations are obtained. The classical fuzzy model (CFM) with four-input-one-output are explained and its application is performed for the data at hand.

3.2.1. Classical fuzzy model (CFM)

So far, researchers have estimated ET for any station by benefiting from its own data with the model based on FL principles (Fig. 2). This model is extremely useful and produces accurate results, if there is complete data set for the station. However, FL

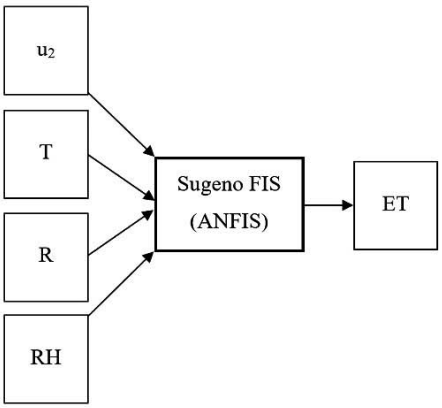


Fig. 2. CFM scheme.

model is also for the cases where there is no or lack of data and thus uncertainty.

In Fig. 2, ET is the evapotranspiration; u_2 is the wind speed at 2 m above the ground; T is the mean air temperature; R is the net solar radiation; and finally, RH is the relative humidity.

3.2.2. Regional fuzzy model (RFM)

As mentioned above, researchers (Kim and Kim, 2008; Kumar et al., 2011; Chang et al., 2013; Aghajanloo et al., 2013; Adamala et al., 2014; Gocic et al., 2015; Fenga et al., 2016) have obtained ET values versus inputs measured in the same meteorological station. In this study, dependence is proved in each one of the three stations in the same region, because the third station's ET values are estimated with the other two stations' ET values for the first time (Fig. 3).

Herein, two-input-one-output Sugeno model is set up to estimate ET. In Fig. 4, the sample model is drawn with inputs ET_1 and ET_2, and output ET_3. Additionally, w_i, is the membership function (MF) degree; ET_{3_i} is the equation result; a_i, b_i, and c_i are constant coefficients, ET_3 is the main result, where i = 1, 2, 3, 4. The sample model is established with four rules as follows.

Rule 1: If ET_1 is Low and ET_2 is Medium, then ET_3 is $ET_{3_1} = a_1ET_1 + b_1ET_2 + c_1$,
Rule 2: If ET_1 is Normal and ET_2 is Small, then ET_3 is $ET_{3_2} = a_2ET_1 + b_2ET_2 + c_2$,
Rule 3: If ET_1 is Low and ET_2 is Small, then ET_3 is $ET_{3_3} = a_3ET_1 + b_3ET_2 + c_3$,
Rule 4: If ET_1 is Normal and ET_2 is Medium, then ET_3 is $ET_{3_4} = a_4ET_1 + b_4ET_2 + c_4$.

Additionally, some verbal rules are expressed using actual ET variables for RFM. Relationships between two inputs (ET_1 and ET_2) and output, ET_3 have been considered fuzzy logically, and then the rules and rule base are established accordingly.

(1) There is a direct ratio between ET_1 and ET_3. For example, if ET_1 is low then ET_3 is low,
(2) There is a direct ratio between ET_2 and ET_3. For example, if ET_2 is very high then ET_3 is very high.

3.2.3. Regional fuzzy chain model (RFCM)

The structure of RFCM is proposed in Fig. 5 and three stations are taken into consideration in the same region similar to RFM in Fig. 3. However, this model has two steps, because the third station parameters (u_2, T, R, RH) are estimated first with ANFIS software one by one versus with the other two stations parameters. The third station ET values are estimated again by ANFIS this time with all parameter estimates as inputs (Fig. 5). As mentioned earlier, ET_i is the evapotranspiration; u_{2_i} is the wind speed at 2 m above the ground; T_i is the mean air temperature; R_i is the net solar radiation; RH_i is the, relative humidity, where i = 1, 2 and 3.

In order to estimate the third station ET values, first of all (first ring of chain), two-input-one-output Sugeno models is established and each parameter is obtained. For the second ring of RFCM, four-input-one-output Sugeno model is set up and the model is retrained. In Fig. 6, the sample model is drawn with inputs u_{2_i}, T_i, R_i, RH_i, and output ET_i. Additionally, w_i, is the MF degree; ET_{i_i} is the sub-result; a_i, b_i, c_i, d_i, and e_i are coefficients, and finally, ET_i is the main result. The sample model is established with three rules as follows.

Rule 1: If R_i is Low, RH_i is Medium, T_i is Cold, and u_{2_i} is SlowFast, then ET_i is $ET_{i_1} = a_1R_i + b_1RH_i + c_1T_i + d_1u_{2_i} + e_1$,
Rule 2: If R_i is Normal, RH_i is Medium, T_i is Moderate, and u_{2_i} is SlowFast, then ET_i is $ET_{i_2} = a_2R_i + b_2RH_i + c_2T_i + d_2u_{2_i} + e_2$,
Rule 3: If R_i is Low, RH_i is Small, T_i is Moderate, and u_{2_i} is SlowFast, then ET_i is $ET_{i_3} = a_3R_i + b_3RH_i + c_3T_i + d_3u_{2_i} + e_3$.

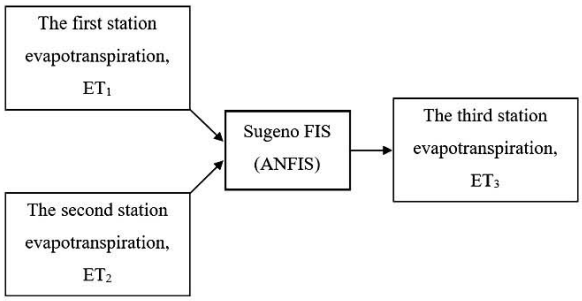


Fig. 3. RFM scheme.

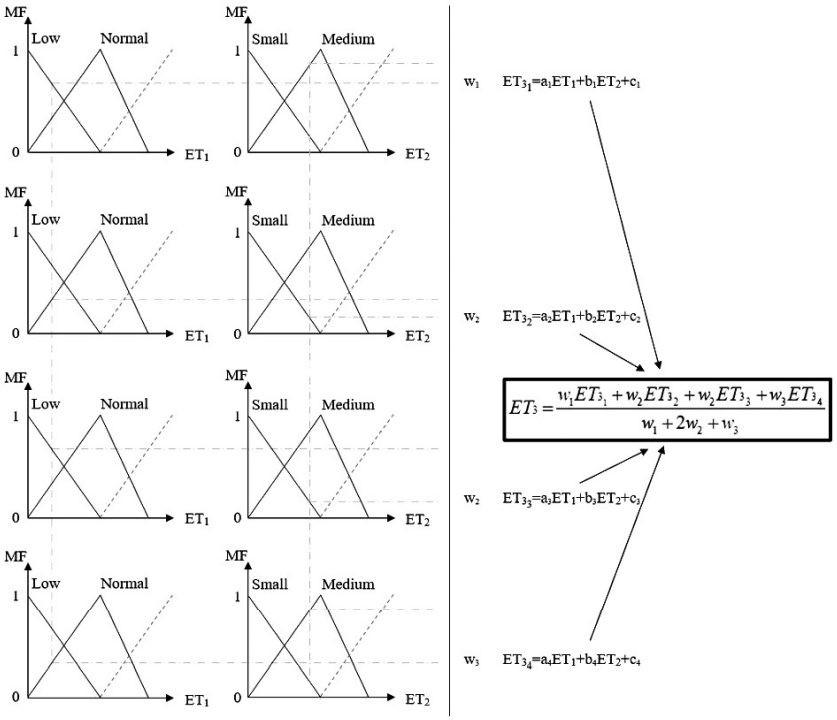


Fig. 4. Two inputs (ET_1, ET_2)-one output (ET_3) Sugeno model with four sample rules.

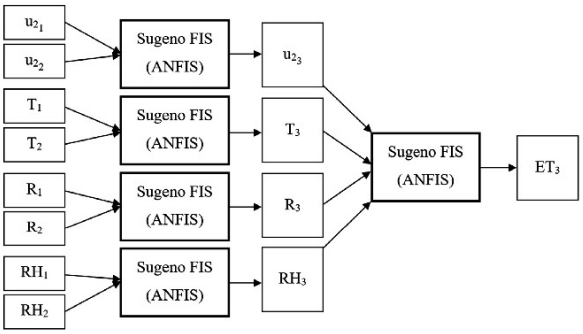


Fig. 5. RFCIM scheme.

For verbal rules, relationships between four inputs (u_{2_i}, T_i, R_i, RH_i) and output, ET_i have been considered fuzzy logically, and then the rules and rule base are established for calibration stage.

(1) There is a direct ratio between u_{2_i} and ET_i. For example, if u_{2_i} is low then ET_i is low,
(2) There is a direct ratio between T_i and ET_i. For example, if T_i is high then ET_i is high.

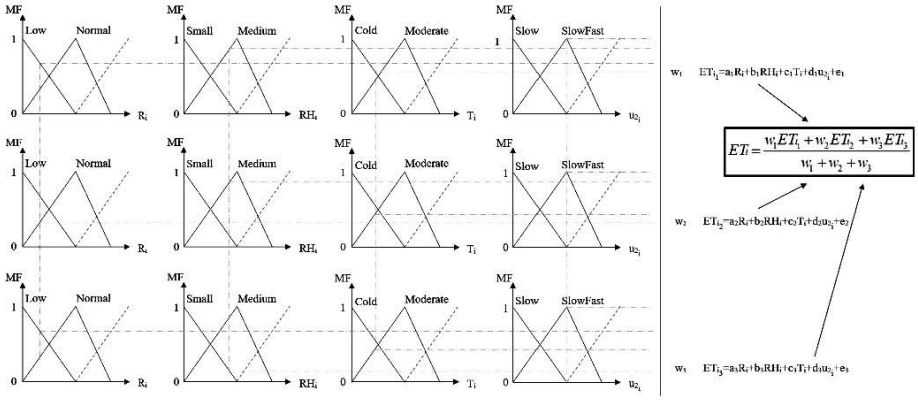


Fig. 6. Four inputs (R_i, RH_i, T_i, u_{2_i})-one output (ET_i) Sugeno model with three sample rules.

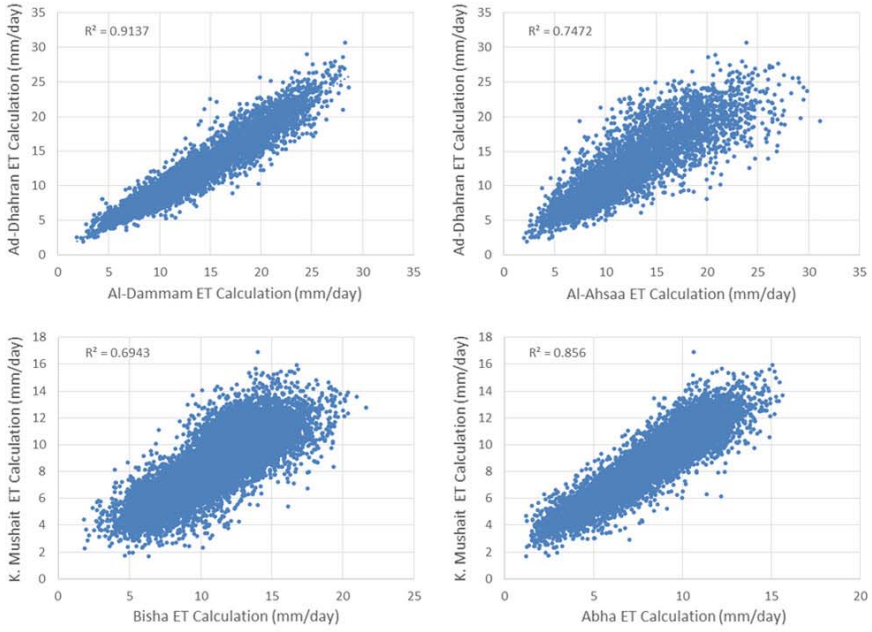


Fig. 7. Dependences in each one of the three stations in the same region.

(3) There is a direct ratio between R_i and ET_i. For example, if R_i is very low then ET_i is very low,
(4) There is an inverse ratio between RH_i and ET_i. For example, if RH_i is low then ET_i is high.

4. Application

Data from two different regions of the KSA are used for PM and ET calculations by means of three FL inference system models two

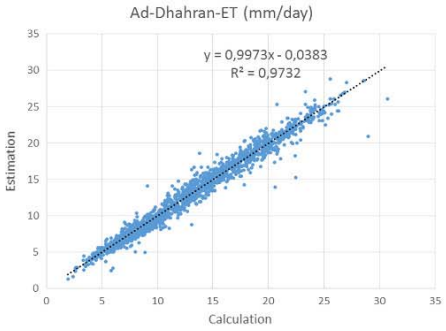


Fig. 8. Comparison of ET calculations and estimations with CFM for Ad-Dhahran station.

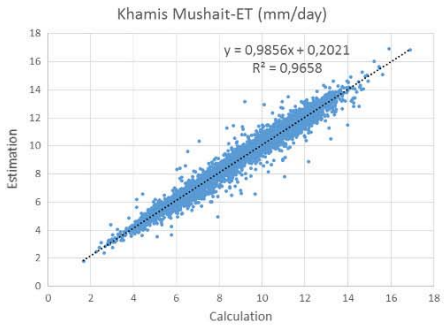


Fig. 9. Comparison of ET calculations and estimations with CFM for Khamis Mushait station.

of which are suggested in this paper. If all the necessary parameters are available for PM equation application then the ET calculations can be achieved without problem. On the other hand, if there is not enough data at a station then CFM model is employed and good results are obtained. If there is no data at a station it is possible to make ET estimations from adjacent stations. According to the proposed two FL models reliable results are obtained in the two regions. After the application of all the models their results are compared with the classical ET values.

Ash-Sharqia region in the western part of the KSA has rather flat topography and the measurements from the 1999–2012 period measurements are used in the model development. Proposed ANFIS system modeling based models is used for calibration (training) data from 1999 to 2007 period for 9 years and the validation (testing) data from 2008 to 2012 period for 5 years. From the three meteorology stations in the Ad-Dhahran region station is selected for estimations.

In Al-Aseer mountainous region in the southern KSA, the measurements are used from 1978 to 2012 periods. ANFIS model training and testing periods are 1978–1998 and 1999–2012 periods, respectively. In this region Khamis Mushait meteorology station is selected for estimations.

Triangular subsets have been chosen instead of trapezoidal, Gaussian, etc. for each model in the calibration stages because little changes has been observed in the results and also for the simplicity. On the other hand, in the case of four-input models, the inputs are divided into three subsets corresponding to the constant coefficient output, whereas the inputs are divided into five subsets in the two-input models corresponding to the linear output and accordingly the calibrations are applied. These decisions have been made as a result of alternative testing combinations. Thus, 81 rules for four-input models and 25 rules for two input models have been determined with ANFIS.

First of all, dependences are proved in Fig. 7 for each one of the three stations in the same region and then ET values are estimated according to the three models after the calculations at all stations. In Figs. 8 and 9, ET estimations by CFM and the calculations by PM are compared.

It is possible to notice from the figures in cases of enough data availability in each station, the estimations are very good and reliable. In Table 2, the error amounts are presented numerically. If data are not available then the RFM model suggested in this paper yield results as in Figs. 10 and 11. These figures can be compared with the two previous figures.

Figs. 10 and 11 imply that comparatively the deviations in estimations are reduced slightly. It is possible to estimate the values at a station from the data at two adjacent stations. It is also an impor-

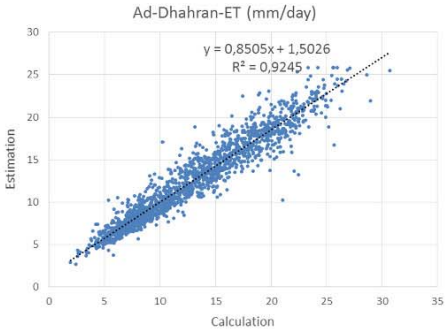


Fig. 10. Comparison of ET calculations and estimations with RFM for Ad-Dhahran station.

Table 2
Model errors according to PM equation results.

	Ad-Dhahran			Khamis Mushait		
	CFM	RFCM	RFM	CFM	RFCM	RFM
MAE (mm/day)	0.649	1.162	1.207	0.339	0.633	0.651
RMSE (mm/day)	0.919	1.521	1.628	0.469	0.825	0.854
R^2	0.973	0.928	0.925	0.966	0.894	0.883
MAPE (%)	5.1	9.1	9.5	3.9	7.2	7.4

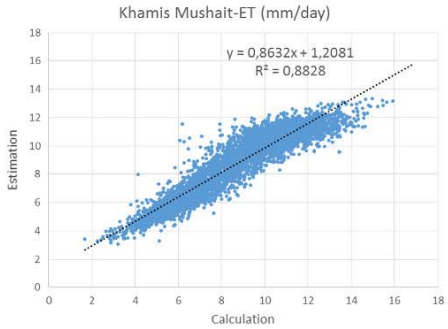


Fig. 11. Comparison of ET calculations and estimations with RFM for Khamis Mushait station.

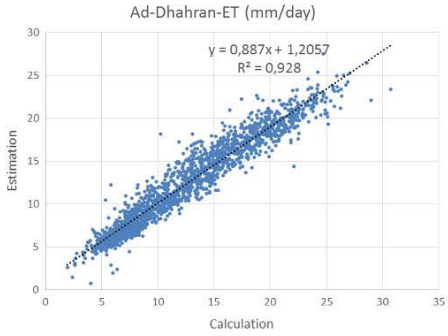


Fig. 12. Comparison of ET calculations and estimations with RFCM for Ad-Dhahran station.

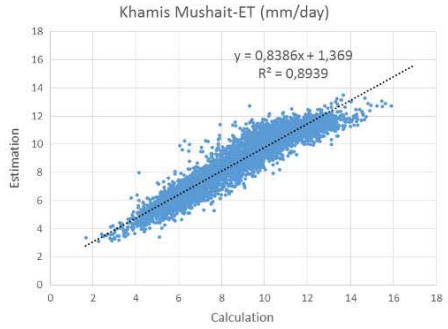


Fig. 13. Comparison of ET calculations and estimations with RFCM for Khamis Mushait station.

tant fact that this model helps to estimate values where there is no data. Table 2 presents error amounts. After this stage, it is still possible achieve better estimations. For this purpose, four factors that affect ET can be estimated one by one first with the RFCM and then ET estimations are obtained again by the RFCM. The results from RFCM benefit from regional information like RFM as in Figs. 12 and 13.

Figs. 8–13 have been obtained as results from validation (testing) stage of the models.

RFCM provides estimations at two stations in a better improvement way. After the determination of errors in Table 2, calculations are made according to mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and the coefficient of determination (R^2). Additionally, mean absolute percentage error (MAPE) is also given in the same table. During the calculation of these percentage errors, MAE value is divided by ET average calculated with PM equation and then multiplied by 100.

5. Conclusion

Evapotranspiration (ET) estimation is very important especially in arid and semi-arid regions, and there are significant contributions in the literature on this topic. PM equation has a wide range of applications in practice and it is extremely useful for ET calculation. However, it is necessary to measure each variable in the equation continuously, which is not possible in practice, especially in arid and semi-arid regions. In order to alleviate this situation some AI methods are proposed and ET values are estimated with few data types. Frequently used classical FL model version is also used in this paper for ET estimations.

For the application of the methodologies in this paper, two regions are selected in the KSA, one in the mountainous and another in the coastal areas leading to satisfactory results. CFM approach uses the station data, and hence, fewer errors are expected at Ad-Dhahran and Khamis Mushait locations with 5% and 4% errors (MAPE), respectively. The main purpose of this paper is to show, if at any station in a region there is not enough data then from the two adjacent stations, the ET estimation can be achieved at the third station. RFM is comparatively simpler and its use is shown for the estimation of ET values at a missing data station from the two nearby station ET values. Practically acceptable errors (MAPE) for Ad-Dhahran and Khamis Mushait stations are 9.5% and 7.4%, respectively. Furthermore, by means of the RFCM estimations are improved by means of a chain wise model application. As a result, the MAPE at the two locations are obtained as 9% and 7%, respectively. It is conclusive that RFCM inference system model result in smaller error percentages in the ET estimations.

Acknowledgment

This study is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with grand number 1059B141501090. The corresponding author would like to thank TUBITAK for its support of this study. The authors also wish to express their deep thanks and gratitude to King Abdulaziz University for their facility support when the first author spends doing this research. Also, thanks should be expressed to the Presidency of Metrology and Environment, Jeddah, KSA, who kindly support this research by meteorological data.

References

Abdullah, M.A., Al-Mazroui, M.A., 1998. Climatological study of the southwestern region of Saudi Arabia. I. Rainfall analysis. Clim. Res. 9, 213–223.
Abtew, W., Melesse, A., 2013. Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations. Springer Science & Business Media, p. 206.
Adamala, S., Raghuwanshi, N.S., Mishra, A., Tiwari, M., 2014. Evapotranspiration modeling using second-order neural networks. J. Hydrol. Eng. 19 (6), 1131–1140.

Aghajanloo, M.-B., Sabziparvar, A.-A., Hosseinzadeh Talaee, P., 2013. Artificial neural network–genetic algorithm for estimation of crop evapotranspiration in a semiarid region of Iran. Neural Comput. Appl. 23 (5), 1387–1393.
Allen, R.G., 1986. A Penman for all seasons. J. Irrig. Drain. Eng., Amer. Soc. Civil Eng. 112 (4), 348–368.
Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. vol FAO Irrigation and Drainage Papers (Book 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
Almorox, J., Quej, V.H., Martí, P., 2015. Global performance ranking of temperature based approaches for evapotranspiration estimation considering Koppen climate classes. J. Hydrol. 528, 514–522.
Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1962. Determining Consumptive Use of Irrigation Water Requirements, Tech. Bull, 1275, USDA, Washington.
Chang, F.J., Sun, W., Chung, C.H., 2013. Dynamic factor analysis and artificial neural network for estimating pan evaporation at multiple stations in northern Taiwan. Hydrol. Sci. J. 58 (4), 813–825.
ElNesr, M., Alazba, A., Abu-Zreig, M., 2010. Analysis of evapotranspiration variability and trends in the Arabian Peninsula. Am. J. Environ. Sci. 6 (6), 535–547.
Fenga, Y., Cuib, N., Zhaob, L., Hud, X., Gonga, D., 2016. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. J. Hydrol. 536, 376–383.
Gocic, M., Motamedi, S., Shamshirband, S., Petkovic, D., Ch, S., Hashim, R., et al., 2015. Soft computing approaches for forecasting reference evapotranspiration. Comput. Electron. Agric. 113, 164–173.
Güçlü, Y.S., Şen, Z., 2016. Hydrograph estimation with fuzzy chain model. J. Hydrol. 538, 587–597.
Güçlü, Y.S., Dabanlı, İ., Şişman, E., Şen, Z., 2015. HARmonic–LINear (HarLin) model for solar irradiation estimation. Renewable Energy 81, 209–218.
Güçlü, Y.S., Yeleğen, M.Ö., Dabanlı, İ., Şişman, E., 2014. Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angström-Prescott and dependency models. Sol. Energy 109, 118–124.
Hargreaves, G.H., 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE 17, 701–704.
Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1 (2), 96–99.
Jang, J.S.R., 1992. Self-learning fuzzy controller based on temporal back-propagation. IEEE Trans. Neural Networks 3 (5), 714–723.
Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drain. Div. ASCE 89, 15–41.
Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Amer. Soc. Civil Eng. Man. Rep. On Eng. Prac. No. 70, NY.
Kim, S., Kim, H.S., 2008. Neural networks and genetic algorithm approach for nonlinear evaporation and evapotranspiration modelling. J. Hydrol. 351, 299–317.
Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., 2011. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. Irrig. Sci. 29, 11–25.
Linacre, E.T., 1977. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates using temperature data alone. Agric. Meteorol. 18, 409–424.
Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. J. Inst. Water Eng. 11 (3), 277–288.
Mamdani, E.H., 1974. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Proc. IEEE 121 (12), 1585–1588.
Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G.E. (Ed.), State and Movement of Water in Living Organisms, 19th symposium of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 205–234.
Mossad, A., Alazba, A., 2016. Simulation of temporal variation for reference evapotranspiration under arid climate. Arab. J. Geosci. 9, 386. http://dx.doi.org/10.1007/s12517-016-2482-y.
Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London Series A NATO ASI Ser. 193 (1032), 120–145.
Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100 (2), 81–92.
Sugeno, M. (Ed.), 1985. Industrial Applications of Fuzzy Control. North-Holland, NY.
Şen, Z., 2004. Yapay Sinir Ağları İlkeleri (In Turkish). Turkish Water Foundation Publications, İstanbul.
Şen, Z., 2010. Fuzzy Logic and Hydrological Modelling. CRC Press, Boca Raton.
Takagi, T., Sugeno, M., 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans. Syst.: Man Cybern. 15 (1), 116–132.
Tayfur, G., 2012. Soft computing methods in water resources engineering. In: Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic and Genetic Algorithm. WIT Press, Southampton, UK.
Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38 (1), 55–94.
Todorovic, M., Karic, B., Pereira, L.S., 2013. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of mediterranean climates. J. Hydrol. 481, 166–176.
Trajkovic, S., 2009. Comparison of radial basis function networks and empirical equations for converting from pan evaporation to reference evapotranspiration. Hydrol. Process. 23 (6), 874–880.
Turc, L., 1961. Evaluation de besoins en eau d'irrigation, ET potentielle. Ann. Agron. 12, 13–49.
Valiantzas, J.D., 2013. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. J. Hydrol. 505, 13–23.
Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. Inf. Control 8 (3), 338–353.
Zotarelli, L., Dukes, M.D., Romero, C.C., Migliaccio, K.W., Morgan, K.T., 2015. Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Document number: AE459, Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida, IFAS (http://edis.ifas.ufl.edu).

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Yavuz Selim GÜÇLÜ

Doğum Tarihi ve Yeri : 20.11.1984 / İstanbul

E-posta : gucluya@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010 yılında İTÜ İnşaat Fakültesini Üçüncülükle bitirdi.
- 2010 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı'nda Lisanstan (Bütünleşik) Doktoraya başladı.
- 2011'de İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı.
- Çift Anadal Programı (ÇAP)'ndan faydalanarak Şubat 2012'de İTÜ Mimarlık Bölümünden mezun oldu.
- 2016 yılında TÜBİTAK bursu ile Doktora sırası yurtdışı araştırmasını Suudi Arabistan Kral Abdülaziz Üniversitesi'nde yaptı.
- Şubat 2017'de İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktorasını tamamladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN SCI YAYIN:

- **Güçlü, Y. S.**, & Şen, Z. (2016). Hydrograph estimation with fuzzy chain model. *Journal of Hydrology, 538*, 587-597.

- **Güçlü, Y. S.**, Subyani, A. M., & Şen, Z. (2017). Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation, *Journal of Hyrology, 544*, 233–241.

DİĞER SCI YAYINLAR:

- **Güçlü, Y. S.**, Yeleğen, M. Ö., Dabanlı, İ., & Şişman, E. (2014). Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angström–Prescott and dependency models. *Solar Energy, 109*, 118-124.

- Şen, Z., Dabanlı, İ., Şişman, E., & **Güçlü, Y. S.** (2015). Hydrogeological parameter estimations by partial type curve matching methodology. *Arabian Journal of Geosciences, 8*(1), 565-578.

- **Güçlü, Y. S.**, Dabanlı, İ., Şişman, E., & Şen, Z. (2015). HARmonic–LINear (HarLin) model for solar irradiation estimation. *Renewable Energy, 81*, 209-218.

- **Güçlü, Y. S.** (2016). Comments on "Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey (Kisi and Ay, 2014)" and "An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations (Kisi, 2015)". *Journal of Hydrology, 538*, 878-882.

- Dabanlı, İ., Şen, Z., Yeleğen, M. Ö., Şişman, E., Selek, B., & **Güçlü, Y. S.** (2016). Trend Assessment by the Innovative-Şen Method. *Water Resources Management, 30*(14), 5193–5203, 2016.

- **Güçlü, Y. S.**, Şişman, E., & Yeleğen, M. Ö. (2016). Climate change and frequency–intensity–duration (FID) curves for Florya station, Istanbul. *Journal of Flood Risk Management,* DOI: 10.1111/jfr3.12229.