İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞ HİDROGRAFI TAHMİN MODELLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa NURI BALOV

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞ HİDROGRAFI TAHMİN MODELLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa NURI BALOV
(501111508)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111508 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mustafa NURI BALOV**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"AKIŞ HİDROGRAFI TAHMİN MODELLERİ "** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Necati AĞIRALİOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKMEHMETOĞLU .....
Gebze Yüksek Teknoloji Enistitüsü

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2014**

ANAMA VE ATAMA

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik ve Su Kaynakları mühendisliği programının bünyesinde ve sayın Doç.Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK danışmanlığında yapılmıştır ki bu vesileyle kendilerine verdikleri her türlü destek için teşekkürler ve saygılarımı sunuyorum.
Tüm yükseklisans eğitimim boyunca yardımlar ve desteklerini esirgemeyen sayın Dr. Tarkan ERDİK, sayın Doç.Dr. Mehmet ÖZGER ve hidrolik ve su kaynakları bölüm koordinatörü sayın Prof.Dr. Necati AĞIRALİOĞLU'na sayğılar ve şükranlarımı sunup minnettarlığımı arz ederim.
Hayatım boyunca hep yanımda hissettiğim aileme ise verdikleri maddi ve manevi desteklerden dolayı teşekkür ederim.
Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen başta sayın Farrokh MAHNAMFAR olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.
Ayrıca MIKE BASIN programının lisansının kullanılmasını sağlayan DHI Software grubuna teşekkür ederim.

Aralık 2013

Mustafa NURI BALOV
(Su Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ….. vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
ÇİZELGE LİSTESİ xiii
ŞEKİL LİSTESİ xv
ÖZET……. xvii
SUMMARY xix
1. GİRİŞ…. 1
1.1 Yağış-Akış Modelleri ve Literatür Araştırması 1
1.2 Tezin Amacı 3
2. METODOLOJİ 5
2.1 Uygulama Bölgesi ve Yağış-Akış Verileri 5
2.2 Veri Toplama 9
2.3 Hidrograf Analizi 10
2.4 Birim Hidrograf Teorisi 13
2.5 Modellerin Tanımı 13
2.5.1 HEC-HMS 13
2.5.1.1 SCS eğri numarası kayıp modeli 15
2.5.1.2 Green-Ampt kayıp modeli 17
2.5.1.3 Clark birim hidrograf metodu 21
2.5.1.4 Snyder sentetik birim hidrograf metodu 22
2.5.1.5 SCS boyutsuz birim hidrografı 24
2.5.2 NAM/MIKE BASIN 25
2.3.2.1 Modelin yapısı 26
2.3.2.2 Modelin temel bileşenleri 26
2.3.2.3 Modelin parametreleri: 29
2.3.2.4 Başlangıç koşulları 32
2.3.2.5 Modelin kalibrasyonu 33
2.5.3 SWMM 34
2.5.3.1 Modelin bileşenleri ve gerekli veriler 35
2.5.3.2 Hesaplama metotları 37
2.5.4 Kök seçimi yöntemi (Root selection method) 41
2.5.4.1 De Laine kök seçimi metodu 42
2.5.4.2 Karakteristik kök deseni 44
2.5.4.3 Kök seçiminin prosedürü 49
2.5.4.4 Birim hidrograf düzeltme katsayısı 50
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER 53
3.1 Sonuçların Değerlendirilmesi 53
3.1.1 RMSE 53
3.1.2 CE 53
3.2 Modellerin Sonuçları ve Yorumlar 54

3.2.1 Toplam dolaysız yüzey akışı 54
3.2.2 Pik debi 57
3.2.3 Hidrograf süresi 57
4. SONUÇ.. 63
KAYNAKLAR 65
EKLER….. 69
ÖZGEÇMİŞ 83

KISALTMALAR

BH **:** Birim Hidrograf
CE **:** Coefficient of Efficiency (verim katsayısı)
CN **:** Curve Number (Eğri Numarası)
EPA **:** Envoironment Protection Agency
HEC-HMS **:** Hydrologic Engineering Center-Hidrologic Modeling System
NAM **:** Nedbør-Afstrømnings-Model
RMSE **:** Root Mean Squared Error
SCS **:** Soil Conservation Service
SWMM **:** Storm Water Management Model

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Cascina Scala havzasının meteorolojik özellikleri. 6
Çizelge 2.2 : Cascina Scala havzasının alt havzaları ve özellikleri (Wang ve Altunkaynak, 2012). 7
Çizelge 2.3 : Cascina Scala havzasının kanalizasyon sistemine ait boru hatları (Wang ve Altunkaynak, 2012). 8
Çizelge 2.4 : Modellenen fırtınaların özellikleri. 10
Çizelge 2.5 : Toprak cinslerine göre eğri numarası. 18
Çizelge 2.6 : Green-Ampt modeli parametreleri. 21
Çizelge 2.7 : Çeşitli toprak cinsleri için L_{max} değeri. 30
Çizelge 2.8 : Farklı toprak cinsleri için GWL_{FL1} değeri. 33
Çizelge 2.9 : Standart kanal en kesitleri. 38
Çizelge 2.10 : Nash tek hazneli hidrografının kompleks kökleri. 46
Çizelge 2.11 : Nash hidrografının kompleks kökleri. 48
Çizelge 2.12 : Ayrık Nash hidrografının kompleks kökleri. 50
Çizelge 3.1 : Toplam dolaysız akış tahminlerinin sonuçları. 55
Çizelge 3.2 : NAM/MIKE BASIN modelinin kalibrasyon değerleri. 57
Çizelge 3.3 : SWMM modelinin kalibrasyon değerleri. 57
Çizelge 3.4 : Pik debi tahmin sonuçları. 58
Çizelge 3.5 : Akış süresi tahmin sonuçları. 59
Çizelge A.1 : 499'nolu fırtınaya ait 10 dakikalık akış hidrografı. 70
Çizelge A.2 : 499'nolu fırtınanın kompleks kökleri. 70
Çizelge A.3 : 499'nolu fırtınadan elde edilen birim hidrograf. 71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Casina Scala havzasının konumu ve uydu görünümü (Url-2).. 5
Şekil 2.2 : Tipping-bucket yağmurölçer. 9
Şekil 2.3 : Cascina Scala havzasının drenaj sistemi. 10
Şekil 2.4 : Yağış ve Akış hidrografı. 11
Şekil 2.5 : Birim hidrograf teorisi ve doğrusal sistemin karşılaştırılması. 14
Şekil 2.6 : HEC-HMS modelinin genel görünümü. 16
Şekil 2.7 : Green-Ampt sızma modeli. 19
Şekil 2.8 : Birim en kesit alanına sahip silindir boyunca sızma (Green-Ampt). 19
Şekil 2.9 : Snyder sentetik birim hidrografı. 23
Şekil 2.10 : SCS boyutsuz sentetik birim hidrografı. 25
Şekil 2.11 : NAM/MIKE BASIN modelinin genel görünümü. 26
Şekil 2.12 : NAM modelinin yapısı. 27
Şekil 2.13 : Yüzey akışının meydana gelmesi. 31
Şekil 2.14 : SWMM modelinin genel görünümü. 34
Şekil 2.15 : SWMM modelinin yüzey akımı oluşması. 39
Şekil 2.16 : SWMM modelinin yeraltı suyu modeli şeması. 40
Şekil 2.17 : Nash birim hidrografı (*n=1, K=5, T= 1, N=20*). 46
Şekil 2.18 : Nash birim hidrografı (*n=1, K=5, T= 1, N=20*) kökleri. 47
Şekil 2.19 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*). 47
Şekil 2.20 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) kökleri. 48
Şekil 2.21 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) ayrık şekli. 50
Şekil 2.22 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) kökleri. 51
Şekil 3.1 : 104'nolu fırtınanın gözlem ve tahmin akış hidrografı. 60
Şekil 3.2 : 499'nolu fırtınanın gözlem ve tahmin akış hidrografı. 60
Şekil 3.3 : 104'nolu fırtınanın gözlem ve Kök Seçimi tahmini 10 dakikalık akış hidrografı. 61
Şekil 3.4 : 499'nolu fırtınanın gözlem ve Kök Seçimi tahmini 10 dakikalık akış hidrografı. 61
Şekil 3.5 : 104'nolu fırtınaya ait gözlem ve NAM/MIKE BASIN modelinin tahmin hidrografı (pik debi için kalibre edilmiştir). 62
Şekil A.1 : 104'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı. 74
Şekil A.2 : 104'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı. 74
Şekil A.3 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder metodu) modeli ile elde edilen hidrografı. 74
Şekil A.4 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS metodu) modeli ile elde edilen hidrografı. 75
Şekil A.5 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark metodu) modeli ile elde edilen hidrografı. 75

Şekil A.6 : 104'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı. 75
Şekil A.7 : 116'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı. 76
Şekil A.8 : 116'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı. 76
Şekil A.9 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı. 76
Şekil A.10 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı. 77
Şekil A.11 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı. 77
Şekil A.12 : 116'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı. 77
Şekil A.13 : 290'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı. 78
Şekil A.14 : 290'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı. 78
Şekil A.15 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı. 78
Şekil A.16 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı. 79
Şekil A.17 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı. 79
Şekil A.18 : 290'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı. 79
Şekil A.19 : 499'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı. 80
Şekil A.20 : 499'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı. 80
Şekil A.21 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı. 80
Şekil A.22 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı. 81
Şekil A.23 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı. 81
Şekil A.24 : 499'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı. 81

AKIŞ HİDROGRAFI TAHMİN MODELLERİ

ÖZET

Mühendislik açısından yağış akış süreci su çevriminin en önemli bileşenlerindendir. Muhtemel yağışlardan meydana gelebilecek akışın tahmini su kaynaklarının projelendirilmesinde önemli yere sahiptir. Bu nedenle birçok fiziksel ve veri tabanlı yağış akış modelleri geliştirilmiştir. Akış hidrografı, bir havzanın veya herhangi bir hidrolojik sistemin bir fırtınadan oluşan akış miktarının zamanla değişimini göstermektedir. Bu çalışmada akış hidrografının üç temel bileşeni olan toplam dolaysız yüzey akışı, pik debi ve akış süresi incelenmiştir. Bu üç parametre farklı tasarım amaçlarına göre ele alınabilir. Bu bağlamda NAM/MIKE BASIN, SWMM parametrik modelleri ve HEC-HMS modeli kapsamında bulunan Clark, Snyder ve SCS birim hidrograf metotları ile birlikte Kök seçimi matematiksel birim hidrograf yöntemi 1990-1995 yılları arasında Cascina Scala (Kuzey Pavia, İtalya) havzasında meydana gelen 5 ayrı fırtınanın modellenmesi için kullanılmıştır.

NAM/MIKE BASIN ve SWMM parametrik yaklaşımları havzanın fiziksel ve hidrolojik parametrelerini kullanarak yağış akış sürecini modellemektedir. Bu modeller kapsamında yağış akış sürecine bağlantılı olan buharlaşma, sızma, evapotranspirasyon, yeraltı suyu, iç akım, yüzey akımı vs. gibi tüm fiziksel olayların simülasyona dâhil edilmesinden dolayı, modelleme için çok sayıda parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Genellikle bu parametrelerin tamamının belirlenmesi mümkün olmayabilir. Bu durumda yağış akış verilerine dayanan farklı kalibrasyon yaklaşımlarından faydalanılmıştır. Buna karşılık HEC-HMS modelinin birim hidrograf yöntemleri daha az fiziksel parametrenin gerektiği ve daha çok veri tabanlı modellerdir. Ayrıca kök seçimi birim hidrograf metodu kapsamında sadece akış verilerini kullanarak bir havzanın birim hidrografı elde edilebilir.

Modellerin tahmin sonuçları hataların karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) ve Verim Katsayısı (CE) istatistiksel ölçütlere göre değerlendirilmiştir. Toplam dolaysız yüzey akışı parametresi açısından en iyi tahmin sonucu NAM/MIKE BASIN modeline aittir (RMSE=2,26 mm ve CE=0,84). Bu model sonucundan sonra aniyi tahmini SWMM modeli RMSE=2,91 ve CE=0,73 vermiştir. Ancak tüm birim hidrograf yöntemlerinin tahmin sonuçları kabul edilebilir seviyede olmamıştır. RMSE değerinin yaklaşık 6 mm ve CE değerinin sıfırdan düşük olması bu durumu teyit etmektedir. Dikkat çekici diğer bir sonuçta kullanılan tüm modellerin uygun pik debi tahmini yapamamalarıdır. CE değerlerinin sıfırın altında olması da bu durumu teyit etmektedir. Hidrograf süresi tahmininde Clark ve Kök Seçimi birim hidrograf yöntemleri ve SWMM parametrik modeller iyi tahmin gösterirken diğer modellerin tahmini kabul edilebilir seviyede değildir.

ESTIMATION OF RUNOFF HYDROGRAF

SUMMARY

Rainfall-induced runoff process is the most important component of hydrological cycle that is used in the design of water structures, flood control and design of urban drainage systems. Runoff hydrograph is a graph that shows runoff variation versus time for a given rainfall event. Modeling rainfall-runoff process is a difficult task due to non-linearity and uncertainties. In addition, other physical parameters such as infiltration, evapotranspiration, soil type, soil wetness and land use conditions are required for determining this process.

Rainfall-runoff models can be classified as physically based models and data driven models. Physically-based models are based on mathematical relationships between rainfall, physical parameters of the catchment and runoff. The Rational method was proposed by Mulvany (1850) as the first physical model in order to compute flood peak discharge by taking time of concentration as the basis of the model. Furthermore, analytical probabilistic or design storm approach has been used to estimate the peak discharge for design purposes. Recently, classical rational models were developed using perturbation theory where fuzzy logic model results were compared with extended classical rational models.

The unit hydrograph is the unit response function of a linear hydrologic system and was firstly proposed by Sherman (1932). It is defined as a direct runoff resulting from 1 unit of excess rainfall generated uniformly over the drainage area at a constant rate for an effective duration. Unit hydrograph theory was based on some assumptions. The intensity of the excess rainfall and the base time of the direct runoff hydrograph should remain constant and the excess rainfall should be uniform over the whole watershed. Many researchers investigated unit hydrograph theory and synthetic unit hydrographs such as Snyder (1938) and SCS (1972) which were proposed as methods of derivation of unit hydrograph. Black box models have been also introduced for the prediction of runoff by formulating the response of catchment linearly or nonlinearly.

Fuzzy Unit Hydrograph, where Nash cascade parametric form of the unit hydrograph was used, were introduced. Fuzzy logic models are based on linguistic expressions which are used for construction of fuzzy IF-THEN rules depending on expert knowledge or available data.

ANN model is a black box model which simulates rainfall-runoff process in situations where explicit knowledge of the internal hydrologic process is not available.

Despite all of these new developments, no comprehensive study for evaluating the comparative performance of physically based models like SWMM and NAM/MIKE BASIN and data driven models such as Clark, Snyder, SCS and Root selection method have been conducted so far. This study was, therefore, initiated to compare the performance of various methods developed for establishing runoff hydrograph.

In this study, HEC-HMS, SWMM and MIKE BASIN/NAM Rainfall-Runoff models and also Root selection method were used for estimating runoff hydrograph from rainfall events in Cascina Scala urban catchment in Italy. These models are physically based black box models, which use the catchment's physical parameters such as area and slope, curve number, Manning roughness coefficient, and percentage impervious layers, hydrologic parameters and mathematical methods of derivation of unit hydrograph. The physical parameters are required in order to determine the catchment's response of runoff for a given rainfall event numerically. Runoff hydrographs were calculated using the aforementioned models and the model results were compared with observed hydrograph.

The specific objectives of this study were, i) to estimate rainfall-induced runoff using NAM/MIKE BASIN Rainfall-Runoff model ii) to produce runoff hydrograph by employing the NAM/MIKE BASIN Rainfall-Runoff model, and iii) to evaluate the estimation performance of NAM/MIKE BASIN and SWMM parametric models compared to the methods of unit hydrograph in terms of estimation of runoff hydrograph.

The results of these models were compared by considering estimated and observed rainfall-induced runoff peak discharge, time to peak and discharge duration of the hydrographs. The comparison was based on the root mean squared error (RMSE) and the coefficient of efficiency (CE) between the observed event data and estimation results.

Five storms, which were observed during the period between 1990 and 1995 in Cascina Scala watershed, were modeled using HEC-HMS, SWMM, NAM/MIKE BASIN, and Root-Selection method approaches. The total runoff, peak discharge and the discharge duration results are given below.

Total runoff

It is clearly seen that results of all unit hydrograph approaches (Clark, Snyder, SCS, and root selection) are not satisfying compared to SWMM and NAM/MIKE BASIN models. Estimated values by all approaches of the unit hydrograph model were found to be larger than the observed values. This conclusion is drawn based on the larger RMSE values (approximately 6.00 mm) and smaller CE values (lower than zero) of results rather than the other results. Considering the assumptions of the unit hydrograph theory, the storm selected for analysis should be of short duration and the catchment should be relatively small. Long duration storm rainfalls may result in unexpected errors in the estimation of runoff hydrographs.

MIKE BASIN/NAM model parameters were determined by trial-and-error process. Five main parameters were selected for calibration. For storm 104, which is chosen for calibration, the estimated total runoff value is exactly equal to the observed value. However, overestimation was observed for long-duration storms, whereas underestimation was seen for short duration storms. Consequently, the best estimation was observed using NAM model based on statistical models, in which RMSE is 2.26 mm and CE is 0.84.

Wang and Altunkaynak (2012) performed a similar study in the same catchment using the same storm event data. The authors applied storm events using SWMM approach and compared their results with the Fuzzy logic model. They concluded that fuzzy logic model prediction results outperformed total runoff event data compared to SWMM model. But, only total runoff was predicted from total rainfall by the fuzzy logic model and time variable hydrograph components could not be generated. In this study, the same calibration values from the study by Wang and Altunkaynak (2012) were used. However, the results are not found to be similar and a better simu-

lation was observed after changing the time intervals of input rainfall time series from one minute to 10 minutes. As a result, RMSE decreased from 3.85 to 2.91 mm. Likewise, results for large storm rainfall-induced runoff were overestimated in SWMM model.

Peak Discharge

It was observed that SWMM and NAM/MIKE BASIN approaches tend to underestimate the peak discharge values, while HEC-HMS's SCS unit hydrograph methods overestimated the peak discharge values. As a result, the estimation results of these models are not satisfying based on the criteria of RMSEs and CEs.

Discharge Duration

The SCS and Root selection methods revealed the best estimations for discharge duration. This is because there is a good agreement between the estimated and observed discharge durations considering statistical criteria, where RMSEs were found to be 22.87 min and 25.44 min and CEs were found to be 0.88 and 0.85, respectively. RMSE and CE values for SWMM model results were found to be 35 min and 0.72, respectively. However, other models did not reveal satisfying estimation results.

As a result, it can be interpreted that the performances of parametric models in terms of total direct runoff are better than those of unit hydrograph methods. It can be explained by the number of physical and hydrological parameters that are used for simulation of rainfall-runoff process. On the other hand, all models were used in this thesis did not execute a good fit in terms of peak discharge, which is the most important parameter for designing water structures and flood control projects. The study calibration can be done in order to obtain a good performance of estimation of desired parameter. The calibration of parametric models in this study was done considering the total direct runoff and the peak discharge.

1. GİRİŞ

Su yeryüzünde bolca bulunan maddedir ve suyun gezegenimizde farklı şekillerde bulunması ve dolaşımı birçok bilimsel araştırmanın konusu olmuştur. Bu arada su bilimi (hidroloji) suyun yeryüzünde tüm şekilleriyle ilgilendiği için tüm insanların yaşamını etkilemektedir. Günümüzde su yapılarının tasarımı ve işletmesi, su temini, kanalizasyon ve su arıtma projeleri, sulama kurutma, hidroelektrik enerji, taşkın kontrolü, navigasyon, aşınma (erozyon) ve sediment kontrolü, tuzlanma kontrolü ve çevresel çalışmalarda su bilimi araştırmaları yapılmaktadır. Mühendislik açısından, su çevriminin en önemli bileşeni olarak bilinen yağışın akışa dönüşümü son derece karmaşık bir fiziksel mekanizmadır. Bu karmaşıklık olayın doğasıyla ilgili belirsizlik ve rastgelelik kavramlarını da içermektedir. Ayrıca yağış akış sürecini doğrudan etkiyen buharlaşma, sızma, iç akım ve evapotranspirasyon gibi birçok fiziksel olay aynı zamanda göz önünde bulundurulmalıdır. Günümüzde birçok yağış akış modeli mevcuttur. Bu yaklaşımlar farklı kabullere dayanan mühendislik planlama ve tasarımı için (kentsel bölgelerin drenaj sistemi, baraj ve suyolları tasarımı ve kırsal ve tarımsal bölgelerin taşkın denetimi) geliştirilen yağış-akış modelleridir. Bu yaklaşımların yağış-akış tahmin sonuçları değişmektedir.

1.1 Yağış-Akış Modelleri ve Literatür Araştırması

Yağış-Akış süreci su çevriminin çok önemli safhasıdır. Bu süreç su yapıları tasarımı, taşkın kontrolü ve kentsel bölgelerin drenaj sistemlerinin tasarımında en önemli rol oynamaktadır. Bu sürecin modellemesi olayın fiziksel yapısından kaynaklanan belirsizlikler ve karmaşıklıklardan dolayı büyük zorluklar içermektedir. Ayrıca sızma, evapotranspirasyon, toprak cinsi, toprağın rutubeti ve arazi kullanımı gibi başka fiziksel parametreler de yağış-akış sürecini etkilemektedir. Yağış-akış modelleri iki gruba ayrılabilir: Fiziksel modeller ve Veri tabanlı modeller (Todini, 2007). Fiziksel modellerde, yağış, havzanın fiziksel özellikleri (parametreleri) ve akış arasındaki ilişkinin matematiksel ifadesine dayanmaktadır. Rasyonel metot (Mulvani, 1850) ilk fiziksel yağış-akış modeli olarak tanımlanmıştır. Bu model havzanın toplanma zama-

nı ve akış katsayısına dayanarak belirli bir yağıştan meydana gelen pik debiyi hesaplamak için halen mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda Hotchkiss ve McCallum (1995) yedi farklı toplanma zamanı ve altı farklı pik debi tahmin yaklaşımlarını küçük tarımsal havzalar için kullanmışlardır. Bunların içinden toplanma zamanı için en uygun Kirpich yaklaşımı iken en iyi pik debi tahmininin ise Fletcher yaklaşımına ait olduğu kanaatine varmışlardır. Benzer şekilde statiksel yaklaşımlar da pik debi hesabi için yaygın olarak kullanılmıştır. (Guo ve Adams, 1998).

Quader ve Guo (2006) meteorolojik verilerin analizi, yağış, alt havzalar birleşmesi ve toplanma zamanı davranışını göz önünde bulundurarak analitik olasılıklı ve Design Storm yaklaşımları ile pik debiyi elde etmişlerdir. Ayrıca toplam yağış değerini akış katsayısına çarpıp toplam akış miktarını tahmin eden geliştirilmiş Rasyonel Metot önerilmiştir (French, 2002; ve Şen ve Altunkaynak, 2006). Rasyonel metot ile Birim hidrograf teorisinin birleşimi olan Rasyonel hidrograf metodu, sadece pik debiyi tahmin eden klasik Rasyonel metottan farklı olarak tam bir akış hidrografı elde etmek için uygulanabilen bir model olarak önerilmiştir (Guo, 2001).

Doğrusal hidrolojik sistemin birim reaksiyon denklemi olarak bilinen ve ilk olarak Sherman (1932) tarafından önerilen Birim Hidrograf teorisi veri tabanlı modellerin en önemlisi ve en yaygınıdır. Birim hidrograf tüm havzaya üniform şekilde ve sabit şiddetle yağan 1 inç veya 1 cm artık yağış yüksekliğinden meydana gelen dolaysız yüzey akışıdır (Chow ve diğ, 1988). Daha sonra birim hidrograf teorisine dayanarak birim hidrograf elde etme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan Snyder (1938), Clark (1943) ve SCS (1971) en çok kullanılan yöntemlerdir. Son yıllarda lineer programlama ve fiziksel metotlar ile birim hidrograf optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir (Parsad ve diğ, 1999; Bhunya ve diğ, 2003; ve Jain ve diğ, 2006). Kök Seçimi yaklaşımı ise z-dönüşümü ile sadece akış verilerini kullanarak birim hidrograf elde etmenin matematiksel bir yöntemdir (Turner ve diğ, 1989; Ojha ve diğ, 1999; Parmentier ve diğ, 2003; ve Seong ve Lee, 2011).

Kara kutu yaklaşımlar bir havzanın reaksiyonunu lineer veya non-lineer olarak modellenerek akış tahmini için kullanılmaktadır. Wang ve Altunkaynak (2012) iki farklı kara kutu yaklaşımı kullanarak yağış-akış sürecini modellemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Bulanık mantık (Fuzzy logic) modelin SWMM parametrik modelden daha iyi tahmin sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Bulanık mantık yaklaşımı (Zadeh,

1965) sözel ifadelerle uzman görüşe veya verilere dayanarak EĞER-İSE fuzzy kural tabanı oluşturulmaktadır (Mamdani, 1947; Tokagi ve Sugeno, 1985; Şen ve Altunkaynak, 2006; Altunkaynak ve Şen, 2007; Noury ve diğ, 2008; Özger, 2009; Altunkaynak, 2010; Wang ve Altunkaynak, 2012). Öte yandan Bárdossy ve diğ, (2006) birim hidrografın Nash kademeli parametrik şeklini kullanarak Bulanık birim hidrografı önermişlerdir. Bunların yanı sıra Özelkan ve Duckstein (2001) bulanık kavramsal yağış akış modelini önermişlerdir. Bu model kapsamında verilerden veya sistemin doğasından kaynaklanan belirsizlikleri bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak yağış akış sürecine dâhil edilmiştir.

Yapay Sinir Ağları modelleri ise hidrolojik sürecinin içeriği çok fazla bilinmediği koşullarda yağış-akış sürecini modellemek için kullanılmaktadırlar (Ahmad ve Simonovic, 2005; Sarkar ve Kumar, 2012). Yapay sinir ağları genelde aşağıdaki üç koşulun bulunduğu durumlarda kullanılır (Tokar ve Johnson, 1999):

1- Sistemin oldukça karmaşık olması ve tam olarak açıklanamaması.

2- Sistemin soyut kavramları içermesi

3- Model girdilerinin doğal olarak eksik veya belirsiz olması.

1.2 Tezin Amacı

Geçen bölümde ifade edilen yaklaşımları kullanılarak bu tez çalışması gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada üç kara kutu modeli ve bir de matematiksel model, akış hidrografını tahmin etmek için kullanılacaktır. Bu yaklaşımlar aşağıda verilmiştir.

1- MIKE BASIN/NAM (Danish "Nedbør-Afstrømnings-Model") by DHI (Danish Hydraulic Institute)

2- SWMM (US EPA, Storm Water Management Model)

3- HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, hydrologic modeling system)

4- Kök Seçimi yöntemi

Bu çalışmada Cascina Scala (İtalya) kentsel havzasında 1990-1995 yılları arasında meydana gelen 5 ayrı fırtına verisi kullanılarak modellenmiştir. Bu tezin spesifik amaçları ise:

1- NAM/MIKE BASIN yaklaşımı kullanarak yağış-akış sürecinin modellenmesi.

2- NAM/MIKE BASIN modelini kullanarak akış hidrografının elde edilmesi.

3- NAM/MIKE BASIN ve SWMM parametrik kara kutu modellerinin ve farklı birim hidrograf yaklaşımlarını içeren HEC-HMS modelinin tahmin performansı açısından değerlendirilmesi.

4- Farklı birim hidrograf yöntemlerinin karşılaştırılması.

2. METODOLOJİ

2.1 Uygulama Bölgesi ve Yağış-Akış Verileri



Şekil 2.1 : Casina Scala havzasının konumu ve uydu görünümü (Url-2).

Bu tez çalışmasında İtalya'nın kuzey Pavia bölgesinden Cascina Scala kentsel havzasının (Şekil 2.1) verileri, Papiri, 1989; Barco ve diğ, (2008) ve Wang ve Altunkay-

nak, (2012) çalışmalarından elde edilmiştir. Bu havzanın meteorolojik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Cascina Scala havzasının meteorolojik özellikleri.

Ay	Ortalama Sıcaklık(˚C)		Ortalama yağış miktarı (mm)	Yağmurlu gün sayısı
	Yük.	Düş.		
Ocak	7	-1	36.3	9
Şubat	11	1	21.5	6
Mart	16	4	40.6	8
Nisan	19	8	87.1	14
Mayıs	24	13	72.2	12
Haziran	28	17	72.7	11
Temmuz	31	19	101.4	9
Ağustos	30	19	63.9	10
Eylül	25	14	92.1	10
Ekim	19	10	89.9	11
Kasım	12	5	89.8	12
Aralık	7	1	41.6	10

Bu havza kuzeybatıdan güneydoğuya doğru hafif eğimli ve ortalama eğimi ise %0,15 dir. Bu alan genellikle yerleşim alanı olarak kullanılmaktadır ve yüzey alanı yaklaşık 11,35 hektardır. Cascina Scala havzası doğrudan kanalizasyon sistemi vasıtasıyla drene edilmektedir. Bu tez çalışmasında 1990 ve 1995 yılları arasında meydana gelen 5 ayrı fırtınaya ait yağış akış verileri ilerleyen bölümlerde tanımlanan yaklaşımlarla modellenmiştir. Verilerin toplandığı tarihte havzanın yaklaşık % 65'i geçirimsiz (%22,4 çatılar ve %42,5 caddeler ve kaplanmış yüzeyler) ve %35'i ise geçirimli alanlardan oluşmuştur. Cascina Scala havzası standart beton borulardan (Manning katsayısı: 0,0147) oluşan kanalizasyon sistemine sahiptir. Bu havza 42 alt havzaya bölünmüştür ve bu alt havzaların her biri, bir boru hattı ile drene edilmektedir. Çizel-

ge 2.2'de alt havzaların özellikleri ve Çizelge 2.3'te de drenaj sisteminin boru hatlarının özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 2.2 : Cascina Scala havzasının alt havzaları ve özellikleri (Wang ve Altunkaynak, 2012).

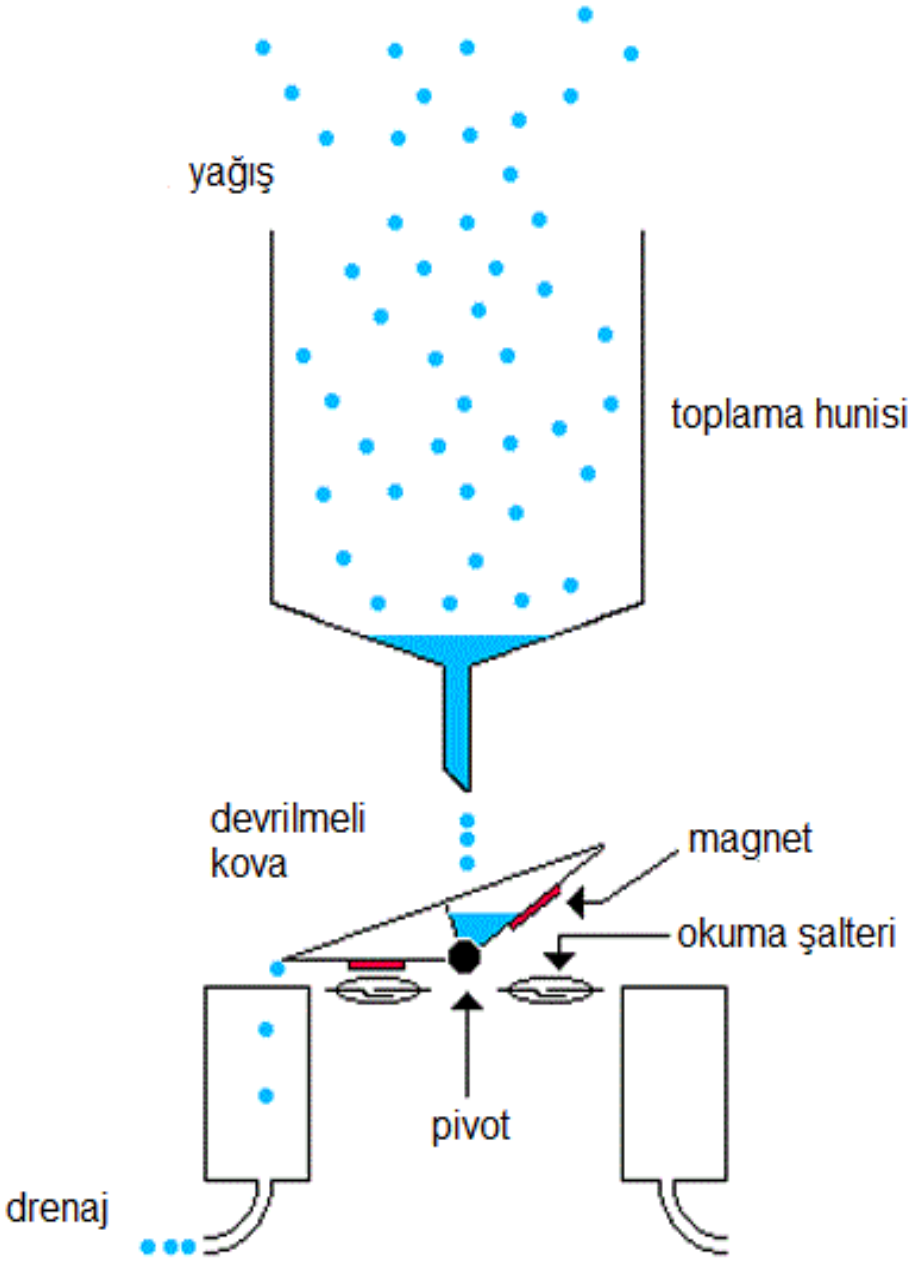
Alt havza numa-	Alan [hektar]	Eğim [%]	Genişlik[m]	Geçirimsiz alan [%]
1	0.27	0.5	29	29
2	0.198	0.2	18	76
3	0.388	0	39	64
4	0.279	0	23	87
5	0.067	0	6	100
6	0.49	0	34	72
8	0.087	0	15	100
9	0.162	0.1	7	66
10	0.07	0.1	31	68
11	0.572	0.1	16	41
12	0.123	0.3	110	75
13	0.357	0.3	17	61
14	0.203	0.1	32	78
7	0.156	0.1	18	73
15	1.354	0	137	52
16	0.21	0.1	17	66
17	0.111	0	15	67
18	0.06	0.3	9	100
19	0.053	0	16	85
20	0.175	0.1	15	68
22	0.472	0.5	11	56
23	0.5	0.1	36	77
24	0.132	0.1	41	86
25	0.809	0.2	13	71
26	0.405	0	64	56
27	0.133	0	32	100
28	0.385	0.1	15	48
29	0.211	0.1	43	47
30	0.203	0.1	17	78
31	0.059	0.1	15	75
32	0.104	0.1	10	81
33	0.5	0.2	18	59
34	0.051	0	42	100
35	0.325	0.1	8	63
36	0.42	0.1	39	73
37	0.268	0.1	47	57
38	0.239	0.2	28	82
39	0.16	0	31	66
21	0.051	0.1	11	48
40	0.192	0.6	16	73
41	0.115	0.3	13	75
42	0.223	0.3	18	84

Çizelge 2.3 : Cascina Scala havzasının kanalizasyon sistemine ait boru hatları (Wang ve Altunkaynak, 2012).

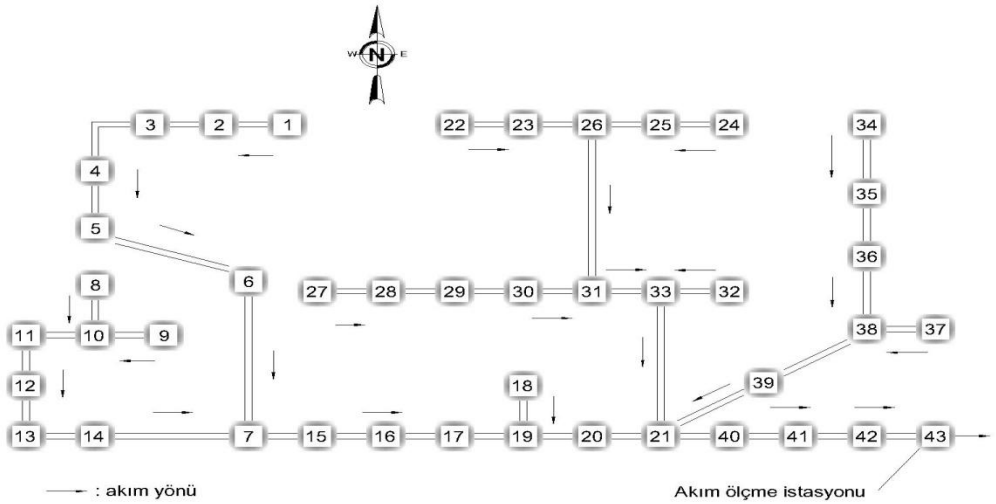
Giriş noktası	Çıkış noktası	Boru şekli	Uzunluk(m)	Yükseklik(m)	Eğim(%)
1	2	Dairesel	147,64	1,31	0,2
2	3	Dairesel	180,45	1,64	0,25
3	4	Dairesel	147,64	1,64	0,3
4	5	Dairesel	213,25	1,64	0,2
5	6	Dairesel	180,45	1,97	0,23
6	7	Dairesel	229,66	1,97	0,24
8	10	Dairesel	213,25	0,98	0,8
9	10	Dairesel	82,02	0,98	1
10	11	Dairesel	65,62	1,31	0,63
11	12	Dairesel	98,43	1,31	0,13
12	13	Dairesel	114,83	1,64	0,3
13	14	Dairesel	180,45	1,64	0,45
14	7	Dairesel	180,45	1,64	0,23
7	15	Yumurta	164,04	2,69	0,32
15	16	Yumurta	164,04	2,69	0,4
16	17	Yumurta	196,85	2,69	0,33
17	19	Yumurta	114,83	3,28	0,3
18	19	Dairesel	114,83	0,98	1
19	20	Yumurta	49,21	3,28	0,33
20	21	Yumurta	196,85	3,31	0,42
22	23	Dairesel	213,25	0,98	0,4
23	26	Dairesel	196,85	1,31	0,23
24	25	Dairesel	180,45	1,31	0,4
25	26	Dairesel	196,85	1,31	0,57
26	31	Dairesel	213,25	1,97	0,38
27	28	Dairesel	147,64	0,98	0,44
28	29	Dairesel	147,64	1,31	0,44
29	30	Dairesel	209,97	1,64	0,4
30	31	Dairesel	229,66	1,64	0,3
31	33	Dairesel	98,43	1,97	0,26
32	33	Dairesel	98,43	0,98	0,77
33	21	Dairesel	196,85	1,97	0,37
34	35	Dairesel	98,43	1,31	0,65
35	36	Dairesel	131,23	1,31	0,55
36	38	Dairesel	147,64	1,31	0,35
37	38	Dairesel	164,04	0,98	0,16
38	39	Dairesel	131,23	1,64	0,32
39	21	Dairesel	246,06	1,64	0,5
21	40	Yumurta	65,62	3,28	0,55
40	41	Yumurta	196,85	3,25	0,9
41	42	Yumurta	147,64	3,31	0,33
42	43	Yumurta	196,85	3,38	0,7

2.2 Veri Toplama

Yağış verileri 0,2 mm hassasiyete sahip olan ve yağmur toplama hunisinin giriş ağzı 1.000 cm^2 olan iki Tipping-Bucket yağmurölçerle toplanmıştır (Şekil 2.2). Akış verileri kanalizasyon sisteminin son çıkış noktasında (Şekil 2.3) ultrasonik derinliközçer cihazla kaydedilmiştir. 1990-1995 yılları arasında meydana gelen beş ayrı fırtına verisi bu tez çalışmasında kullanılmıştır. Bu beş yağışın özellikleri Çizelge 2.4'de sunulmuştur.



Şekil 2.2 : Tipping-bucket yağmurölçer.



Şekil 2.3 : Cascina Scala havzasının drenaj sistemi.

Çizelge 2.4 : Modellenen fırtınaların özellikleri.

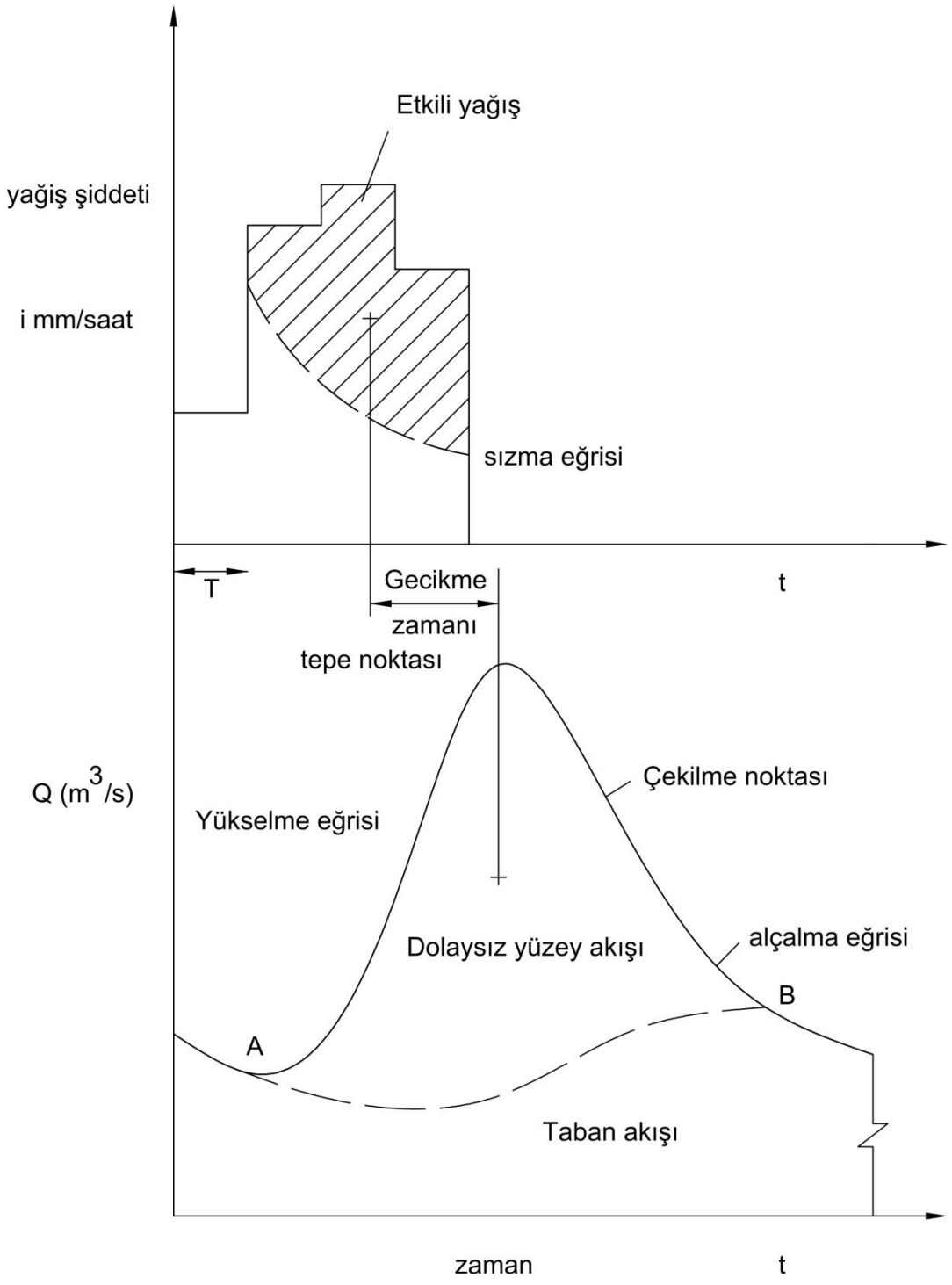
Fırtına	Yağış süresi (dk.)	Toplam yağış (mm)	Akış süresi (dk.)	Toplam akış (mm)
104	124	26	204	11,7
116	35	15,2	83	4,6
282	20	4,8	48	1,8
290	152	38,6	206	16,6
499	69	12,2	89	3,4

2.3 Hidrograf Analizi

Hidrograf, bir fırtınadan meydana gelen akış debisini zamanla değişimin gösteren grafiktir. Hidrograf analizi taşkın kontrolü, kuraklık analizi, hazne işletmesi ve su temini projelerinde büyük önem taşımaktadır.

Şekil 2.4 de yağış şiddeti (i, mm olarak) kesitli zaman aralığı (T) blokları halinde gösterilmiştir. Alttaki sürekli eğri şeklinde gösterilen ise fırtınadan meydana gelen akışın (Q, m^3/s olarak) hidrografıdır. Bir nehir havzasında akış hidrografı nehrin su seviyesinin sürekli ölçülmesi ve ölçüm istasyonuna uygun seviye-debi bağıntısı ile elde edilmektedir. Debinin zamanla değişimini gösteren eğrinin iki temel bileşeni vardır. Bunlardan birincisi eğri altında kalan alan, dolaysız yüzey akışı olup, yağıştan oluşan su hacmine eşittir. İkincisi ise yeraltı suyundan kaynaklanan taban akışıdır. Yağışın başlangıcında, nehirde su seviyesi ve dolaysıyla akış debisi düşüktür ve su seviyesinin yükselişe başlamasından önce belirli bir zaman süresi (gecikme zamanı)

gereklidir. Bu zaman dilimi süresince yağış suyu bitkilerde tutma, sızma ve göllenme (biriktirme) şekillerinde havzada tutularak akışa dönüşmez. Bu zaman diliminin süresi havzada yağıştan önceki toprak nemi ve yağışın şiddetine bağlıdır.



Şekil 2.4 : Yağış ve Akış hidrografı.

Yağış, havzanın tüm rutubet açıklarını doldurduğunda ve yüzeysel depo ve toprak doyma noktasına geldiğinde akış süreci başlar. Yağışın akışa geçebilen kısmına etkili yağış ve geriye kalanı buharlaşma, tutma ve sızma kayıpları olarak tanımlanır. Yağışın devam ettiği sürece etkili yağış yüksekliği artar ve kayıplar azalır (Şekil 2.4 sızma eğrisi). Dolaysız yüzey akışının hacmi hidrografın altında kalan alandan taban akışının çıkarılmasıyla ifade edilir. Bu hacmin, yüzey ve taban hareketinin kolaylıkla açıklanabilmesi için, bu hacmi iki ana bölüme ayrılır. Bunlar yüzey akımı ve iç akımdır. Akış hidrografı *A* noktasından tepe noktasına kadar etkili yağışın katkısıyla hızla yükselir. Bu katkı yağış kesildiğinden sonra çekilme noktasına kadar yüzey akımı olarak devam eder (Şekil 2.4). Çekilme noktasından itibaren akışın, toprakta geçici olarak depolanan sulardan meydana gelir. Bu akım iç akım olarak adlandırılır. İç akım çekilme noktasından *B* noktasına kadar etkili yağıştan meydana gelen akışın tamamen çekilmesine kadar devam eder. Bu da hidrografın alçalma eğrisine (resesyon) karşı gelmektedir (Şekil 2.4).

Bir başka önemli parametre ise gecikme zamanıdır. Havzanın cevap verme zamanının ölçüsü olan gecikme zamanı, yağış kütle merkezinden yüzey akış merkezine veya pikine ulaşmak için geçen süre olarak ifade edilir.

Dolaysız akış ve taban akışı arasındaki sınırın tam belirlenmesi çok zordur. Bu iki akışın ayrımı havzanın jeolojik yapısı ve kompozisyonuna bağlıdır. Örneğin kalker ve kumtaşı tabakaları gibi geçirgen akiferler taban akışına katkıları büyüktür. Hâlbuki geçirimsiz kil ve meskûn bölgeler çok düşük taban akışı sağlamaktadırlar. Taban akışı seviyesi bölgenin iklim şartlarından da etkilenmektedir. Sulak mevsimlerde yüksek olan taban akışı seviyesi kurak mevsimlerde ise düşüktür. Bir fırtına yağışı boyunca hidrografın taban akış bileşeni, nehirde su seviyesinin yükselmesine rağmen düşmeye devam eder. Sadece yağışın yeraltı suyu haznesini beslemeye başladığı zaman yükselmeye başlar (Şekil 2.4). Taban akışı bileşeni yüzey akışının bitmesinden sonra daha yüksek bir seviyede tamamlanır. Bu olay, yeterince büyük bir yağıştan sonra yeraltı suyu haznesinin nehir akışını beslemeye devam ettiği anlamına gelir. Bir sonraki sulak mevsime kadar hidrografın alçalma eğrisi yeraltı suyundan kaynaklanmaktadır. Hidroloji mühendisliğinin en önemli yönü, geçmiş sağanakları analiz ederek hiyetograf ve hidrograf bileşenlerinin dikkatle belirlenmesi ve geleceğe yönelik tahminlerin yapılmasıdır (Shaw, 1994).

2.4 Birim Hidrograf Teorisi

Birim hidrograf doğrusal bir hidrolojik sistemin birim reaksiyon fonksiyonudur. İlk olarak Sherman (1932) tarafından ortaya koyulan birim hidrograf, belli bir sürede bir su havzasının bütününe üniform ve sabit şiddete düşen yağışın bir birimlik etkili kısmının (1 cm veya 1 inç) meydana getirdiği dolaysız yüzey akışın oluşturduğu hidrograf olarak tanımlanır.

Birim hidrograf basit bir doğrusal model olarak her hangi bir yağış miktarından meydana gelen akış hidrografının elde edilmesi için kullanılabilir. Birim hidrograf teorisi aşağıdaki kabullere dayanmaktadır:

1- Artık yağış belirli bir süre boyunca sabit şiddette yağmaktadır.

2- Artık yağış tüm havza alanına üniform bir şekilde dağılmaktadır.

3- Belli bir zaman süresince devam eden artık yağışın oluşturduğu dolaysız akışın süresi yağış şiddetinden bağımsız sabit bir değerdir.

4- Aynı taban genişliğine sahip olan dolaysız akışların ordinatları her hidrografın toplam dolaysız akış miktarı ile orantılıdır.

5- Belirli bir artık yağışın oluşturduğu hidrograf tüm havza özelliklerini yansıtmaktadır.

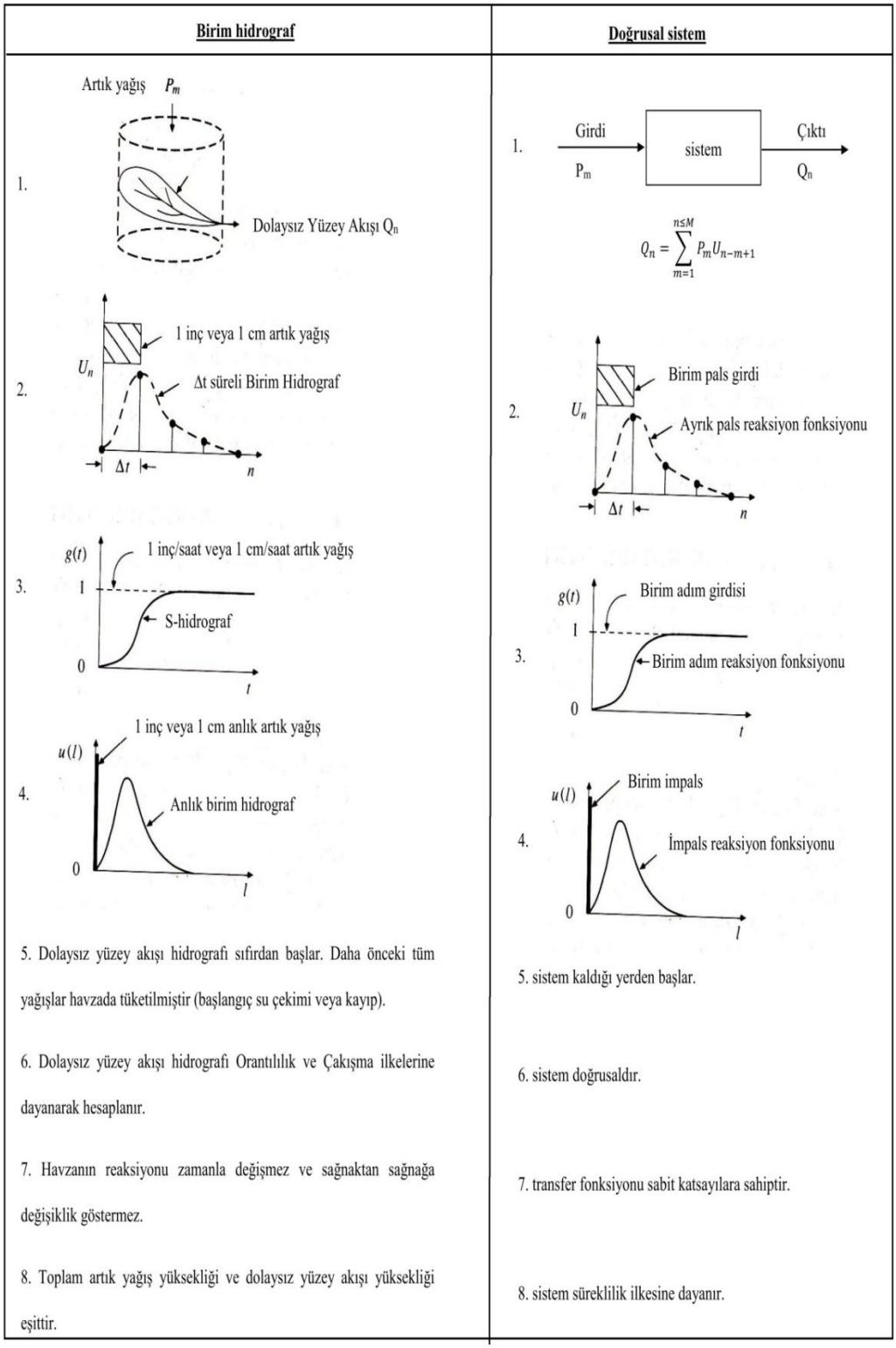
Şekil 2.5 birim hidrograf teorisinin Doğrusal sistem ile karşılaştırılmasını göstermektedir.

2.5 Modellerin Tanımı

2.5.1 HEC-HMS

HEC-HMS modeli Amerikan Ordusu Mühendislik Kurumu (U.S. Army Corps of Engineering) tarafından hidrolojik havza modellemesi amacıyla geliştirilmiştir (Halwatura ve Najim, 2013; Abushandi ve Merkel, 2013; Meenu de diğ, 2013). Şekil 2.6'da bu modelin genel görünümü sunulmuştur.

HEC-HMS modeli yağış-akış sürecinin simülasyonu için aşağıdaki hususları sağlamaktadır:



Şekil 2.5 : Birim hidrograf teorisi ve doğrusal sistemin karşılaştırılması.

1- Yağış spesifiksyon seçenekleri: Bu seçenekler sayesinde geçmiş yağış verileri, tekerrür bazlı farazi yağış verileri veya bir havzada meydana gelebilecek en büyük yağış verisi modele tanımlanabilir.

2- Yağış kaybı modelleri: Yağış kayıplarını hesaplayan farklı yaklaşımlar modelin bünyesinde mevcuttur. Bu yaklaşımlar havzanın fiziksel ve hidrolojik özelliklerini kullanarak yağış kayıplarının hesaplanmasını sağlamaktadırlar.

3- Dolaysız yüzey akışı modelleri: Bu modeller suyun havza boyunca farklı şekillerde hareketini açıklayarak tüm süre boyunca yüzey akışını hesaplama kabiliyetine sahiplerdir.

4- Hidrolojik öteleme modelleri.

5- Doğal akışların birleşmesi ve çatallaşmasını modelleme imkânları.

6- Bağlamalar ve depolama tesislerini içeren su denetim modelleri.

7- Taban akışı modelleri.

Bu çalışmada SCS-Eğri Numarası, Green-Ampt kayıp modelleri, Clark, Snyder ve SCS birim hidrograf yöntemleri uygulanmıştır. Bu modeller mevcut verilerin göz önünde bulundurulması ile seçilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi Cascina Scala havzası 42 alt havzaya bölünmüştür. Bu alt havzaların alanlarının çok küçük olması hidrolojik ve fiziksel parametrelerin küçüklüğüne sebep olmaktadır. Bu nedenle modelin daha kullanışlı olması ve hatalardan kaçınmak amacıyla bu havza bir bütün olarak ele alınmıştır.

2.5.1.1 SCS eğri numarası kayıp modeli

SCS-CN (Soil Consevation Service – Curve Number) modeli Amerika Birleşik Devletleri Toprak Koruma Kurumu tarafından yağış suyunun havzada kayıplarını hesaplamak için geliştirilmiştir (1972). Artık yağış yüksekliği veya dolaysız yüzey akışı, P_e, genelde toplam yağış yüksekliğinden, P, küçüktür veya ona eşittir. Benzer şekilde akışın başlangıcından sonra havzada kayıp olan su yüksekliği, F_a, potansiyel maksimum tutulan su yüksekliği, S, küçüktür veya ona eşittir. Ayrıca göllenmeden önce tutulan su miktarı (I_a) kadar yağan yağışın akışa geçmemesi kabul edilir. Dolaysıyla potansiyel akış yüksekliği P-I_a'ya eşit olur. Buna göre:

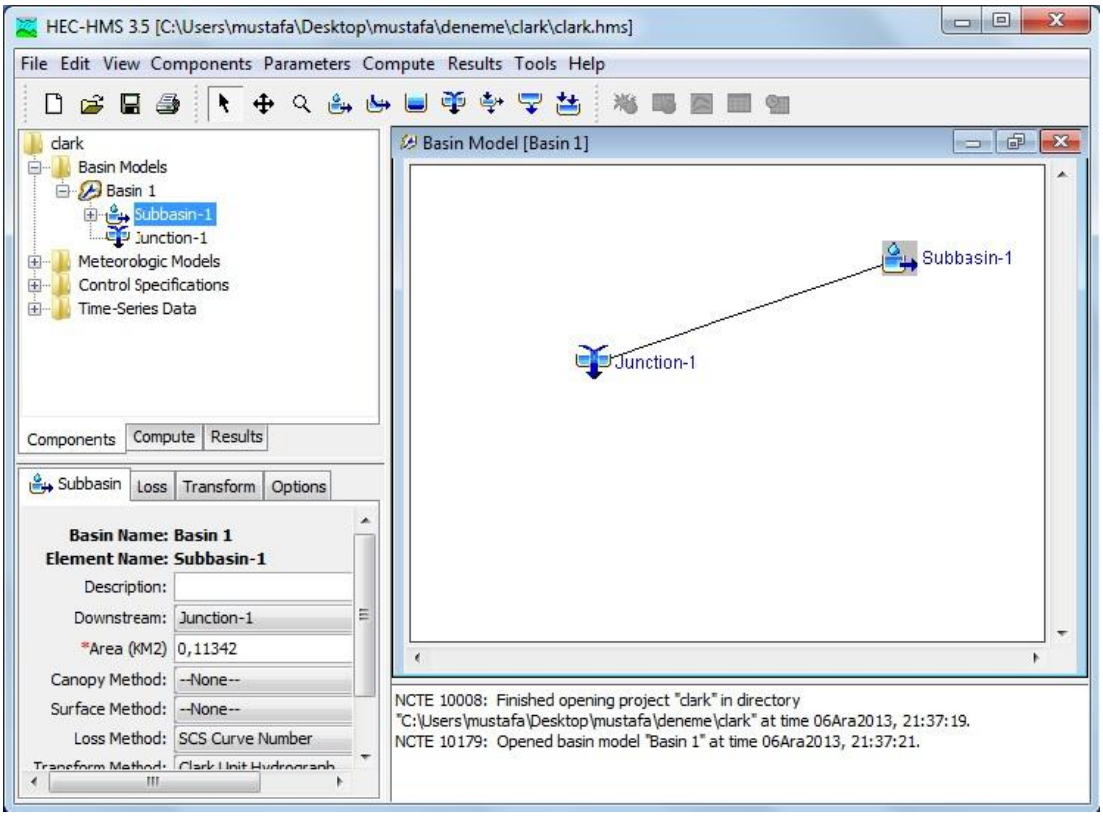
$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \tag{2.1}$$

ve süreklilik denkleminden:

$$P = P_e + I_a + F_a \tag{2.2}$$

(2.1) ve (2.2) denklemlerinin birlikte çözümü ile (2.3) denklemi elde edilir:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \tag{2.3}$$



Şekil 2.6 : HEC-HMS modelinin genel görünümü.

Bu denklem SCS dolaysız yüzey akışı hesabı yönteminin temel denklemidir. Öte yandan deneysel araştırmalar sonucu I_a ve S 'nin bağıntısı $I_a=0,2S$ şeklinde tanımlanmıştır. O zaman:

$$P_e = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \tag{2.4}$$

Potansiyel maksimum su miktarı, S, toprak cinsi ve zemin örtüsüne bağlıdır.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2.5}$$

Bu ifadede CN eğri numarası olarak adlandırılır. Buna göre çeşitli araştırmalar neticesinde farklı toprak cinsleri ve arazi kullanım şekilleri için bir eğri numarası belirlenmiştir. Bu doğrultuda dört farklı toprak gurubu seçilmiştir:

Grup A: Bu gurubu oluşturan toprak cinsleri genelde akış potansiyeli düşük olan ve tamamen ıslak olduklarında çok yüksek sızma hızına sahip olan topraklardır. Bu gurupta yer alan topraklardan derin kum tabakaları, lös ve benzeri toprakları sayabiliriz.

Grup B: Bu gurubun topraklarında sızma hızı orta seviyededir. Sığ lös, kumlu balçık bu gurupta yer almaktadırlar.

Grup C: Tamamen ıslak oldukları zaman oldukça düşük sızma hızı gösteren bu gurubun topraklarından killi balçık, sığ kumlu balçık ve bitki örtüsü seyrek olan toprakları sayabiliriz.

Grup D: Bu gurubun topraklarında akış oluşma potansiyeli yüksektir. Islak oldukları zaman kabarma özelliği olan örneğin killi topraklar bu gurupta yer almaktadır.

Çizelge 2.5'de arazi kullanımına bağlı yukarıdaki gurupların eğri numarası verilmiştir.

2.5.1.2 Green-Ampt kayıp modeli

Green ve Ampt (1911) Darcy yaklaşımını kullanılarak Şekil 2.7'de görüldüğü gibi daha basit sızma modeli sundular. Islak cephe keskin bir sınır olarak toprak nemi θ_i olan toprak kısmını, toprak nemi η olan doymuş topraktan ayırmaktadır. Sızmanın başlangıcından t zaman sonra ıslak cephe L derinliğine nüfuz edecektir ve yüksekliği h_0 olan su toprağın yüzeyinde birikmiş olacaktır (Mein ve Larson, 1973).

Süreklilik

Birim yatay en kesitli silindir şeklinde bir toprak numunesini ele alalım ve yüzey ile L derinliği arasındaki ıslak toprağı kontrol hacmi olarak düşünelim (Şekil 2.8).

Toprağın tüm derinliği boyunca başlangıç toprak nemi, θ_i, ıslak cephenin aşağı doğru inmesi ile birlikte toprak nemi θ_i den η (porozite)'ya artacaktır. Toprak nemi (θ), su hacminin toplam kontrol hacminin oranına eşit kabul edersek toplam sızma miktarı birim en kesit alanı için $L(\eta-\theta_i)$ elde edilir:

$$F(t) = L(\eta - \theta) = L\Delta\theta \qquad \textbf{(2.6)}$$

F(t): kümülâtif sızma yüksekliği.

Momentum

Darcy bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$q = -k\frac{\partial h}{\partial z} \qquad \textbf{(2.7)}$$

Darcy akısı tüm derinlik boyunca sabit kabul edilir. Buna göre 1 ve 2 noktalarını zemin yüzeyine yakın derinlikte ve ıslak cephenin altındaki kuru toprak kısmında olmalarını farz edersek (2.7) bağıntısı yaklaşık olarak aşağıdaki şekli alır:

$$f = k\left[\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2}\right] \qquad \textbf{(2.8)}$$

$f = -q$ (f'nin yönü aşağı doğru olduğu için artı işareti ile ifade edilir).

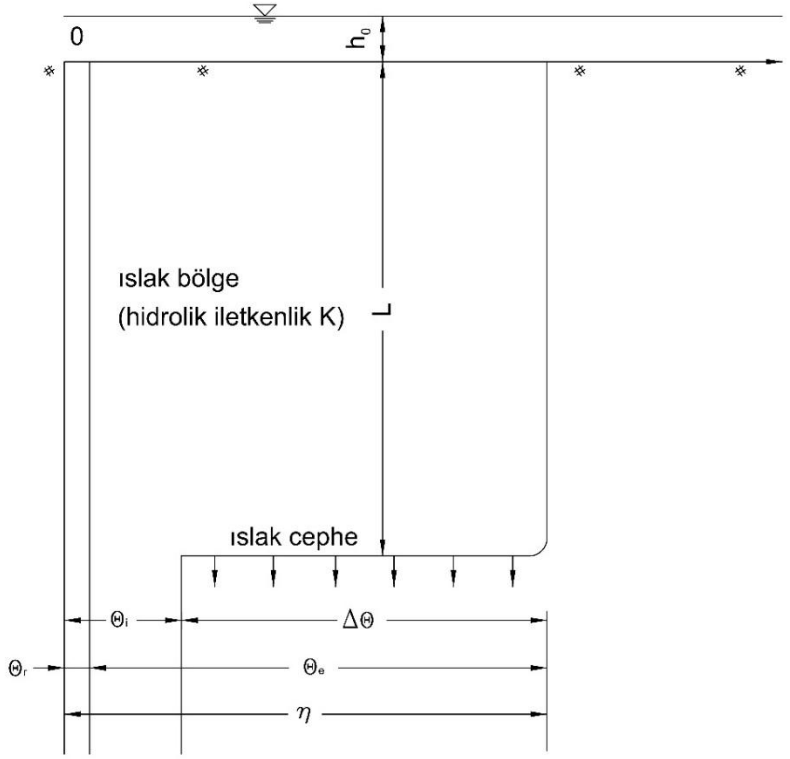
Burada, h_1:toprağın yüzeyinde göllenen h_0 yüksekliğine ve $h_2 = -\psi - L$'ye eşittir. Bu durumda (2.8) bağıntısını aşağıdaki gibi olur:

Çizelge 2.5 : Toprak cinslerine göre eğri numarası.

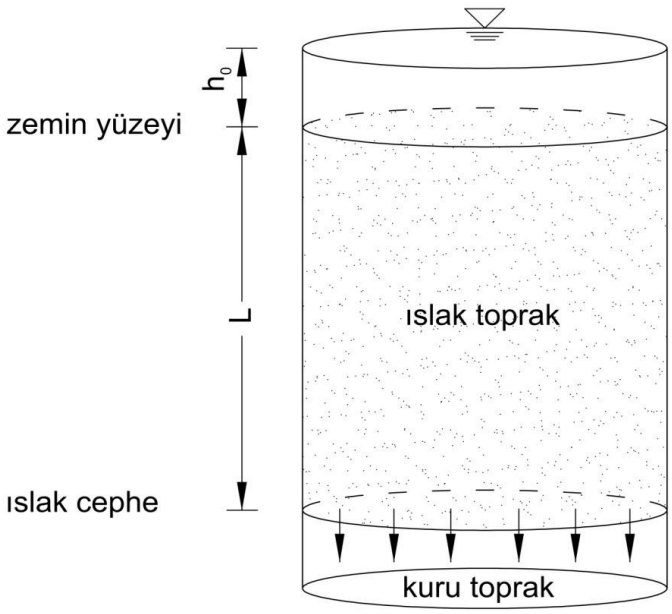
Zeminin kullanış şekli		Hidrolojik toprak gurubu			
		A	B	C	D
İşlenmiş toprak: Korumasız		72	81	88	91
Korumalı		62	71	78	81
Otlak: İyi durumda		68	79	86	89
Kötü durumda		39	61	74	80
Çayır: iyi durum		30	58	71	78
Orman: zayıf örtü		45	66	77	83
iyi durumda örtü		25	55	70	77
Açık yüzeyler: Çimen, Park, Mezarlık gibi					
İyi durumda: En az %75'i çimen kaplı		39	61	74	80
Orta durumda: %50-75'i çimen kaplı		49	69	79	84
Ticaret ve iş bölgeleri: %80 geçirimsiz		89	92	94	95
Sanayi bölgeleri: %72 geçirimsiz		81	88	91	93
Konut bölgeleri:					
Ortalama parsel alanı	Ortalama geçirimsiz yüzde				
500 m^2 veya daha az	65	77	85	90	92
1000 m^2	38	61	75	83	87
1500 m^2	30	57	72	81	86
2000 m^2	25	54	70	80	85
4000 m^2	20	51	68	79	84
Kaplamalı park alanları, çatılar vs.		98	98	98	98
Yollar: kaplamalı, bordürlü, yağmur suyu toplamalı		98	98	98	98
Çakıl		76	85	89	91
Toprak		72	82	87	89

$$f = k\left[\frac{h_0 - (-\psi - L)}{L}\right] \qquad \textbf{(2.9)}$$

Ψ : emme yüksekliği (doymamış ve gözenekli ortamda, akışkan tarafından toprağın emme kuvvetine karşı koyduğu enerji). Eğer h_0 göllenmiş su yüksekliğini ihmal edersek (2.9) bağıntısı



Şekil 2.7 : Green-Ampt sızma modeli.



Şekil 2.8 : Birim en kesit alanına sahip silindir boyunca sızma (Green-Ampt).

$$f \approx k\left[\frac{\psi + L}{L}\right] \tag{2.10}$$

şeklini alır. Islak cephe derinliği (2.5) denkleminden $L=F/\Delta\theta$'ya eşit olur.

$$f = k\left[\frac{\psi\,\Delta\theta + F}{F}\right] \tag{2.11}$$

$f = \frac{dF}{dt}$ şeklinde tanımlanır ve (2.11) denkleminde yerine yazılırsa

$$\frac{dF}{dt} = k\left[\frac{\psi\,\Delta\theta + F}{F}\right] \tag{2.12}$$

halini alır. Bu diferansiyel denklemi F için çözümlenirse

$$\left[\frac{F}{F + \psi\,\Delta\theta}\right]dF = k\,dt \tag{2.13}$$

olur.

$$\left[\left(\frac{F + \psi\,\Delta\theta}{F + \psi\,\Delta\theta}\right) - \left(\frac{\psi\,\Delta\theta}{F + \psi\,\Delta\theta}\right)\right]dF = k\,dt \tag{2.14}$$

Her iki tarafın integrali alınırsa:

$$\int_0^{F(t)} \left(1 - \frac{\psi\,\Delta\theta}{F + \psi\,\Delta\theta}\right)dF = \int_0^t k\,dt \tag{2.15}$$

$$F(t) - \psi\,\Delta\theta\{\ln[F(t) + \psi\,\Delta\theta] - \ln(\psi\,\Delta\theta)\} = kt \tag{2.16}$$

veya

$$F(t) - \psi\,\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\,\Delta\theta}\right) = kt \tag{2.17}$$

elde edilir. Bu ifade Green-Ampt denklemi olarak adlandırılır. Kümülâtif sızma F, (2.17) denkleminden elde edilmiştir, sızma hızı ise aşağıdaki ifadeden hesaplanır:

$$f(t) = k\left(\frac{\psi\,\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \tag{2.18}$$

Burada k, t, ψ ve $\Delta\theta$ parametreleri ile $F(t)$ iterasyon yöntemi ile hesaplanabilir. Çizelge 2.6'da Rawls, Brakensiek ve Miller'ın 1983 yılında yaklaşık 5000 toprak çeşidi üzerine yaptıkları deneysel araştırmalar sonucu farklı toprak klasmanları için belirledikleri Green-Ampt modeli parametrelerinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Green-Ampt modeli parametreleri.

Toprak cinsi	η	θ_e	Ψ(cm)	K(cm/saat)
Kum	0,437	0,417	4,95	11,78
Lemli kum	0,437	0,401	6,13	2,99
Kumlu lem	0,453	0,412	11,01	1,09
Lem	0,463	0,434	8,89	0,34
Siltli lem	0,501	0,486	16,68	0,65
Kumlu Kil Le-	0,398	0,330	21,85	0,15
Kil Lem	0,464	0,390	20,88	0,10
Siltli Kil Lem	0,471	0,432	27,3	0,10
Kumlu Kil	0,430	0,321	23,90	0,06
Siltli Kil	0,479	0,423	29,22	0,05
Kil	0,475	0,385	31,63	0,03

2.5.1.3 Clark birim hidrograf metodu

Clark birim hidrograf yöntemi (1943) bir havzanın birim hidrografını iki ana sürecin sonucu olarak ifade etmektedir:

1- Öteleme: Artık yağışın bulunduğu noktadan drene olarak havzanın çıkış noktasına erişmesi.
2- Azalma: Artık yağışın, havza içerisinde tutulunca debinin azalması.

Suyun havzada kısa süreli tutulması (toprakta, bitkilerin üzerinde, yüzeysel depoda veya kanallarda), artık yağışın akışa dönüşmesinde önemli rol oynamaktadır. Doğrusal hazne bu tutulmanın bir genel ifadesidir. Bu model süreklilik denklemi ile başlamaktadır:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \qquad \textbf{(2.19)}$$

Burada *dS/dt*, *t* zamanında suyun depoda zamanla değişim hızı; I_t, *t* zamanında depoya giren ortalama akım; ve O_t, *t* zamanında depodan çıkış akım. Doğrusal hazne modeli ile *t* zamanında depolamanın çıkış akımı ile bağıntısı aşağıdaki gibi olur:

$$S_t = RO_t \quad \textbf{(2.20)}$$

R sabit doğrusal hazne parametresidir. Basit bir sonlu farklar yaklaşımı ile (2.19) ve (2.20) denklemlerinin birlikte çözümü:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad \textbf{(2.21)}$$

şeklinde olur. C_A ve C_B öteleme katsayılarıdır ve aşağıdaki ifadelerden hesaplanır:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0{,}5\Delta t} \quad \textbf{(2.22)}$$

$$C_B = 1 - C_A \quad \textbf{(2.23)}$$

Modelin parametreleri

1- Toplanma zamanı (T_c): sağanak yağıştan kaynaklanan yüzey akışın drenaj havzasındaki en uzun geçiş zamanına sahip olan noktadan çıkış ağzına gelmesi için gerekli zaman süresi (DSİ, Url-1)

2- Depolama katsayısı (R): Bir akiferin birim yük değişimi altında birim akifer yüzey alanından depolamaya aldığı veya depolamadan dışarı verdiği su hacmi (DSİ, Url-1).

Farklı kuruluşlar tarafından geliştirilen denklemler aracılığı ile toplanma zamanı elde edilebilir. Bu çalışmada mevcut veriler ışığında USGS'nin (Amerikan Jeoloji Araştırma Merkezi) Illinois kırsal bölgeleri için geliştirdiği ifadeler kullanılmıştır (Timothy ve diğ, 2000):

$$T_c = 87{,}5L^{0{,}868}(I+1)^{-1{,}563}D^{0{,}78} \quad \textbf{(2.24)}$$

$$R = 81{,}1L^{0{,}759}(I+1)^{-0{,}994} \quad \textbf{(2.25)}$$

Bu denklemlerde T_c: toplanma zamanı (saat); R: depolama katsayısı (saat); L: ana kanal uzunluğu (mil); I; geçirimsiz alan yüzdesi ve D: yağış yüksekliği (inç).

2.5.1.4 Snyder sentetik birim hidrograf metodu

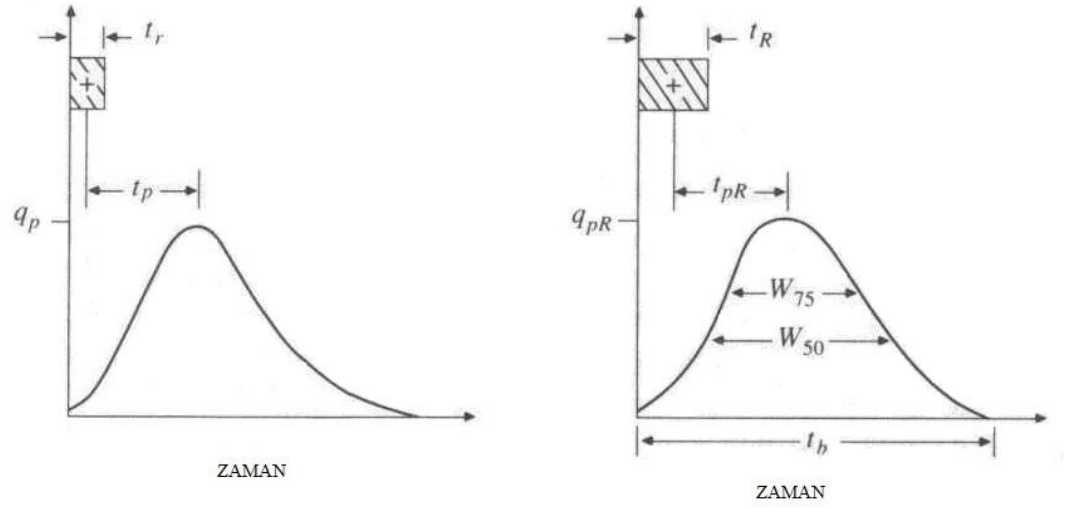
Snyder (1938) Amerika Birleşik Devletleri Appalachian dağlı bölgesinde yaptığı araştırmalarında standart birim hidrograf özelliklerini açıklayan bazı sentetik bağıntılar elde etmiştir. Daha sonra bu bağıntılar Amerikan Ordusu Mühendislik Kurulu tarafından düzeltilmiştir (Şekil 2.9). Snyder yağış süresi t_r olan bir birim hidrograf tanımlamıştır. t_r'nin gecikme zamanı ile ilişkisini

$$t_p = 5{,}5t_r \quad \textbf{(2.26)}$$

olarak belirlemiştir. Bu doğrultuda bir havzanın standart birim hidrografını elde etmek için aşağıdaki beş parametre belirlenmelidir:

1- havzanın gecikme zamanı (yağış kütle merkezinden yüzey akış merkezine veya pikine ulaşmak için geçen süre (DSİ)):

$$t_p = C_1 C_t (L L_c)^{0,3} \qquad \textbf{(2.27)}$$



Şekil 2.9 : Snyder sentetik birim hidrografı.

Bu ifadede t_p: gecikme zamanı (saat); L: havzanın çıkış noktasından en uzak noktaya kadar ana kanalın uzunluğu (km veya mil); L_c: havzanın orta noktası ile havzanın çıkış noktasının arasındaki mesafe (km veya mil); C_1 = 0,75 (İngiliz sistemi için: 1); C_t aynı bölgede bulunan ve ölçülmüş bir havzadan elde edilen katsayı.

2- havzanın birim alanı için pik debi ($m^3/s.km^2$ veya cfs/mil^2):

$$q_p = \frac{C_2 C_p}{t_p} \qquad \textbf{(2.28)}$$

C_2=2,75 (İngiliz sistemi için: 640); C_P aynı bölgede bulunan ve ölçülmüş bir havzadan elde edilen katsayı.

C_t ve C_P katsayılarını hesaplamak için ilk önce L ve L_c değerleri havzanın haritasından elde edilir. Ölçüm yapılmış havza için türetilen birim hidrografı kullanarak o havzanın t_r ve t_{pR} (gecikme zamanı) ve q_{pR} parametreleri hesaplanır. Eğer t_{pR} = 5,5 t_R ise o zaman $t_R = t_r$, $t_{pR}=t_p$ ve $q_{pR}=q_p$ olup C_t ve C_p katsayıları (2.27) ve (2.28) denklemlerinden elde edilir. Eğer $t_{pR} \neq 5{,}5 t_R$ ise standart gecikme zamanı:

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4} \qquad \textbf{(2.29)}$$

şeklinde olur ve (2.26) ve (2.29) denklemleri t_r ve t_p için çözülüp C_t ve C_p katsayıları (2.27) ve (2.28) denklemlerinden $q_{pR}=q_p$ ve $t_{pR}=t_p$ alınarak hesaplanır.

3- havzanın birim alanının pik debisi (q_{pR}):

$$t_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}} \tag{2.30}$$

4-birim hidrografın baz zamanı t_b (saat): birim hidrografın altında kalan alan 1 cm (veya 1 inç) dolaysız akış yüksekliğine eşittir. Dolaysıyla birim hidrografı standart üçgen şeklinde varsayarak:

$$t_b = \frac{C_3}{q_{pR}} \tag{2.31}$$

C_3=5,56 (İngiliz sistemi için: 1290).

5- pik debinin belirli bir oranına tekabül eden birim hidrograf genişliği aşağıdaki ifadeden elde edilir:

$$w = C_w \, q_{pR}^{-1,08} \tag{2.32}$$

C_w=1,22 (İngiliz sistemi için: 440) %75 genişliği ve 2,14 (İngiliz sistemi için 2,14) %50 genişlik için.

2.5.1.5 SCS boyutsuz birim hidrografı

SCS boyutsuz sentetik birim hidrografında debi, q debisinin pik debiye oranı ve zaman, t zamanının birim hidrograf yükseliş zamanına (T_p) oranı olarak tanımlanır. Belirli bir pik debi ve artık yağışın gecikme zamanı için boyutsuz sentetik birim hidrograf ordinatları kullanılarak birim hidrograf elde edilebilir. Şekil 2.10'da bir boyutsuz birim hidrograf sunulmuştur. q_p(m^3/s) ve T_p(saat) değerleri, sadeleştirilmiş bir üçgen şeklinde olan birim hidrograf vasıtasıyla elde edilebilir.

Amerika toprak koruma kurumu (SCS) çok sayıda birim hidrografı gözden geçirerek birim hidrografın alçalma süresinin yaklaşık $1{,}67T_p$ olduğunun önerisinde bulunmuştur. Birim hidrografın altında kalan alanın 1 cm (veya 1 inç) dolaysız akışa eşit olduğundan:

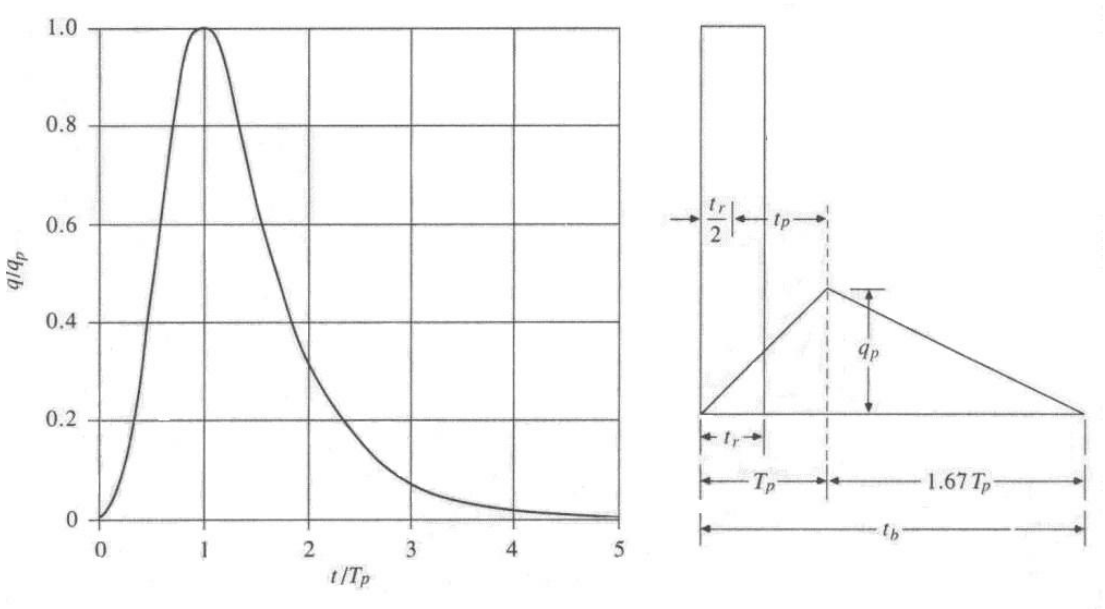
$$q_p = \frac{CA}{T_p} \tag{2.33}$$

dir. Burada C=2,08 (483,4 İngiliz sistemi için) ve A drenaj alanı (km^2 veya mil^2).

Daha sonraki araştırmalar neticesinde $t_p \approx 0{,}6T_c$ olduğu tespit edilmiştir ki burada T_c toplanma zamanıdır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi hidrografın yükseliş süresi aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \tag{2.34}$$

burada, t_r artık yağış süresi ve t_p gecikme zamanıdır.



Şekil 2.10 : SCS boyutsuz sentetik birim hidrografı.

2.5.2 NAM/MIKE BASIN

NAM ("Nedbør-Afstrømnings-Model") yağış-akış modeli Danimarka Teknik Üniversitesi, Hidrodinamik ve Hidrolik bölümü uzmanları tarafından geliştirilmiştir (Nielsen ve Hansen, 1973). Bu model su çevriminin yeryüzündeki şeklini birbirine bağlı matematiksel ifadeler aracılığı ile açıklamaktadır. Bu model deterministik-kavramsal modeller arasında sınıflandırılabilir (Şekil 2.11).

NAM modeli yağış akış sürecini dört farklı depolama öğesi içerisinde sürekli olarak toprak nemini hesaplayarak modellemektedir. Bu depolar aşağıda verilmiştir:

a) Kar deposu

b) Yüzeysel depo

c) Kök bölgesi deposu

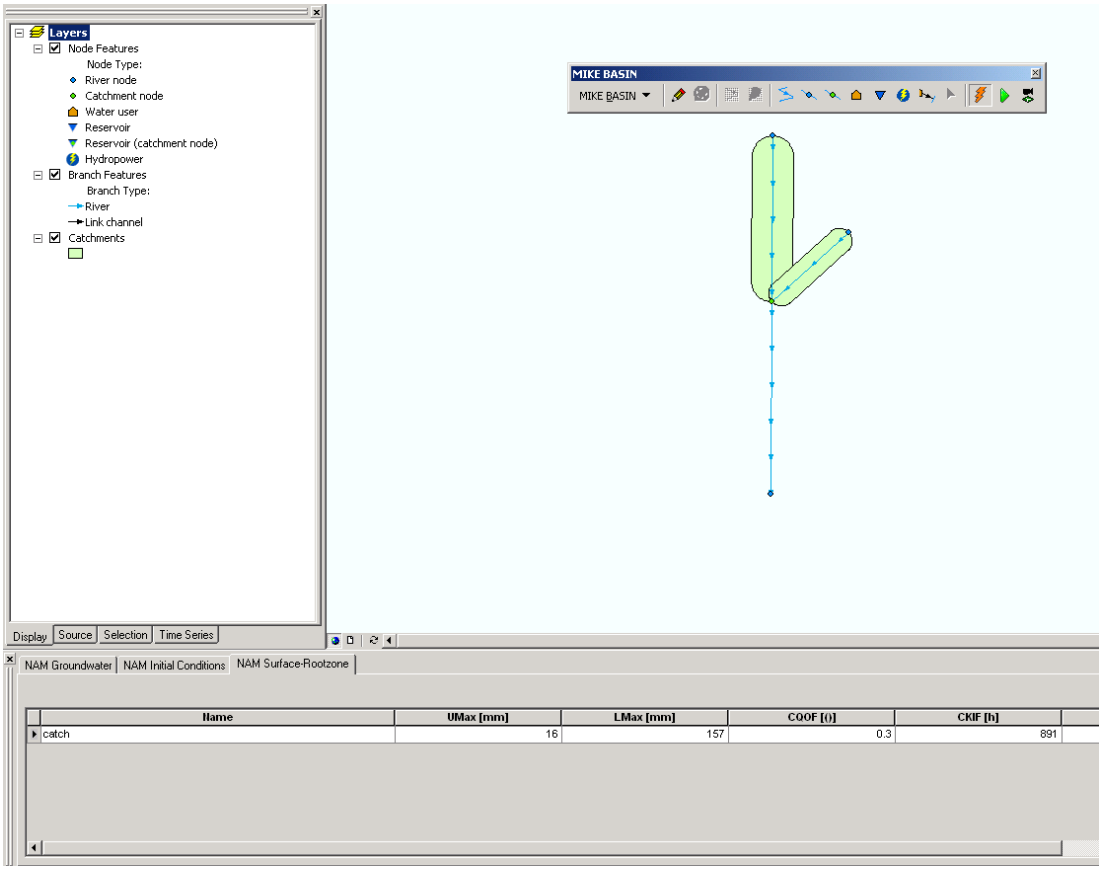
d) Yeraltı suyu deposu

Gerekli veriler:

Genel olarak NAM modeli aşağıdaki hususlara dayanarak yağışın akışa dönüşümünü modellemektedir:

1- Meteorolojik veriler: yağış (mm), potansiyel evapotranspirasyon (mm), sıcaklık (˚C), ve radyasyon (w/m2)

2- Hidrolojik veriler: ölçülen akış(m^3/s) ve yeraltı suyu abstraksyonu (mm)



Şekil 2.11 : NAM/MIKE BASIN modelinin genel görünümü.

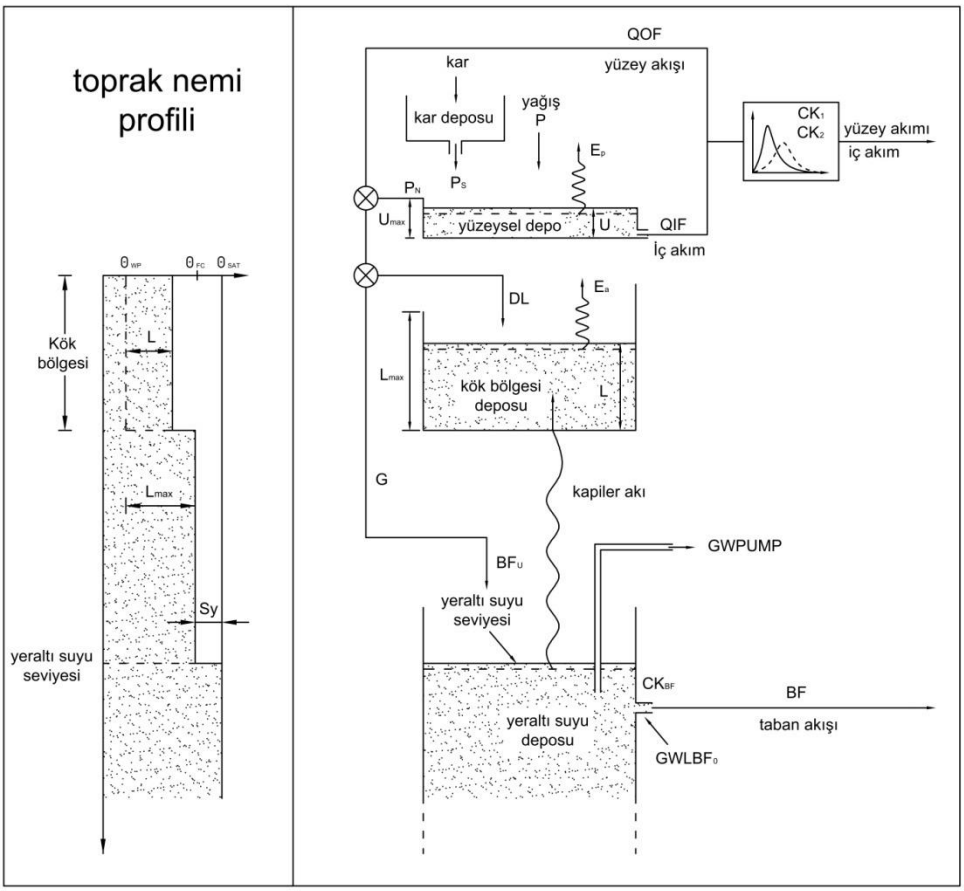
2.3.2.1 Modelin yapısı

Bir kavramsal model olarak NAM modeli fiziksel yapı ve matematiksel denklemlerin eş zamanlı kullanımına dayanmaktadır. Modelin parametreleri ve değişkenleri mevcut verilerden hesaplanır. Ayrıca bu parametreler modelin kalibrasyon sürecinde sonuçların değerlendirilmesine bağlı olarak da elde edilebilir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi bu model su çevriminin yüzeysel kısmının benzeşimi olarak tanımlanır.

2.3.2.2 Modelin temel bileşenleri

Yüzeysel depo: Bitkilerin üzerinde bulunan rutubet, çukurlarda ve toprağın ekili tabakasında mevcut olan su, yüzeysel depo olarak beyan edilir. Bu deponun toprak nemi sürekli buharlaşma ve iç akım şeklinde azalmaktadır. Toprak nemi maksimum

değere ulaştığında suyun bir kısmı yüzey akışına dönüşüp geriye kalan kısmı ise kök bölgesi veya yeraltı suyu depolarına sızmaktadır.



Şekil 2.12 : NAM modelinin yapısı.

Kök bölgesi deposu: Kök bölgesi yüzeysel bölgenin bir alt tabakasıdır ve bu bölgede bulunan su, bitkilerin kullanabileceği su olarak tanımlanır. Bu bölgenin su muhtevası transpirasyon kaybı olarak hesaplara dâhil edilir.

Evapotranspirasyon: Eğer yüzeysel deponun toprak nemi bitkilerin potansiyel evapotranspirasyon ihtiyacından küçük ise bu ihtiyacın geri kalanı kök bölgesi deposunun toprak neminden temin edilir. Buna göre:

$$E_a = (E_p - U)\frac{L}{L_{\max}} \qquad \textbf{(2.35)}$$

Burada, E_a: evapotranspirasyon; E_p: potansiyel evapotranspirasyon; U: yüzeysel deponun toprak nemi; L: kök bölgesi deposunun toprak nemi; ve L_{max}: kök bölgesi deposunun toprak nemi üst sınırı.

Yüzey akışı: Yüzeysel deposunun toprak nemi doyma noktasına geldiğinde ($U > U_{max}$), artık su akışa veya sızmaya dönüşür:

$$QOF = \begin{cases} CQOF \frac{L/L_{max} - TOF}{1 - TOF} P_N, & L/L_{max} > TOF \\ 0 \quad , & L/L_{max} \leq TOF \end{cases} \quad \textbf{(2.36)}$$

Burada *CQOF* akış katsayısı; *TOF* yüzey akışının eşik değeri ($0 \leq TOF \leq 1$); ve P_N artık su.

İç akım (yatay sızıntı): İç akımının, yüzeysel deponun toprak nemi (U) ile orantılı olup, kök bölgesi deposunun rölatif toprak nemi değişimi ile doğrusal olarak değiştiği kabul edilir:

$$QIF = \begin{cases} (CKIF)^{-1} \frac{L/L_{max} - TIF}{1 - TIF} U, & L/L_{max} > TIF \\ 0 \quad , & L/L_{max} \leq TIF \end{cases} \quad \textbf{(2.37)}$$

CKIF: iç akımının zaman sabiti; *TIF:* kök bölgesinin iç akım için eşik değeri ($0 \leq TIF \leq 1$).

İç akım ve yüzey akımı ötelemesi: İç akım, birbirine doğrusal olarak bağlı olan iki hazne içerisinde aynı zaman sabiti ile (CK_{12}) hareket etmektedir. Yüzey akışı ise benzer şekilde doğrusal hazneler içerisinde fakat değişik zaman sabitleri ile hareket etmektedir:

$$CK = \begin{cases} CK_{12} \quad , & OF < OF_{min} \\ CK_{12} (\frac{OF}{OF_{min}})^{-\beta}, & OF \geq OF_{min} \end{cases} \quad \textbf{(2.38)}$$

OF: yüzey akışı (mm/saat); OF_{min}: doğrusal ötelemenin üst sınırı (=0.4 mm/saat); $\beta=0.4$; ve *CK* zaman sabiti.

Yeraltı suyu beslenmesi: Yeraltı suyu deposunu besleyen sızma miktarı kök bölgesinin toprak nemine bağlıdır:

$$G = \begin{cases} (P_N - QOF) \frac{L/L_{max} - TG}{1 - TG}, & L/L_{max} > TG \\ 0 \quad , & L/L_{max} \leq TG \end{cases} \quad \textbf{(2.39)}$$

Burada *G:* yeraltı suyu deposunun beslenme miktarı; *TG*: kök bölgesinin yeraltı suyu beslemesi için eşik değeri.

Toprak nemi: Yağış suyunun yüzey akış ve yeraltı suyu beslemesi kısımlarından geriye kalanı kök bölgesi deposunun toprak nemini artar. Bu artış:

$$\Delta L = P_N - QOF - G \tag{2.40}$$

Taban akışı: Taban akışı, yeraltı suyu deposundan oluşan akış olarak hesaplara dâhil edilir.

2.3.2.3 Modelin parametreleri:

Yüzeysel ve kök bölgesi parametreleri:

U_{max}(mm): Yüzeysel deponun maksimum toprak nemi. Yüzeysel depo bitkilerde tutulan su, yüzeysel depresyon deposundaki su, ve toprağın ince yüzey tabakasındaki su miktarını ifade etmektedir. Yağışın akışa dönüşmesi için yüzeysel deponun toprak nemi doyma noktasını aşmış olmalıdır. U_{max} kurak mevsimlerde yüzey akışının meydana gelmesinden önce yağması gereken yağışın net miktarını ölçerek tahmin edilebilir.

L_{max}(mm): Kök bölgesinin maksimum toprak nemi. L_{max}, kök bölgesinde bitkisel transpirasyona elverişli olan maksimum toprak nemi olarak tanımlanır. L_{max} ideal koşullarda toprağın maksimum kapasitesi ile gerçek toprağın solma noktasının farkını etkili kök derinliğine çarparak elde edilebilir. Toprağın maksimum kapasitesi ile solma noktası arasındaki fark ise kullanılabilir toprak nemi ifade eder. Çizelge 2.7'de çeşitli toprak cinsleri için bu değerler verilmiştir. Evapotranspirasyonun yüzeysel ve kök bölgelerinin toprak nemi bağlı olduğundan simülasyonda su dengesini en çok U_{max} ve L_{max} parametreleri etkimektedir. Bu iki parametrenin belirlenmesinin en iyi yolu kalibrasyondur ve ilk denemeler için U_{max}=0,1 L_{max} tavsiye edilir.

CQOF: Akış katsayısı. Havzanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak deneysel araştırmaların sonucu elde edilen bu katsayı zemin örtüsü ve arazi kullanımı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

CKIF: İç akım zaman sabiti. Bu parametre U_{max} ile birlikte iç akımın miktarını belirlemektedir. ((CKIF)-1 bir saat'te iç akıma sızan yüzeysel su miktarına eşittir). İç akımın akarsu akımında çok fazla etkili olmadığından CKIF genelde çok önemli bir parametre değildir.

Çizelge 2.7 : Çeşitli toprak cinsleri için L_{max} değeri.

Toprak cinsi	θ_s	$\theta_{2,5}$	$\theta_{4,2}$
Kum	0,417	0,091	0,033
Lemli kum	0,401	0,125	0,055
Kumlu lem	0,412	0,207	0,094
Lem	0,434	0,270	0,117
Siltli lem	0,486	0,330	0,133
Kumlu Kil Lem	0,330	0,255	0,148
Kil Lem	0,390	0,318	0,197
Siltli Kil Lem	0,432	0,366	0,208
Kumlu Kil	0,321	0,339	0,239
Siltli Kil	0,423	0,387	0,250
Kil	0,385	0,396	0,272

CK_{12} (saat): İç akımı ve yüzey akışı ötelemesinin zaman sabiti. Bu parametre hidrografın tepe noktasının şeklini belirlemektedir ve havzanın boyutu ve o havzanın yağan yağışa vereceği tepkinin hızına bağlıdır.

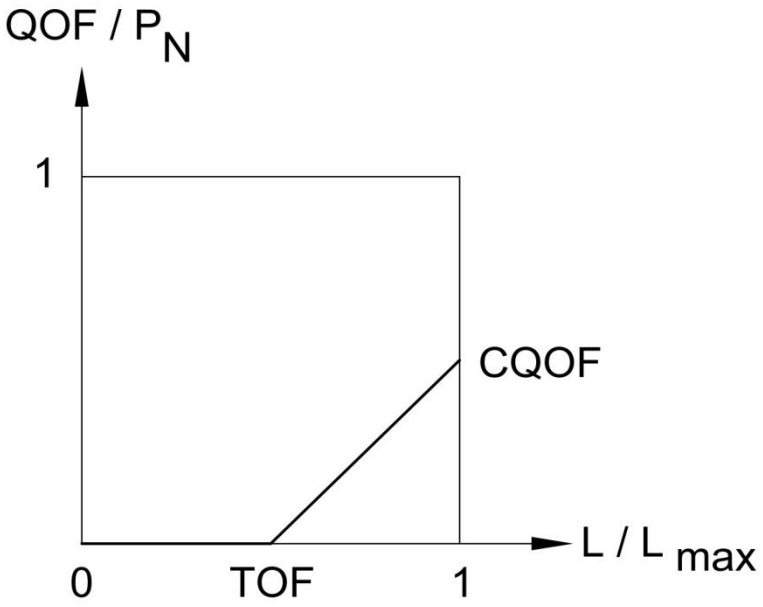
TOF: Kök bölgesi toprak nemi yüzey akışına dönüşeceğinin eşik değeri. Kök bölgesi deposunun toprak nemi meydana gelen yüzey akışı bu deponun rölatif toprak nemi *TOF* değerinden büyük olduğunda başlamaktadır (Şekil 2.13).

TIF: Kök bölgesi toprak nemi iç akımına dönüşeceğinin eşik değeri. Bu parametre TOF'nin yüzey akışını etkilediği gibi iç akımını etkilemektedir ve genelde çok önemli parametre olmayıp sıfır olarak kabul edilir.

Yeraltı suyu parametreleri

CK_{BF}: Taban akışı zaman sabiti (saat). Kurak dönemlerde hidrografın şeklini belirlemede yararlı olabilir ve hidrografın çekilme analizinden elde edilebilir.

TG: Kök bölgesi toprak nemi yeraltı suyu beslemesinin eşik değeri. Bu parametrenin yeraltı suyuna etkisi, TOF parametresinin yüzey akışına etkisinin benzeridir ve sulak mevsimin başlangıcında yeraltı suyu seviyesinin simülasyonunda önemli parametrelerden biridir.



Şekil 2.13 : Yüzey akışının meydana gelmesi.

CQ_{low}: Yeraltı suyu alt deposunun beslenmesi. Bazı durumlarda belirli bir süre sonra hidrografın çekilme eğrisi daha yavaş bir çekilme oluşur. Bu durumda yeraltı suyu alt deposunun etkili olduğunun göstergesidir. Bu parametre CK_{low} parametresi ile birlikte hidrografın çekilme analizi sonucu elde edilir.

CK_{low}: Düşük taban akışı ötelemesinin zaman sabiti. Bu parametre yeraltı suyu alt deposundan meydana gelen taban akışının modellenmesi için kullanılır.

C_{area}: Yeraltı suyu haznesinin topografik havza alanına oranı. C_{area}'nın1'den farklı değerleri, komşu havzalardan havzaya yeraltı suyunun dâhil olması (C_{area}< 1) veya havzadan komşu havzalara yeraltı suyunun çıkmasını (C_{area}> 1) ifade eder.

GWL_{BFO}(m): Taban akışını meydana getirecek maksimum yeraltı suyu seviyesi. Bu değer arazinin ortalama yüksekliği ile akarsuyun en düşük seviyesinin farkı olarak tanımlanır.

S_Y: Özgül verim. Yeraltı suyunun özgül verimini pompaj testleri sonuçlarından faydalanarak elde edilebilir. Ayrıca farklı zemin cinslerinin S_Y değerleri literatürde mevcuttur. Bu değer kil için 0,01-0,1 ve kum için 0,1-0,3 olarak hesaplanmıştır.

GWL_{FL1} (m): Birim kapiler akı için gereken yeraltı suyu seviyesi. Bu parametre kök bölgesinin toprak nemi solma noktasına geldiğinde (L=0) 1mm/gün yukarı doğru kapiler akıyı sağlayan yeraltı suyu seviyesini belirlemektedir. Çizelge 2.7'de 20 çeşit toprak cinsinin GWL_{FL1} değerleri verilmiştir.

Kar modülü parametreleri

C_{snow} (mm/˚C/gün): Derece-gün katsayısı. Kar erimesinin hızı bu parametrenin değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu değer genel olarak 2-4 aralığında seçilir.

T_0 (˚C): Baz sıcaklığı. Sıcaklık değeri T_0'ın altına düştüğü zaman yağan yağışın kar şeklinde olması kabul edilir.

C_{rad} (m^2/w/mm/gün): Radyasyon katsayısı. Bu parametre kısa dalga radyasyonunun meydana getirdiği kar erimesini belirler.

C_{rain} (mm/mm/˚C/gün): Yağışın derece gün katsayısı. Yağmurun kar erimesi üzerine etkisini belirlemektedir.

2.3.2.4 Başlangıç koşulları

NAM modelinin başlangıç koşulları aşağıdaki hususları içermektedir:

1- Yüzey ve kök bölgesi depolarının başlangıç toprak nemi.

2- Yüzey akışı, iç akım ve taban akışının başlangıç değerleri.

3- Yeraltı suyu alt deposunun meydana getirdiği başlangıç taban akışı

4- Kar deposunun başlangıç toprak nemi (gerekirse).

Simülasyon kurak mevsimin sonunda başlıyor ise tüm başlangıç şartları sıfır kabul edilebilir. Fakat kök bölgesinin toprak nemi ve taban akışı sıfır olamaz. Kök bölgesinin toprak nemi en az kapasitenin% 10ila% 30'ü kadar olamalıdır.

Çizelge 2.8 : Farklı toprak cinsleri için GWL_{FL1} değeri.

Toprak cinsi	**GWL_{FL1}(m)**
İri taneli Kum	0,5
Orta iri taneli kum	0,6
Orta küçük taneli kum	0,9
Küçük taneli kum	1,5
Humuslu lemli orta iri taneli kum	1,2
Hafif lemli orta iri taneli kum	0,7
Lemli orta iri taneli kum	0,5
Lemli küçük taneli kum	1,7
Kumlu lem	0,7
Lös lem	1,5
Hafif kumlu lem	2,5
Siltli lem	2,8
Lem	1,9
Kumlu killi lem	2,2
Siltli killi lem	1,8
Killi lem	1,0
Hafif kil	2,9
Havuz kili	0,4
Siltli kil	1,4
Turba	0,6

2.3.2.5 Modelin kalibrasyonu

Nam modeli iki farklı yoldan kalibre edilebilir:

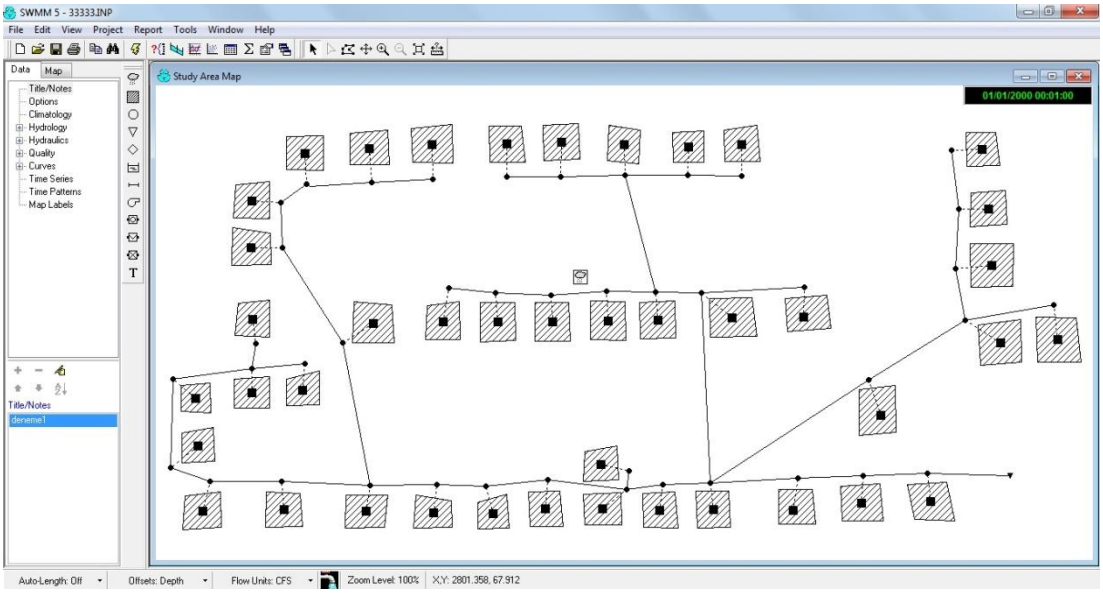
1- Otomatik

2- Manüel

Otomatik kalibrasyon bilgisayar temelli algoritmaların kullanımı ile yapılmaktadır. Bu konuda literatürde iki ana kalibrasyon yöntemi önerilmiştir: (1) çok amaçlı formülasyon, ve (2) bilgi temelli uzman sistem (Khu ve Madsen, 2005; Madsen ve diğ, 2001; Madsen, 2000; Madsen, 2000). Manüel kalibrasyon deneme yanılma yaklaşımı ile modellemenin hatasını belirli kriterlere göre en aza düşürülmesidir. Bu tez çalışmasında kalibrasyon manüel olarak yapılmıştır ve sonuçlar RMSE ve CE ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

2.5.3 SWMM

SWMM (Storm Water Management Model) EPA (Amerikan Çevre Korunumu Ajansı) ilk olarak 1971 yılında kentsel havzaların hidrolojik ve su kalitesi modellemesi amacıyla geliştirilmiştir (şekil 2.14).



Şekil 2.14 : SWMM modelinin genel görünümü.

Bu yaklaşım dinamik yağış akış modeli olup tek-fırtına veya uzun süreli (sürekli) fırtına modellemesi için kullanılmaktadır. Bu model hidrolojik çevriminin tüm öğelerini (yağış, buharlaşma, evapotranspirasyon, sızma, yeraltı suyu, iç akım, yüzey akımı vs.) dikkate alan kavramsal, parametrik bir model olarak bilinmektedir (Huber ve Diekinson, 1988; Tsihrintzis ve Hamid, 1998). Bu bağlamda SWMM modeli aşağıdaki süreçleri içermektedir:

1- Zamana bağlı yağış verisi
2- Buharlaşma

3- Kar yükü ve kar erimesi
4- Depresyon depolamasında yağış yakalanması
5- Doymamış toprak tabakalarında sızma
6- Sızan suların yeraltı suyuna süzülmesi
7- Yeraltı suyundan drenaj sistemine akan iç akım
8- Yüzey akımı non-lineer hazne ötelemesi

Tüm bu süreçlerin modellenmesi havzanın homojen alt havzalara ve bu alt havzaların geçirimli ve geçirimsiz alanlara bölünmesi ile mümkün olmaktadır. Yüzey akımı ötelemesi alt havzalar arası, havzalar arası veya tüm drenaj sistemi öğeleri arasında yapılabilir. Ayrıca SWMM yaklaşımı çeşitli esnek hidrolik modelleme olanaklarına sahiptir. Bu olanaklar boru hatları, kanal, depolama tesisleri, sapma yapılarını içeren drenaj sistemlerinin modellemesini mümkün kılmaktadır. Bu model kapsamında aşağıda belirtilen avantajlar ortaya çıkmaktadır:

1- Sınırsız büyüklükteki şebekelerin işlenebilmesi,
2- Çok sayıda standart kapalı ve açık kanal şeklinin yanında doğal kanal şekillerinin de kullanılabilmesi,
3- Depolama tesisleri, sapma yapıları, pompa istasyonları, savaklar ve orifisler gibi elemanların modellenebilmesi,
4- Yüzey akım, yeraltı suyu, iç akım, sızma veya herhangi başka bir kaynaktan oluşan akımların sistemin içerisinde modellenebilmesi,
5- Kinematik ve dinamik dalga öteleme modellerinin oluşturulabilmesi.

Bu yaklaşım, her nümerik modelde olduğu gibi otomatik veya manüel olarak da kalibre edilebilir (Baffaut ve Delleur, 1989; Liong ve diğ, 1991; Liong ve diğ, 1995; Wang ve Altunkaynak, 2012).

2.5.3.1 Modelin bileşenleri ve gerekli veriler

Yağmurölçer: Yağmurölçer, bir veya birden fazla alt havza için yağış verilerini ölçmektedir. Verilerin türü (şiddet, hacim veya kümülatif hacim) ve zaman aralıkları kullanıcı tarafından belirlenip, bu veriler manuel veya başka bir bilgi kaynağından modele aktarılabilir.

Alt havzalar: Hidrolojik olarak aynı çıkış noktasına drene olan alanlar alt havzaları oluşturmaktadırlar. Alt havzaların tanımlanmasında en önemli parametreler aşağıdaki gibidir:

- Alan

- Ortalama eğim
- Ölçülmüş yağış verileri
- Geçirimsiz alan yüzdesi
- Genişlik
- Sızma modeli
- Geçirimli ve geçirimsiz alanlara ait Manning pürüzlülük katsayısı
- Geçirimli ve geçirimsiz alanlara ait depresyon depolaması.

Bağlantı düğümleri: Bu düğümler drenaj sisteminin bağlantıları olup fiziksel olarak doğal yüzey kanallarının kesişimi, kanalizasyon sisteminin bacaları veya boru bağlantı noktalarını temsil ederler. Bu düğümlerin en önemli parametresi bulundukları noktanın kotudur.

Çıkış ağzı: Bu düğüm bir drenaj sisteminin en düşük kota sahip olan ve suların tahliye edildiği noktadır. Benzer şekilde, çıkış ağzının en önemli parametresi bulunduğu noktanın kotudur.

Akım bölücü: Drenaj sisteminin bir parçası olan bu düğümler, düğüme gelen akımı belirli bir şekilde belirli kanallara yönlendirirler. Akım bölücüler sadece kinematik dalga modeli ötelemesinde aktif olup dinamik dalga ötelemesinde sadece bağlantı düğümü gibi davranırlar.

Depolama ünitesi: Drenaj sisteminin depolama düğümleri, fiziksel olarak depolama olanaklarını (küçük bir havuzdan büyük bir göle kadar) yansıtmaktadırlar ve hacimsel özellikleri yüzey alanı derinlik fonksiyonu ile tanımlanır.

Gerekli parametreler:

- Kot
- Maksimum derinlik
- Yüzey alanı-derinlik verileri
- Potansiyel buharlaşma

Boru hatları (bağlaçlar): İki düğüm arasında su iletimi boru hattı veya kanal vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu bağlaçların en kesit şekli Çizelge 2.9'da ki standart en kesitlerden biri olup veya herhangi bir düzensiz şekil olabilir. SWMM modeli kapsamında bağlaçlardaki debi, Manning bağıntısı ile hesaplanmaktadır:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \qquad \textbf{(2.41)}$$

n: Manning pürüzlülük katsayısı; A: en kesit alanı (m^2); R: hidrolik yarıçap (m); S: kanalın taban eğimi (m/m); Q: debi (m^3/s).

Gerekli parametreler:

- Başlangıç ve bitiş düğümleri,
- Uzunluk,
- Manning katsayısı,
- En kesit şekli,
- Maksimum su yüksekliği.

Yukarıdaki bileşenlerin yanı sıra pompa istasyonları, savaklar, orifisler vs. gerektiğinde modele tanımlanabilir.

2.5.3.2 Hesaplama metotları

SWMM yaklaşımı, yağış-akış sürecini aşağıdaki adımları izleyerek modellemektedir:

Yüzey akımı: Şekil 2.15'de SWMM modelinde yüzey akımı kavramı açıklanmaktadır. Her bir alt havza yüzeyi bir non-lineer hazne gibi davranmaktadır. Giren akım, yağıştan veya tasarım gereği başka alt havzalardan oluşmaktadır. Çıkış akım ise sızma, buharlaşma ve yüzey akımı şeklinde olabilir. Bu haznenin maksimum kapasitesi maksimum depresyon depolamasına eşittir. Bu da göllenme ve yağış yakalanmasından oluşan maksimum yüzey depolamasına eşittir. Birim alandaki yüzey akışı, *Q*, sadece hazne içerisindeki su yüksekliği maksimum depresyon depolamasını, *dp*, geçtiği durumda oluşmaktadır. Bu durumda çıkış akımı büyüklüğü Manning denkleminden elde edilir. Alt havzanın yüzeyindeki su yüksekliği, *d,* su dengesi denkleminin sürekli olarak zamanla, *t*, değişmektedir.

Sızma: SWMM yaklaşımı kapsamında üç ayrı sızma modeli bulunmaktadır. Bunlar Horton denklemi, Green-Ampt modeli ve SCS eğri numarası modelleridir.

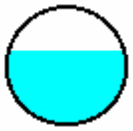
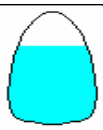
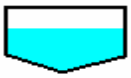
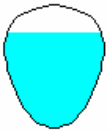
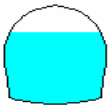
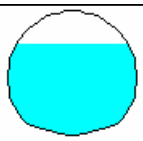
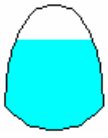
Horton Denklemi:

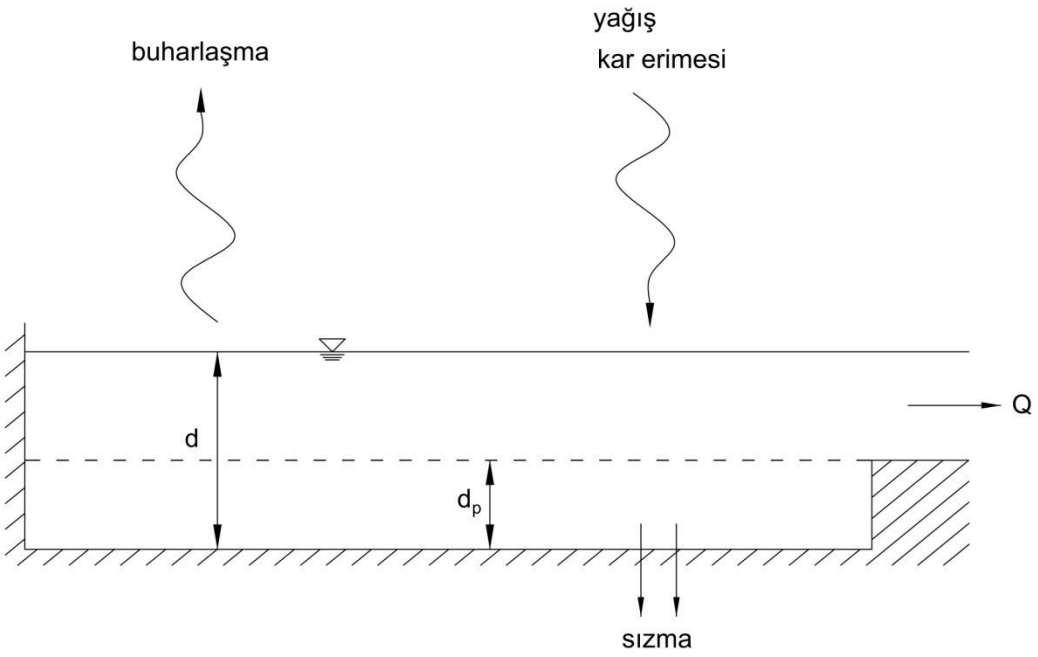
Horton (1933), deneysel çalışmalar sonucunda sızmanın her hangi bir f_0 hızı ile başladığını ve bu hızın eksponansiyel şekilde sabit bir hıza, f_c, ulaşana kadar azaldığını tespit etmiştir. Buna göre sızma hızının zamanla değişimi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \qquad \textbf{(2.42)}$$

Burada *k:* azalma sabitidir.

Çizelge 2.9 : Standart kanal en kesitleri.

Ad	Parametre	Şekil	Ad	Parametre	Şekil
Dairesel	Yükseklik		Dolu daire-sel	Yükseklik doluluk	
Kapalı dik-dörtgen	Yükseklik genişlik		Açık Dik-dörtgen	Yükseklik genişlik	
Trapez	Yükseklik üst genişliği kenar eğimi		Üçgen	Yükseklik üst genişliği	
Yatay elips	Yükseklik		Dikey elips	Yükseklik	
Yay	Yükseklik		Parabolik	Yükseklik üst genişlik	
Üstel	Yükseklik üst genişliği üs		Dikdörtgen üçgen	Yükseklik genişlik	
Dikdörtgen yuvarlak	Yükseklik genişlik		Değişmiş sepet kolu	Yükseklik genişlik	
Yumurta	Yükseklik		At nalı	Yükseklik	
Gotik	Yükseklik		katener	Yükseklik	
Yarı eliptik	Yükseklik		Sepet kolu	Yükseklik	
Yarı daire-sel	Yükseklik				



Şekil 2.15 : SWMM modelinin yüzey akımı oluşması.

Yeraltı Suyu: SWMM modelinde kullanılan yeraltı suyu modelinin şeması, şekil 2.16'de sunulmuştur. Üst kısım toprak nemi θ olan doymamış bölge ve alt kısım toprak nemi toprağın porozitesine, Φ, eşit olan tamamen doymuş bölgedir. Şekilde görüldüğü gibi birim zamanda birim alandan sızan su hacmi aşağıdaki terimlerden oluşmaktadır:

f_1: yüzeyden sızma

f_{EU}: üst bölgenin evapotranspirasyonu

f_U: üst bölgeden alt bölgeye süzülme

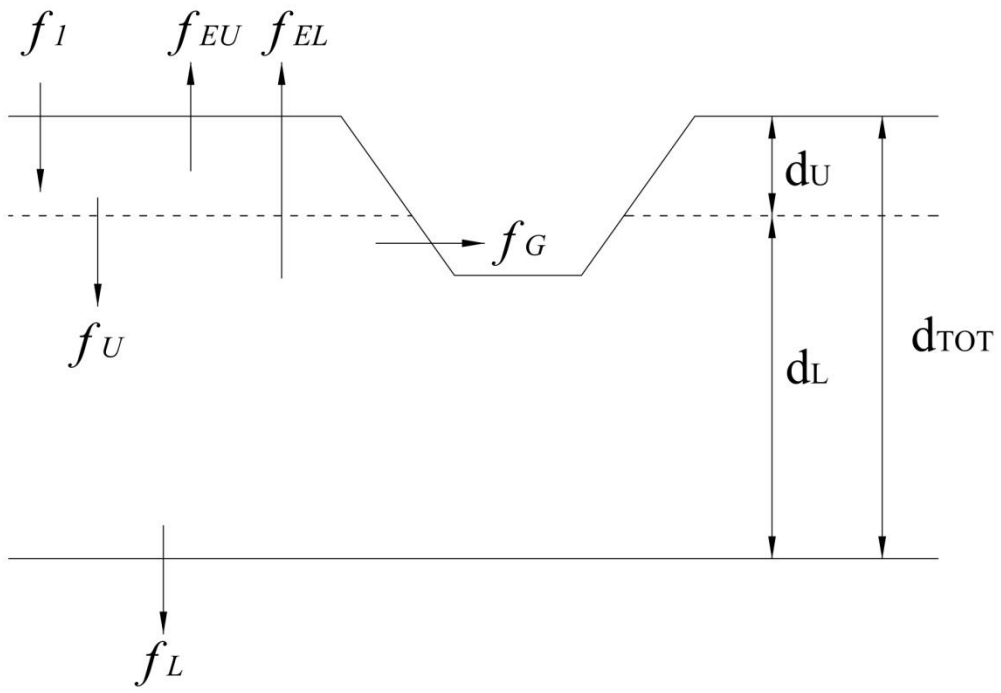
f_{EL}: alt bölgenin evapotranspirasyonu

f_L: alt bölgeden derin yeraltı suyuna süzülme

f_G: yeraltı suyundan kaynaklanan ve drenaj sistemine dâhil olan yan giriş akımı.

Kar erimesi: Kar erimesi SWMM modelinin yağış akış sürecinin bir parçasıdır. Her alt havzada kar erimesi süreci mevcut kar yükü, karın başka yerlere taşınması ve sıcaklığa bağlı kar erimesini kapsamaktadır. Kar erimesinden meydana gelen su, sisteme yağış girdisi olarak dâhil edilir.

Akış ötelemesi: SWMM yaklaşımı kapsamında boru veya kanallardan oluşan şebeke içerisinde akım ötelemesi kütle korunumu ve momentum ilkelerine dayanarak modellenmektedir (Saint Venant denklemleri). Bu doğrultuda üç farklı hesaplama yaklaşımı sunulmuştur:



Şekil 2.16 : SWMM modelinin yeraltı suyu modeli şeması.

Kararlı akım ötelemesi

Kararlı akım ötelemesinde hesaplamanın tüm zaman dilimlerinde akımın üniform ve kararlı olması kabulü yapılmaktadır.

Kinematik dalga ötelemesi

Bu model kapsamında süreklilik denklemi ve sadeleştirilmiş momentum denklemi her bir boru veya kanal için hesaplanmaktadır. Bu modelin hesaplamasında, sürtünme eğiminin taban eğimi ile eşit olduğu kabul edilir.

Dinamik dalga ötelemesi

Bu modelde bir boyutlu Saint Venant akım denklemi, hiçbir kabul yapmadan çözülür ve teorik olarak en iyi ve en güvenli çözüm olarak bilinmektedir.

Saint-Venant denklemleri

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} + g\frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \qquad \textbf{(2.43)}$$

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(2.44)}$$

Bu denklemlerde *u:* ortalama hız; *h:* akım yüksekliği; *g:* yerçekimi ivmesi; S_f*:* sürtünme eğimi; S_0*:* kanalın taban eğimi; *x:* mesafe ve *t:* zaman. Bu denklemlerde yan iç akım ihmal edilmiştir. Şöyle ki $v=u$ ve $y=h$.

Kararlı akım ötelemesinde yapılan kabuller sonucu yukarıdaki denklemler aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \tag{2.45}$$

$$F = \frac{u}{\sqrt{gh}} \tag{2.46}$$

Kinematik dalga ötelemesinde ise aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i \tag{2.47}$$

$$S_0 - S_f = 0 \tag{2.48}$$

Burada, *q:* kanalın birim genişliğinden geçen debi ve *i:* yağış yüksekliği. Bu durumda, Manning denkleminden:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \;\; A = \frac{1}{n} h^{2/3} S_0^{1/2} bh \tag{2.49}$$

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{1}{n} h^{5/3} S_0^{1/2} = \alpha h^{\beta} \tag{2.50}$$

Elde edilir.

$$\alpha = \frac{1}{n} S_0^{1/2} \tag{2.51}$$

$$\beta = \frac{5}{3} \tag{2.52}$$

O zaman kinematik dalga modelinin son hali:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \beta h^{\beta - 1} \frac{\partial h}{\partial x} = i \tag{2.53}$$

olur (Ağıralioğlu, 2012).

2.5.4 Kök seçimi yöntemi (Root selection method)

Kök Seçimi ile birim hidrograf elde etme yöntemi Liffey nehri havzasının taşkın araştırmaları esnasında geliştirilmiştir (Turner, 1982). Kayıtlı yağış verisinin bulun-

madığı, ancak yeterli akış kayıtlarının yapıldığı havzalarda yağış verilerini kullanmaksızın birim hidrograf elde etme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur.

Birim hidrograf yaklaşımında, bir havzanın yağışa vereceği reaksiyonun doğrusal olup, zamanla değişmediği kabul edilmektedir. Herhangi bir sistem için etkili yağış, *x(t),* ve dolaysız yüzey akışın, *y(t),* arasındaki matematiksel bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \tag{2.54}$$

burada *h(τ):* reaksiyon fonksiyonudur. Bu bağıntının açık şekli ise:

$$y(sT) = \sum_{\sigma=1}^{\sigma=s} h(\sigma T)X(s-\sigma T) \tag{2.55}$$

Bu ifadede, *X(sT), t=sT* ile *t=(s+1)T* zaman aralığı boyunca etkili olan yağış hacmi, *y(sT)* ise *t=sT* zamanında oluşan dolaysız yüzey akışıdır. *T=0* ve *t=T* zamanı boyunca meydana gelen etkili yağışın birim hacminde oluşan birim hidrograf ordinatları Denklem (2.55)'den elde edilebilir. σ ve s parametrelerinin integral değeri Denklem (2.55)'de yerlerine koyulduğunda aşağıdaki gibi bir dizi eşzamanlı cebirsel denklem elde edilir:

$$\begin{vmatrix} y(T) \\ y(2T) \\ . \\ . \\ y(MT) \\ . \\ . \\ y(PT) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X(0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X(T) & X(0) & 0 & 0 & 0 \\ . & X(T) & X(0) & 0 & 0 \\ . & . & X(T) & X(0) & 0 \\ X(MT) & . & . & X(T) & X(0) \\ 0 & X(MT) & . & . & X(T) \\ 0 & 0 & 0 & X(MT) & . \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X(MT) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} h(T) \\ h(2T) \\ . \\ . \\ h(NT) \end{vmatrix} \tag{2.56}$$

Burada, *M+1*: etkili yağışın zaman aralıklarının sayısı, *N*: ilk ve son sıfırdan farklı birim hidrograf ordinatlarının sayısı ve *P*: dolaysız yüzey akışının sıfırdan farklı ordinatlarının sayısıdır. Bu üç değerin arasındaki ilişki ise şöyle ifade edilir:

$$M + N = P \tag{2.57}$$

2.5.4.1 De Laine kök seçimi metodu

De Laine (1970, 1975), sadece akış verilerini kullanarak birim hidrograf elde etme yöntemi önermiştir. Bu metot, z-dönüşümü 'ne dayanmaktadır:

$$F(z^{-1}) = \sum_{s=0}^{s=\infty} f(sT) z^{-s} \quad \textbf{(2.58)}$$

Burada, *F(z)* yerine *F(z^{-1})* kullanılması, katsayıları orijinal *f(sT)* fonksiyonunun ordinatları olan dönüşüm polinomunun *z^{-1}* cinsinden olduğuna vurgu yapmak içindir.

Doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem için girdi, reaksiyon ve çıktı fonksiyonlarının z-dönüşümü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Y(z^{-1}) = X(z^{-1}) H(z^{-1}) \quad \textbf{(2.59)}$$

Burada, z-dönüşümler:

$$Y(z^{-1}) = y(0) + y(T) z^{-1} \cdots y(sT) z^{-s} \cdots + y(PT) z^{-P} \quad \textbf{(2.60)}$$

$$X(z^{-1}) = X(0) + X(T) z^{-1} \cdots X(sT) z^{-s} \cdots + X(MT) z^{-M} \quad \textbf{(2.61)}$$

$$H(z^{-1}) = h(0) + h(T) z^{-1} \cdots h(sT) z^{-s} \cdots + h(NT) z^{-N} \quad \textbf{(2.62)}$$

Görüldüğü gibi reaksiyon polinomunu elde etmek için sadece üç polinom arasında bölme işlemini gerçekleştirmek yeterlidir. Yani:

$$H(z^{-1}) = Y(z^{-1}) / X(z^{-1}) \quad \textbf{(2.63)}$$

Bu yöntem, reaksiyon fonksiyonu z-dönüşümünün katsayılarını ve dolaysıyla gerçek reaksiyon ordinatlarını bulmak için kullanılır ve tamamen deneme yanılma ilkesine dayanır. Bunun yanı sıra, yalnızca bir tek *X(z^{-1})* ve *H(z^{-1})* için Denklem (2.63) sağlanmaktadır. Maalesef bu sürecin performansı verilerin doğruluğuyla direkt olarak orantılıdır. Dooge ve Bruen (1979), yaptıkları nümerik çalışmalar sonucu, verilerdeki %10 hatanın, birim hidrograf çıkarımında % 5000 gibi büyük bir hataya yol açtığını tespit etmişlerdir. Bu dezavantajı gidermek için De Laine (2.60), (2.61) ve (2.62) denklemlerinin kompleks köklerini göz önünde bulundurarak, doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem için Denklem (2.60)'un toplam *P* sayıda kökünden, *M* sayıda kökünü girdi polinomu (Denklem (2.61)) ve *N* sayıda kökünü reaksiyon polinomunun (Denklem (2.62)) oluşturmak için kullanmıştır.

De Laine'nin önerisine göre iki veya daha fazla fırtınadan oluşan ortak akış polinomunun kökleri, yağış şiddetinden bağımsızdır ve birim hidrografın, *h(sT),* elde edilebilmesi için kullanılabilir (De Laine, 1970).

Bu metodun önemli dört dezavantajı vardır:

1- Havza sisteminin doğrusal ve zamanla değişim gösterdiği durumda, iki farklı fırtınanın ortak köklerinin elde edilmesi mümkün değildir.

2- Akış verilerindeki hatalar, ortak köklerin bulunmasını zorlaştırıp, artık yağış ve birim hidrograf köklerinin yanlış hesaplanmasına neden olabilir.
3- Her akış hidrografının z-dönüşümünden elde edilen kompleks kökleri o akışa özgü olduğundan taban akışı ayırma yöntemi köklerinin doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir.
4- Herhangi bir fırtına için elde edilen kökler, akış hidrografının süresinden doğrudan etkilenmektedir ki bu durum iki ayrı akış hidrografının köklerinin örtüşmesini zorlaştırmaktadır.

Dooge ve Bruen (1979), De Laine yöntemini bir tek fırtınanın yağış ve akış verilerini kullanarak uygulamışlardır. Bu değişilmiş metot, girdi verilerini girdi köklerini bulmak için kullanır ki bu kökler hem girdi hem de çıktı polinomlarına uygun olan köklerdir. Birim hidrograf ise geriye kalan köklerden elde edilir. Nümerik deneyimler verilerin %10 hatasının ortalama %7birim hidrograf hatasına sebebiyet verdiğini göstermiştir. Bu hata mühendislik açısından büyük ise de De Laine yaklaşımının % 5000hatasından çok daha küçüktür (Dooge, 1979).

2.5.4.2 Karakteristik kök deseni

Turner (1982), De Laine'nin orijinal metodunu bir kaç geçmiş fırtına için uygulayıp akış polinomunun kompleks köklerini çizmiştir. Farklı taşkın hidrograflarını karşılaştırarak aşağıdaki hususlar gözlenmiştir:

1- Belirli bir havza için kök desenlerinin tüm şekilleri arasında kesin bir ilişki vardır.
2- Tüm taşkın hidrografları için bir ortak çarpık dairesel kök deseni mevcuttur.

z-dönüşümü polinomlarının farklı yollardan kompleks kökleri bulunup çizilebilir. Nash kademeli doğrusal haznesi için tipik sonuçlar aşağıda verilmiştir. *T-zamanlı* birim hidrografı, *n* hazneli ve gecikme zamanı *K* olan Nash modeli için:

$$h(t) = \frac{S(t) - S(t-T)}{T} \tag{2.64}$$

Burada,

$$S(t) = 1 - \exp(-t/k) \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{t^i}{i!} \tag{2.65}$$

Üniform süresiz etkili yağışın *S*-eğrisi olarak tanımlanır.

n=1 olduğu takdirde:

$$h(0) = 0 \tag{2.66}$$

$$h(t) = \frac{\exp(-(t-T)/K) - \exp(-t/K)}{T} \quad T < t < NT \tag{2.67}$$

benzer şekilde Denklem (2.61) ile belirlenen birim hidrografın z-dönüşümü:

$$H(z^{-1}) = \sum_{s=0}^{s=N} h(sT) z^{-s} \tag{2.68}$$

Bu denklem:

$$H(z^{-1}) = \sum_{s=1}^{s=N} \frac{(\exp(T/K)-1)}{T} \exp(-sT/K) z^{-s} \tag{2.69}$$

şeklinde olup aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$H(z^{-1}) = \frac{(\exp(T/K)-1)}{T} \sum_{s=1}^{s=N} (\exp(-T/K) z^{-1})^s \tag{2.70}$$

Denklem (2.69), toplam geometrik seriler için uygulandığında:

$$H(z^{-1}) = \frac{(\exp(T/K)-1)}{T} \exp(-T/K) z^{-1} \frac{1-(\exp(-T/K)z^{-1})^N}{1-\exp(-T/K)z^{-1}} \tag{2.71}$$

Denklem (2.70)'ten oluşan reaksiyon fonksiyonunun z-dönüşümünün *N* sayıda kökü vardır. Tek kök:

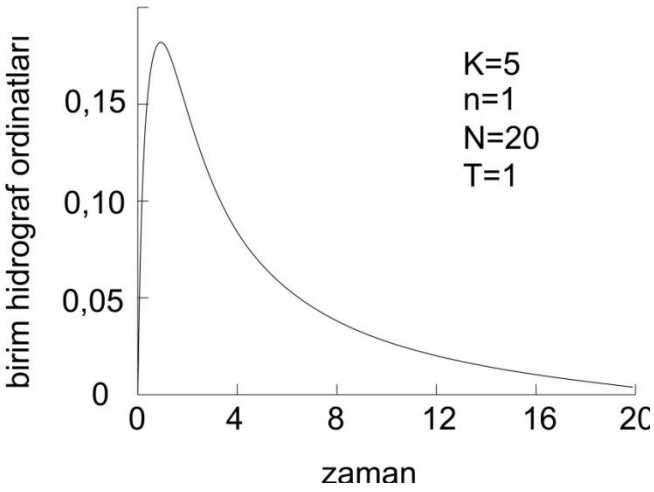
$z^{-1} = 0$

ve *N-1* kök:

$z^{-1} = \exp(T/K)(1)^{1/N}$

şeklinde elde edilir. Bu *N-1* kök Argand diyagramında çizildiğinde üniform olarak yarıçapı *exp(T/K)* olan bir daire üzerinde yer alırlar. Parametreleri *n=1, K=5, T=1* ve *N=20* olan *T-süreli* Nash birim hidrograf Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Bu birim hidrografın Çizelge 2.10'daki köklerinden 19 kökün kompleks yarıçapı *exp(T/K)=exp(0,2)=1,2214* olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 2.18). Kademeli doğrusal hazne için reaksiyon fonksiyonu ve z-dönüşümü köklerinin deseni farklılıklar göstermektedir. *n=5, K=1, T=1* ve *N=20* olan *T-süreli* Nash birim hidrografının şekli, kökleri ve köklerin dağılımı sırasıyla Şekil 2.19, Çizelge 2.11 ve Şekil 2.20'de görülmektedir.

Şekil 2.20'de, $z^{-1}=0$ kökünden (havzanın birim gecikmesini göstermektedir) başka üç kökün negatif real ekseni üzerine düşmesi ve 16 kökün çarpık bir daire oluşturduğu görülmektedir.



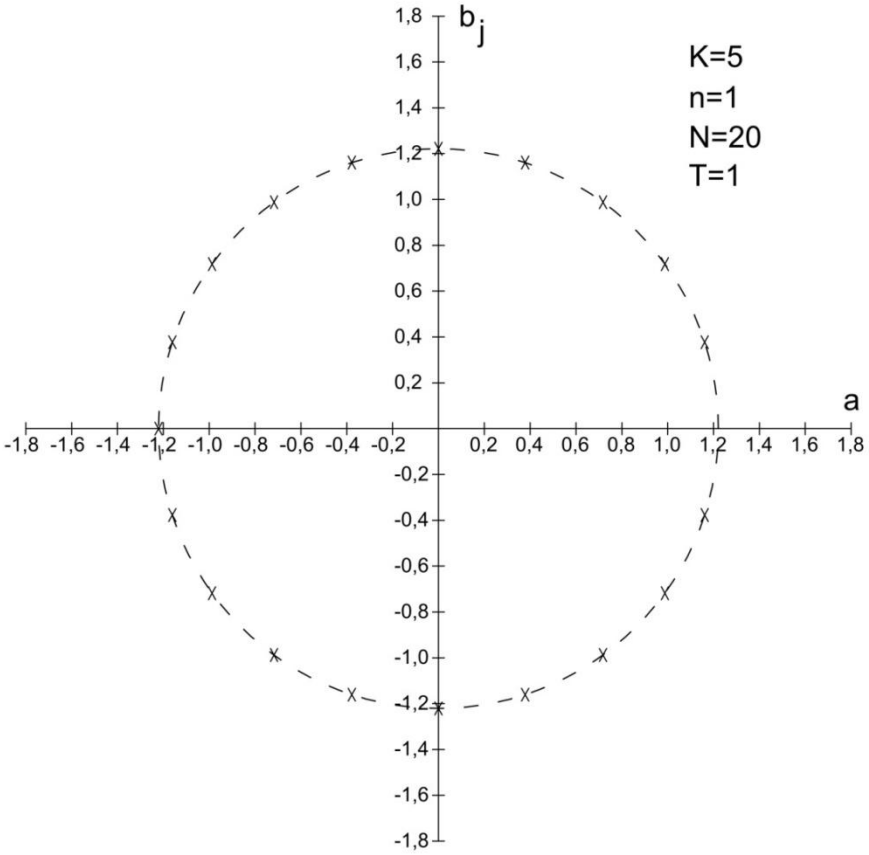
Şekil 2.17 : Nash birim hidrografı (*n=1, K=5, T= 1, N=20*).

Çizelge 2.10 : Nash tek hazneli hidrografının kompleks kökleri.

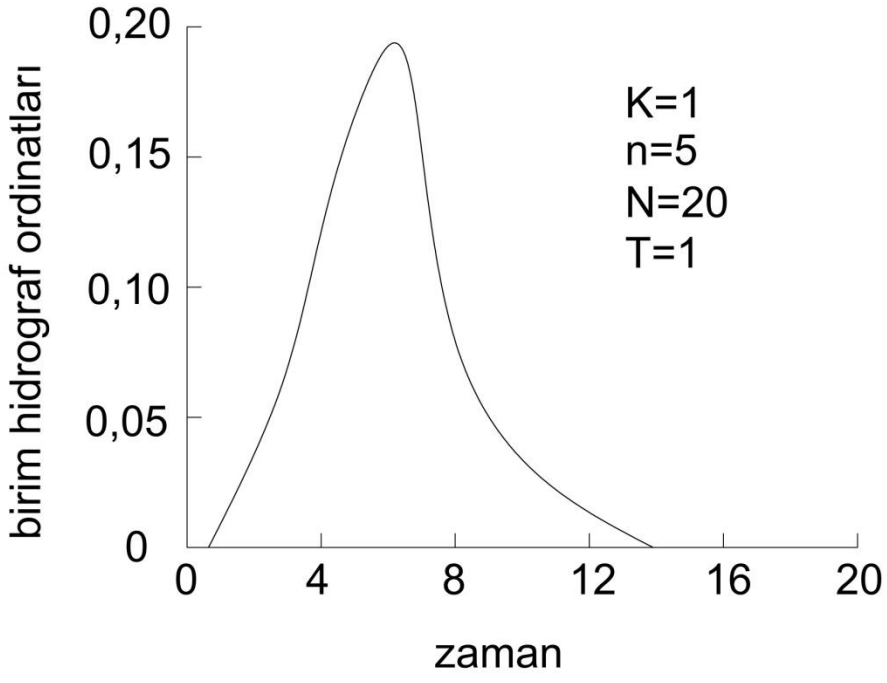
Kök numarası	Gerçel kısım	Sanal kısım	Yarıçap
1	0,000	0,000	0,000
2	-1,221	0,000	1,221
3, 4	-1,161	±0,377	1,221
5, 6	-0,998	±0,718	1,221
7, 8	-0,718	±0,988	1,221
9, 10	-0,377	±1,161	1,221
11, 12	-0,000	±1,221	1,221
13, 14	+0,377	±1,161	1,221
15, 16	+0,718	±0,988	1,221
17, 18	+0,998	±0,718	1,221
19, 20	+1,161	±0,337	1,221

Diğer parametre değerleri için de benzer şekilde az sayıda kökün gerçek ekseni üzerinde ve kalan köklerin çarpık bir daire oluşturması tespit edilmiştir. Köklerin sayısı kullanılan akışın süresinden belirlenir ve dolaysıyla taban akışı ayrımından etkilenmektedir. Süresi aynı olup parametreleri *n=1* ve *K=5* olan Nash birim hidrografının köklerinin dağılımı karşılaştırmak için Şekil 2.20'de sunulmuştur. Aynı parametrelere sahip olan hidrografın ayrık modeli Şekil 2.21'de görülmektedir (O'Connor, 1976). Buna göre:

$$h(sT) = \frac{(s+n-1)!}{(n-1)!s!} R^n Q^s \qquad \textbf{(2.72)}$$



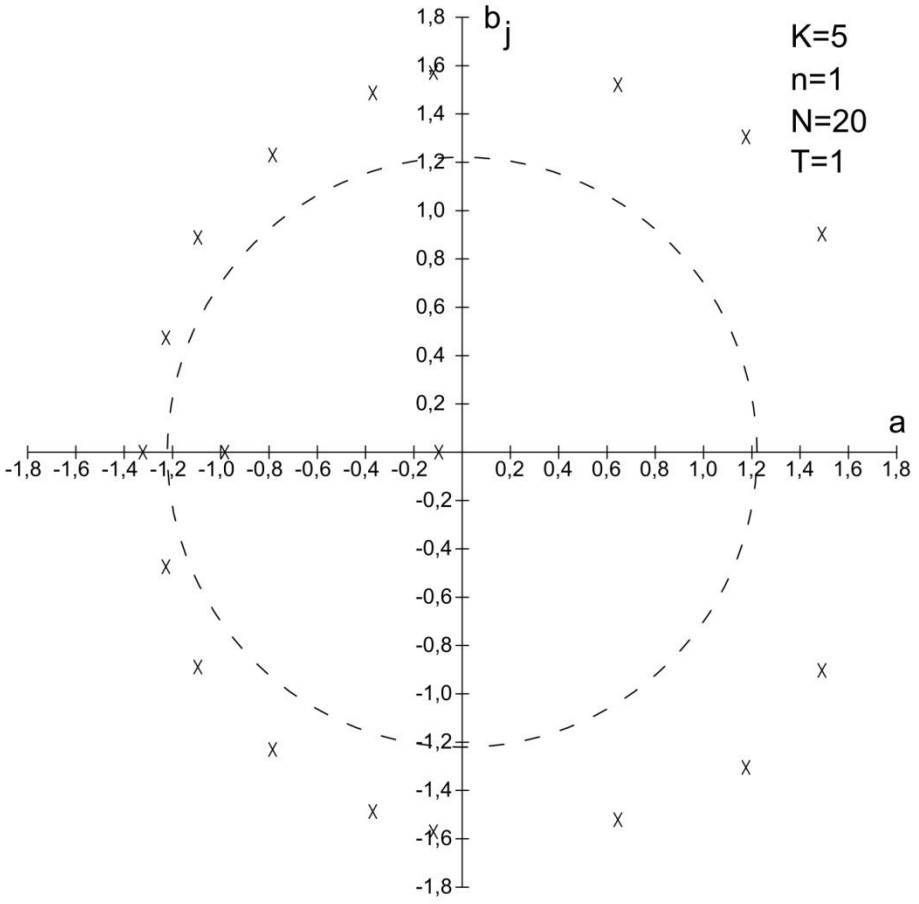
Şekil 2.18 : Nash birim hidrografı (*n=1, K=5, T= 1, N=20*) kökleri.



Şekil 2.19 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*).

Çizelge 2.11 : Nash hidrografının kompleks kökleri.

Kök numarası	Gerçel kısım	Sanal kısım	Yarıçap
1	0,000	0,000	0,000
2	-0,097	0,000	0,097
3	-0,983	0,000	0,983
4	-1,323	0,000	1,323
5, 6	-1,227	±0,474	1,315
7, 8	-1,095	±0,889	1,410
9, 10	-0,785	±1,230	1,459
11, 12	-0,370	±1,487	1,532
13, 14	-0,119	±1,571	1,575
15, 16	+0,645	±1,521	1,652
17, 18	+1,175	±1,305	1,756
19, 20	+1,690	±0,903	1,903



Şekil 2.20 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) kökleri.

burada, *n*= hazne sayısı ve:

$$R = \frac{1}{1+K} \tag{2.73}$$

$$Q = \frac{K}{1+K} \tag{2.74}$$

İlgili kökler Çizelge 2.12 ve Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Bu durumda 19 kökün de çarpık daire oluşturduğuna dikkat edilmelidir. Dairesel desen *n=1* ve *K=5* olan bir hazne için ise Şekil 2.22 gösterilmiştir. Benzer çarpık daire deseni başka parametre değerleri için de şekillendirilebilir.

2.5.4.3 Kök seçiminin prosedürü

Cebir teoreminin ilkelerine dayanarak Denklem (2.60)'ın polinomu *P* faktörün çarpımı olarak ifade edilebilir:

$$Y(z^{-1}) = \prod_{j=1}^{j=P} (z^{-1} - \alpha_j) \tag{2.75}$$

burada α_j polinomun kökleridir. $Y(z^{-1})$ polinomunun katsayıları gerçel ve pozitif sayılar olduğu için kökler sıfır veya negatif sayılar olabilir:

$$\alpha_j = A_j \tag{2.76}$$

veya kompleks çifti olarak

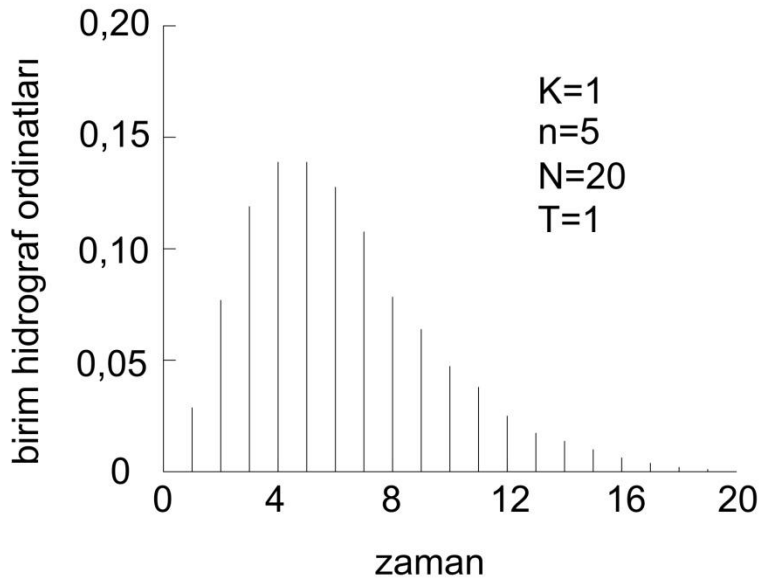
$$\alpha_j = A_j + B_j i \tag{2.77}$$

şeklinde tanımlanabilir.

A, α_j kompleks kökünün gerçel ve *Bi* sanal kısmıdır.

Daha önce bahsedildiği gibi bir havzanın gözlem akım verilerinden elde edilen birim hidrograf, birim reaksiyon fonksiyonunun z-dönüşümü polinomunun köklerinin çarpık daire oluşturma ilkesine dayanır ve aşağıdaki adımları takip ederek elde edilir:

1- Dolaysız yüzey akımının z-dönüşüm polinomu oluşturulup kompleks kökleri elde edilir.
2- Kompleks kökler Argand diyagramında çizilir.
3- Yaklaşık olarak bir çarpık daire oluşturan kökler birim reaksiyon veya birim hidrograf polinomunu oluşturmak için seçilir.
4- Geriye kalan kökleri kullanarak etkili yağış polinomu elde edilir.



Şekil 2.21 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) ayrık şekli.

Çizelge 2.12 : Ayrık Nash hidrografının kompleks kökleri.

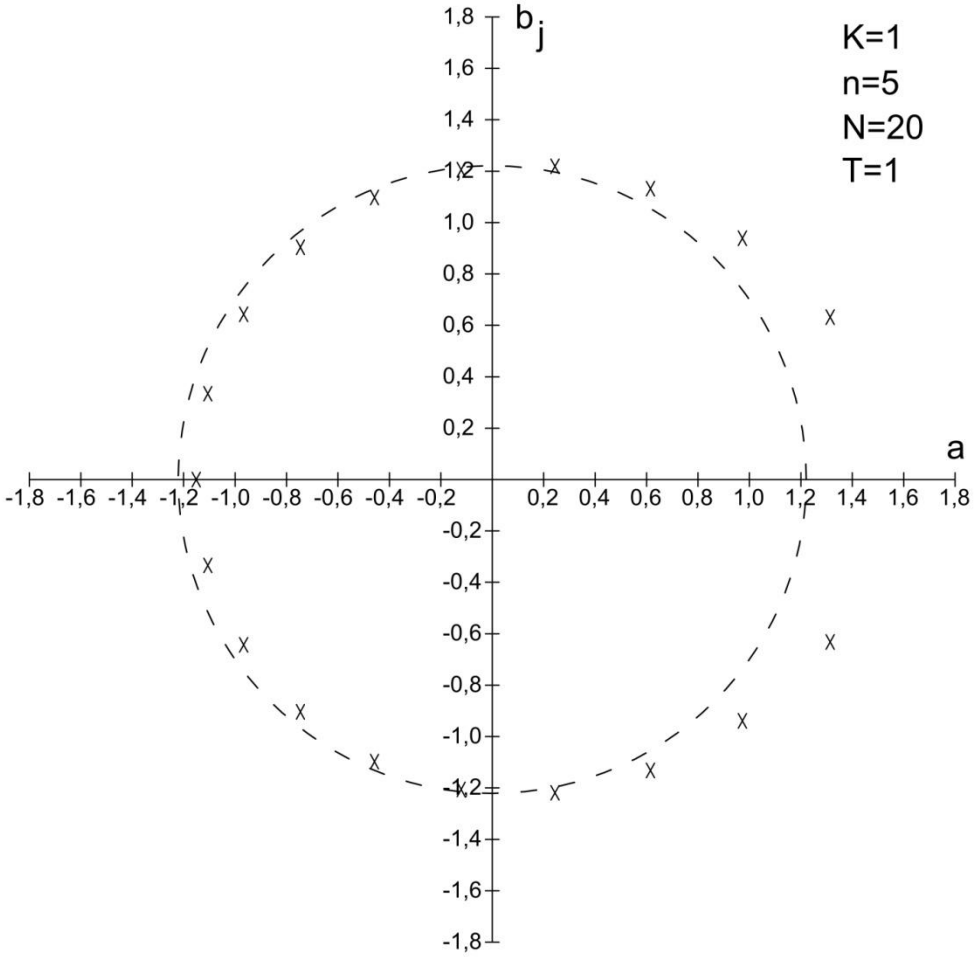
Kök numarası	Gerçel kısım	Sanal kısım	Yarıçap
1	0,000	0,000	0,000
2	-1,151	0,000	1,151
3, 4	-1,106	±0,334	1,155
5, 6	-0,967	±0,643	1,161
7, 8	-0,746	±0,904	1,172
9, 10	-0,458	±1,098	1,189
11, 12	-0,121	±1,206	1,212
13, 14	+0,244	±1,219	1,233
15, 16	+0,615	±1,132	1,288
17, 18	+0,973	±0,939	1,352
19, 20	+1,314	±0,632	1,458

2.5.4.4 Birim hidrograf düzeltme katsayısı

Ojha ve ark. (1999), Turner Kök Seçimi yöntemine bir düzeltme katsayısı önermişlerdir. Bu düzeltme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_1 = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{j=n+1-m} H(t_1)\Delta t \qquad \textbf{(2.78)}$$

A havza alanı, *n+1-m* birim hidrograf ordinatları sayısı Δt zaman aralığı ve $H(t_1)$ kök seçiminden elde edilen birim hidrograf ordinatlarıdır.



Şekil 2.22 : Nash birim hidrografı (*n=5, K=1, T= 1, N=20*) kökleri.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

3.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada sonuçların değerlendirilmesinde iki farklı istatistiksel ölçüt kullanılmıştır:

1- Hataların karesinin ortalamasının karekökü (Root Mean Squared Error, RMSE)

2- Verim Katsayısı (Coefficient of Efficiency, CE)

3.1.1 RMSE

RMSE (Root Mean Squared Error) hataların karesinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$RMSE = \sqrt{E(\theta_{tah.} - \theta_{göz.})^2} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu ifadede E beklenen değer; $\theta_{tah.}$ tahmin değeri; $\theta_{göz.}$ gözlem değerleridir.

RMSE değerinin sıfıra yakın olması uyumun en iyi olduğunun göstergesidir.

3.1.2 CE

CE (Coefficient of Efficiency) veya Nash-Sutcliffe verim katsayısı (1970) aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\theta_{tah.i} - \theta_{göz.i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\theta_{ort.} - \theta_{göz.i})^2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada, $\theta_{ort.}$ gözlem değerlerinin ortalaması ve i olay sayısıdır.

CE değeri 1 (mükemmel uyum) ve -∞ arasında değişmektedir. Sıfırdan düşük olan CE değerleri gözlem değerlerinin ortalamasının daha uygun bir tahmin olduğunu göstermektedir. Nash-Sutcliffe verim katsayısının en büyük dezavantajı tahmin ve gözlem değerlerinin farkının kare olarak alınmasıdır. Bu durum zaman serisinde bü-

yük değerlerin fazla tahmini ve küçük değerlerin ihmal olmasına yol açmaktadır (Krasue ve diğ, 2005).

3.2 Modellerin Sonuçları ve Yorumlar

Mühendislik açısından bir fırtınadan meydana gelen akış hidrografının üç parametresi önemlidir. Bunlar:

1- Toplam dolaysız yüzey akışı yüksekliği

2- Pik debi

3- Hidrografın süresi

Bu tez çalışmasında 1990-1995 yılları arasında Cascina Scala havzasında meydana gelen 5 ayrı fırtına verisi kullanılarak, NAM/MIKE BASIN ve SWMM parametrik modelleri ve HEC-HMS modelinin kapsamında bulunan Clark, Snyder ve SCS birim hidrografı metotlarının yanı sıra Kök Seçimi Birim Hidrograf yöntemi ile modellenmiştir. Ayrıca Wang ve Altunkaynak (2012) tarafından aynı havza ve aynı fırtına verileri üzerine Fuzzy logic (Bulanık mantık) ve SWMM modelleri ile yapılmış çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar üç ana parametre üzerinden değerlendirilmiştir:

3.2.1 Toplam dolaysız yüzey akışı

Toplam dolaysız yüzey akış tahminleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Görüldüğü gibi RMSE ve CE değerlerini göz önünde bulundurduğumuz zaman, bu tez çalışmasında uygulanan modeller arasında NAM/MIKE BASIN modelinin en uygun tahmin yaptığını görebiliriz. NAM/MIKE BASIN modelinin tahmin sonuçlarının istatistiksel parametreleri olan RMSE=2,26 mm ve CE=0,85 olarak elde edilmiştir. Bu modelinin kalibrasyonunda kullanılan 104 no'lu fırtına için gözlem değerine çok yakın bir değer tahmin etmiştir. Bu modelin kalibrasyon değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Genel olarak NAM/MIKE BASIN modelinin tahmin sonuçları uzun süreli fırtınalarda öngörülenin üzerinde, kısa süreli fırtınalarda ise öngörülen değerlerin altında tespit edilmiştir.

SWMM modelinin de RMSE=2,91 mm ve CE=0,73 olarak elde edilmiştir. Bu model NAM/MIKE BASIN modelinden sonra en uygun tahmin sonuçlarını vermiştir.

Çizelge 3.1 : Toplam dolaysız akış tahminlerinin sonuçları.

Fırtına	Gözlem		Tahmin (mm)										
			HEC-HMS						SWMM	NAM/MIKE BASIN	Fuzzy logic *	SWMM*	Kök Seçi-mi
	Yağış (mm)	Akış (mm)	Clark-SCS	Clark-Gr-Am	SCS-SCS	SCS-Gr-Am	Snyder-SCS	Snyder-Gr-Am					
104	26	11,83	16,35	16,35	17,33	16,84	16,73	16,26	13,6	11,84	12,40	15,20	16,84
116	15,2	4,53	9,25	9,85	9,78	10,38	9,14	9,75	5,37	4,80	7,58	7,7	10,38
282	4,8	1,73	2,55	2,55	3,10	3,10	2,43	2,43	1,23	0,23	1,30	1,40	2,41
290	38,6	16,42	26,58	27,62	27,07	28,05	26,47	27,50	22,61	21,23	20,27	23,20	28,05
499	12,2	3,38	7,37	7,68	7,41	8,21	7,26	7,56	3,19	3,09	3,91	6,00	8,21
RMSE(mm)			**5,70**	**6,22**	**6,20**	**6,63**	**5,69**	**6,12**	**2,91**	**2,26**	**2,23**	**3,85**	**6,61**
CE			**-0,03**	**-0,23**	**-0,22**	**-0,40**	**-0,03**	**-0,19**	**0,73**	**0,84**	**0,84**	**0,53**	**-0,39**

* (Wang ve Altunkaynak, 2012)

SWMM modelinin kalibrasyon değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu değerler Wang ve Altunkaynak (2012) tarafından aynı havza ve aynı veriler üzerine yapılan benzer çalışmadan alınmıştır. Buna rağmen, bu çalışmada elde edilen tahminlerin daha iyi olduğu söylenebilir. Bunun nedeni ise yağış zaman serisinin zaman aralıklarının 1 dakika yerine10 dakika olarak seçilmesidir. Bu değişiklikle, RMSE değeri 3,85'den 2,26 mm'ye düşmüştür. Benzer şekilde, SWMM modelinin uzun süreli fırtınalarda gözlem değerinin üzerinde, kısa süreli fırtınalarda ise gözlem değerinin altında tahmin yaptığı gözlemlenmiştir.

Parametrik modelin tahmin sonuçları, birim hidrograf teorisine dayanan metotların tahmin sonuçlarından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3.1'de dört birim hidrograf yaklaşımının (Clark, Snyder, SCS ve Kök Seçimi yöntemi), gözlem değerlerinin üzerinde tahmin yaptığı görülmektedir. RMSE değerinin yaklaşık 6 mm olması ve CE değerinin sıfırdan küçük olması bu durumu açıkça göstermektedir. Ayrıca HEC-HMS modelinde, SCS-eğri numarası ve Green-Ampt kayıp modelleri arasında toplam akış açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Daha önce belirtildiği gibi SCS-eğri numarası model parametreleri mevcut verilerden elde edilmiştir. Ancak, Green-Ampt modelinin parametreleri kalibre edilmesine rağmen en iyi koşullarda SCS-eğri numarası modeli ile aynı tahmin sonuçları vermiştir. Kök Seçimi yönteminde ise etkili yağış, SCS-eğri numarası modelinden hesaplanmıştır. Kök Seçimi yöntemi birim hidrograf elde etme sürecinde 104 ve 499 no'lu fırtınaları ayrı ayrı ele alınmıştır. Ancak toplam dolaysız yüzey akışı ve pik debi parametrelerinin tahmininde iki fırtınadan elde edilen birim hidrograflar arasında hiç bir farkın olmadığı görülmüştür. Sadece tahmin edilen hidrograf süresi seçilen fırtınanın süresine bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. 2. bölümde kaydedildiği gibi bu durum, havzanın doğrusal bir hidrolojik sisteme uygun davrandığını göstermektedir. EK-1 bölümünde Kök Seçimi yöntemi ile birim hidrograf elde etmenin süreci 499 no'lu fırtına için açıklanmıştır.

Fuzzy logic (Bulanık mantık) modelinin (Wang ve Altunkaynak, 2012) tahmin değerleri ise Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Yazarların fuzzy model kullanarak elde ettiği sonuçlar, bu çalışmada uygulanan model sonuçlarından daha iyi tahmin performansı gösterdiği görülmektedir (RMSE=2,23 mm ve CE=0,84). Ancak, bulanık mantık yaklaşımında, sadece toplam yağıştan toplam akışı tahmin etmek için geliştirilmiş ve akış hidrografını tahmin edememektedir.

Çizelge 3.2 : NAM/MIKE BASIN modelinin kalibrasyon değerleri.

Umax	Lmax	U/Umax	L/Lmax	CK_{12}
2,75	27,50	0,30	0,30	0,65

Çizelge 3.3 : SWMM modelinin kalibrasyon değerleri.

IMPN	PERVN	IDS(mm)	PDS(mm)	Su(cm)	Ks(mm/saat)	IMD(m/m)
0,014	0,400	1,25	2,46	15,95	7,4	0,15

3.2.2 Pik debi

Çizelge 3.4'de tüm modellerin pik debi tahmin değerleri sunulmuştur. Çizelgede açık şekilde görüldüğü gibi CE değerleri tüm modeller için sıfırın altındadır. Bu da pik debi tahmin performanslarının iyi olmadığını göstermektedir. Ancak bu modellerin arasında Clark birim hidrograf metodunun tahmini RMSE=0,21 m^3/s ile gözlem değerine en yakın tahmin olduğu söylenebilir. Parametrik modellerin kalibrasyon süreci pik debinin esas alınmasıyla yapılması daha iyi tahminlerle sonuçlanabilmektedir. Bu duruma örnek olarak 104'nolu fırtına için pik debi esas alınarak yapılan NAM/MIKE BASIN modelinin kalibrasyonu sonucunda pik debi 0,23 m^3/s'den 0,31m^3/s'ye değişmektedir (gözlem değeri = 0,32m^3/s). Buna karşılık olarak toplam dolaysız akış yüksekliği ise 11,84 mm'den 13,77 mm olarak elde edilir (gözlem değeri = 11,83 mm). Şekil 3.5'de bu durumu 104'nolu fırtınaya ait NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografta görülmektedir.

3.2.3 Hidrograf süresi

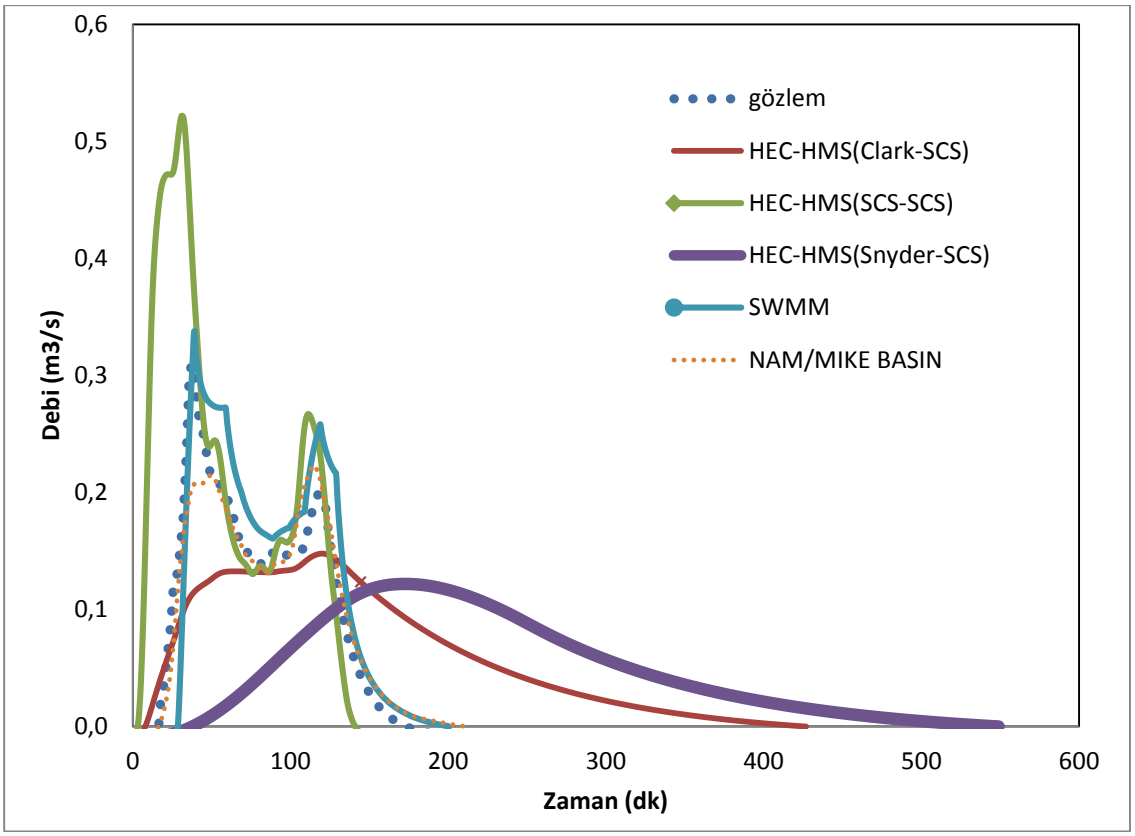
Hidrograf süresi tahminleri Çizelge 3.5'de sunulmuştur. Bu parametrenin tahmininde parametrik modeller ve birim hidrograf modelleri arasında farklılıklar gözlenmiştir. Örneğin, SWMM parametrik modeli nispeten iyi bir tahmin performansı gösterirken (RMSE=35 dakika ve CE=0,72), NAM/MIKE BASIN modelinin tahmini CE=-0,06 ile kabul edilebilir seviyede değildir. Benzer şekilde, SCS ve Kök Seçimi birim hidrograf modellerinin tahmini (sırasıyla RMSE=22,87 ve 25,44 dakika ve CE=0,88 ve 0,85) gözlem değerlerine yakın olduğu görülürken, Clark ve Snyder metotlarında kötü tahmin sonuçları (sırasıyla RMSE=235 ve 344 ve CE=-11,56 ve -25,91) elde edilmiştir. Sonuç olarak, en uygun tahmin performansı SCS ve Kök Seçimi birim hidrograf yaklaşımları vermektedir. Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'te 104 ve 499'nolu fırtınaların gözlem ve tahmin hidrografları sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Pik debi tahmin sonuçları.

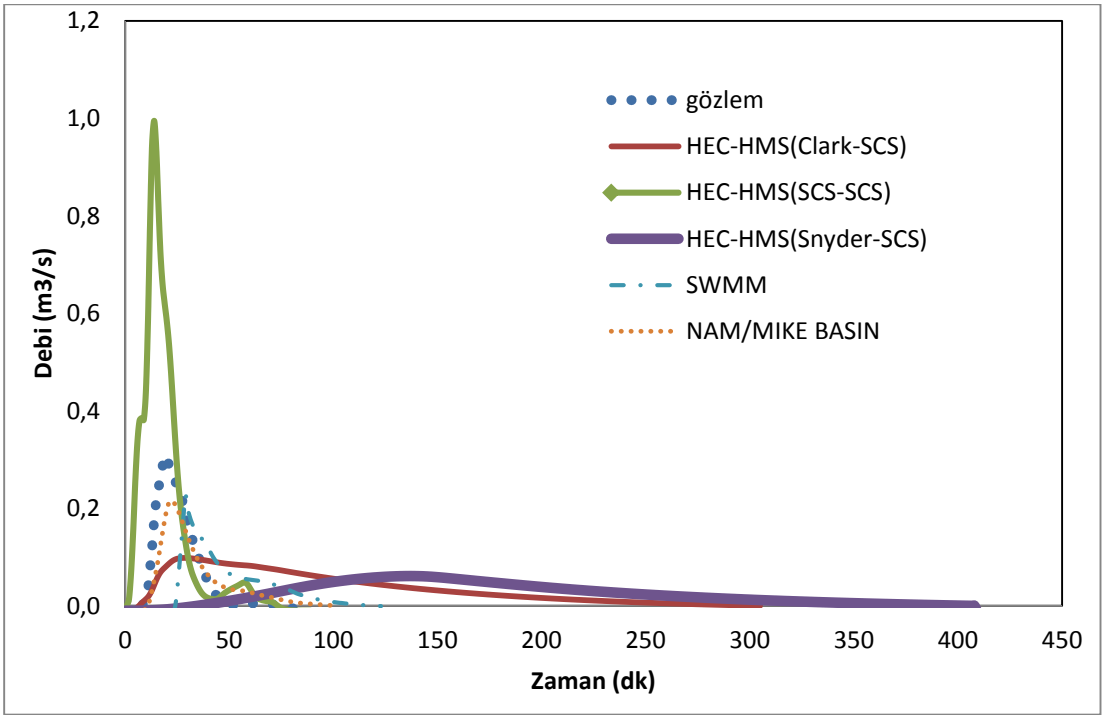
Fırtına	Gözlem	Tahmin (m^3/s)								
	Pik Debi (m^3/s)	HEC-HMS						SWMM	NAM/MIKE BASIN	Kök Seçimi
		Clark-SCS	Clark-Gr-Am	SCS-SCS	SCS-Gr-Am	Snyder-SCS	Snyder-Gr-Am			
104	0,32	0,16	0,16	0,53	0,53	0,13	0,13	0,35	0,23	0,45
116	0,34	0,14	0,14	1,35	1,50	0,09	0,09	0,26	0,26	0,59
282	0,19	0,05	0,05	1,00	1,00	0,03	0,03	0,16	0,01	0,19
290	0,62	0,28	0,031	1,25	1,51	0,22	0,23	1,35	1,07	1,08
499	0,32	0,11	0,11	1,00	1,10	0,07	0,07	0,24	0,23	0,51
RMSE(m3/s)		**0,22**	**0,21**	**0,72**	**0,83**	**0,26**	**0,26**	**0,33**	**0,23**	**0,25**
CE		**-1,45**	**-1,22**	**-24,41**	**-32,80**	**-2,42**	**-2,30**	**-4,40**	**-1,55**	**-2,18**

Çizelge 3.5 : Akış süresi tahmin sonuçları.

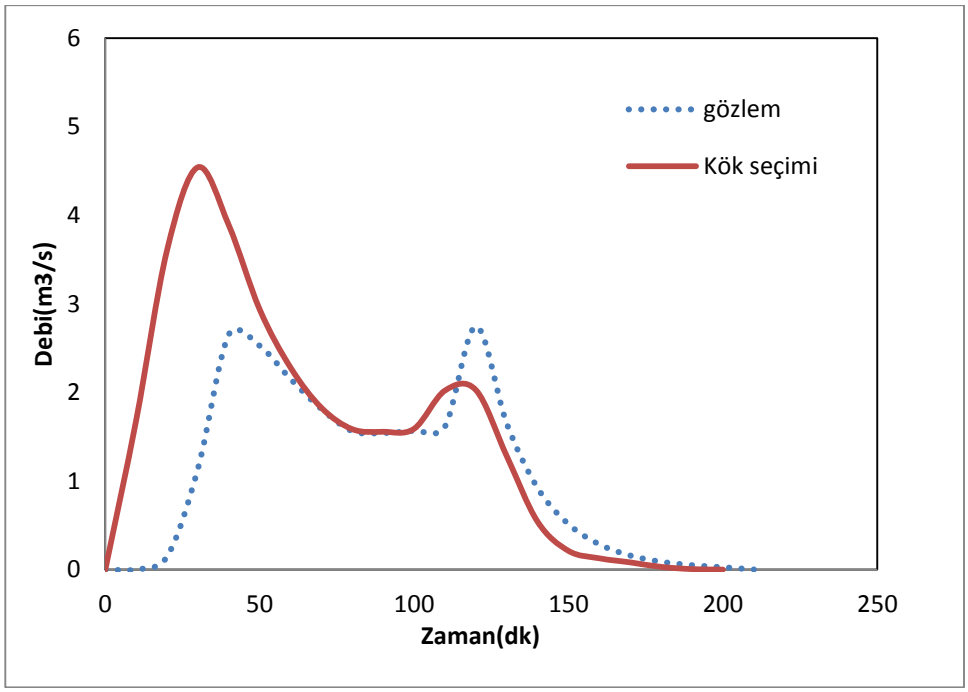
Fırtına	Gözlem	Tahmin (dk.)								
	Akış süresi (dk.)	HEC-HMS						SWMM	NAM/MIKE BASIN	Kök Seçimi
		Clark-SCS	Clark-Gr-Am	SCS-SCS	SCS-Gr-Am	Snyder-SCS	Snyder-Gr-Am			
104	204	428	428	162	162	550	550	202	213	190
116	83	326	331	61	61	435	442	122	181	100
282	48	191	191	32	32	275	275	95	157	80
290	206	521	523	201	201	646	648	240	244	210
499	89	306	310	90	90	409	413	124	104	130
RMSE(dk)		**234,75**	**237,07**	**22,87**	**22,87**	**343,64**	**343,35**	**34,99**	**68,14**	**25,44**
CE		**-11,56**	**-11,81**	**0,88**	**0,88**	**-25,91**	**-26,33**	**0,72**	**-0,06**	**0,85**



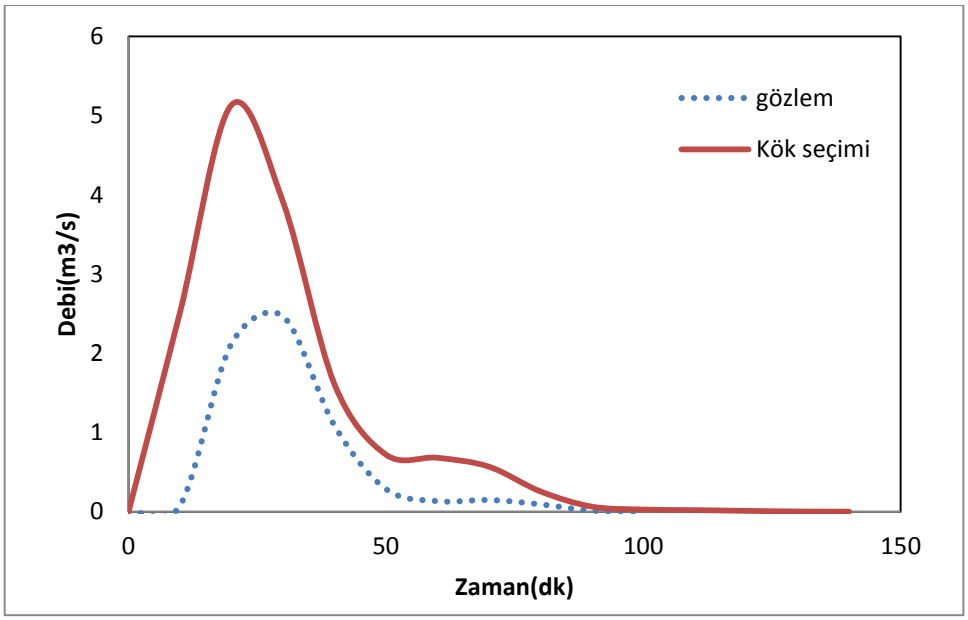
Şekil 3.1 : 104'nolu fırtınanın gözlem ve tahmin akış hidrografı.



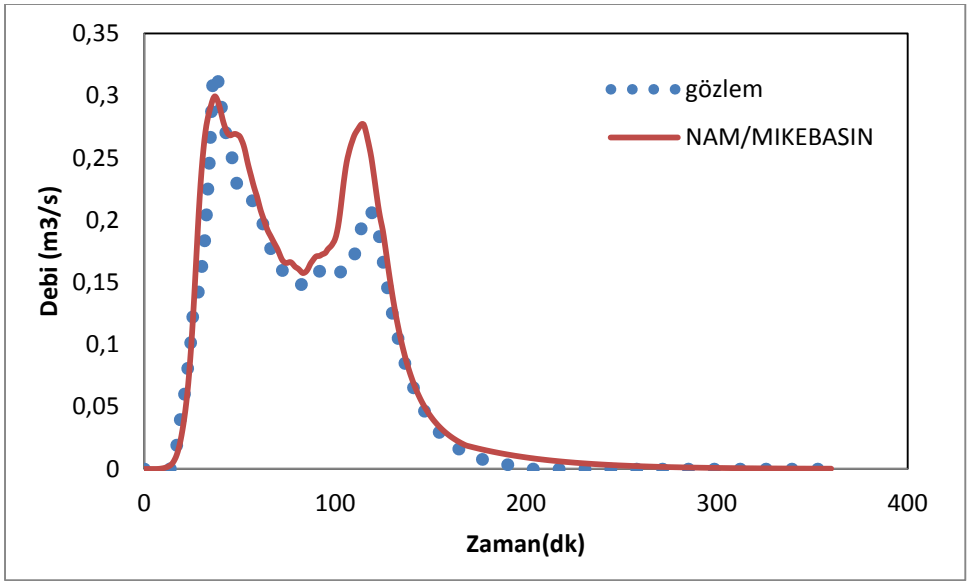
Şekil 3.2 : 499'nolu fırtınanın gözlem ve tahmin akış hidrografı.



Şekil 3.3 : 104'nolu fırtınanın gözlem ve Kök Seçimi tahmini 10 dakikalık akış hidrografı.



Şekil 3.4 : 499'nolu fırtınanın gözlem ve Kök Seçimi tahmini 10 dakikalık akış hidrografı.



Şekil 3.5 : 104'nolu fırtınaya ait gözlem ve NAM/MIKE BASIN modelinin tahmin hidrografı (pik debi için kalibre edilmiştir).

4. SONUÇ

Bu çalışmada akış hidrografının tahmin modelleri incelenip sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada İtalya'nın kuzey Pavia bölgesinden Cascina Scala kentsel havzasında, 1990-1995 yılları arasında meydana gelen 5 ayrı fırtına iki farklı yaklaşıma göre modellenmiştir. NAM/MIKE BASIN ve SWMM parametrik kara kutu modelleri ve HEC-HMS modelinin kapsamında bulunan Clark, Snyder ve SCS birim hidrograf metotlarının yanında Kök Seçimi birim hidrograf yöntemi akış hidrografının tahmini için kullanılmıştır. Akış hidrografının üç ana parametresi olan toplam dolaysız yüzey akışı, pik debi ve hidrograf süresi tahminleri RMSE ve CE istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiştir.

Toplam dolaysız yüzey akışı anlamında NAM/MIKE BASIN modeli en iyi tahmin performansı sergilemiştir. SWMM modelinin de makul tahmin sonuçları verdiği görülmüştür. Birim hidrograf teorisine dayanan tüm metotların toplam dolaysız yüzey akımı tahmin sonuçları gözlem değerlerinden oldukça uzaktır. Bu durum parametrik modellerin daha iyi tahmin yaptığını göstermektedir. Parametrik modeller su çevriminin yağış akış süreciyle ilgili olan tüm parametreleri hesaplara dâhil ederek yağış-akış sürecine daha uyumlu simülasyon oluşturmaktadır. Ancak, bu durum modelleme sürecini zorlaştırıp çok sayıda parametrenin belirlenmesini gerektirmektedir. Yeni bilgisayar temelli kalibrasyon ve optimizasyon yaklaşımları bu durumu kolaylaştırdıysa da birim hidrograf metotları daha kullanışlıdır. Ayrıca, bir havza için elde edilen birim hidrograf tüm muhtemel fırtınalar için kullanılabilir.

Bu çalışmada kullanılan tüm modellerin pik debi tahminleri mühendislikte kabul edilebilir düzeyde değildir. Bu durum, parametrik modeller için gözlem değerlerinin altında, birim hidrograf modelleri için de gözlem değerlerinin üzerinde tahmin yaptığı görülmüştür. Pik debi değeri özellikle taşkın ve su yapılarının tasarımında önemli bir role sahip olup akış hidrografının en önemli parametresidir. NAM/MIKE BASIN ve SWMM modellerinin kalibrasyonu toplam dolaysız yüzey akışı parametresi ele

alınarak yapıldığından pik debi tahmin sonuçları gözlem değerinin altında öngörülmüştür. Bu durum kalibrasyon sürecinde pik debinin esas alınmasıyla giderilebilmektedir.

Hidrograf süresi hazne işletmesi ve su temini projelerinde büyük önem taşımaktadır. Bu parametrenin en iyi tahmini SCS ve Kök Seçimi birim hidrograf yöntemleri vermektedir. NAM/MIKE BASIN modelinin kalibrasyon sürecinde daha çok parametrenin hesaplamalara dâhil edildiği için daha iyi tahmin sonuçları verebilir.

Ayrıca birim hidrograf yöntemlerinde kullanılan etkili yağış SCS eğri numarası kayıp modellinden elde edilmiş olup bu model kapsamında toprak guruplarına ait eğri numarası kullanılmıştır. Bu çalışmada mevcut haritalar ışığında elde edilen eğri numarası (77,26) değerinin büyük olması birim hidrograf yöntemlerinde öngörülenin üzerinde tahmin sonuçlarının elde edilmesine neden olmuştur. Buna ek olarak ele alınan tüm fırtınalarda yağış şiddetinin sabit olmaması birim hidrograf metotlarının yanlı tahmin sonuçlarına neden olmuştur.

KAYNAKLAR

Abushandi, E., ve Merkel, B. (2013).Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan.Water Resour Manage, **27**, 2391-2409.

Ağıralioğlu, N., (2012) Computational Hydraulics, ders notları.

Ahmad, S., ve Simonovic, S. (2005). An artificial neural network model for generating hydrograph prom hydro-meteorological parameters. Journal of Hydrology, **315**, 236-251.

Altunkaynak, A., Şen, Z. (2007). Fuzzy logic model of lake water level fluctuation in Lake Van, Turkey. Theor. Appl. Climatol., **90**(3-4), 227-233.

Altunkaynak, A. (2010). A predictive model for well loss using fuzzy logic approach. Hydrol. Processes, **24**(17), 2400-2404.

Baffaut, C., ve Delleur, J. W. (1989). Expert system for calibrating SWMM. J. Water Resources Planning and Management, **115**(3), 278-298.

Barco, J., Papiri, S., ve Stenstrom, M. K. (2008). First flush in a combined sewer system. *Chemosphere*, **7**(15), 827-833.

Bárdossy, A., Mascellani, G., ve Franchini, M. (2006). Fuzzy unit hydrograph. *Water Resources Research*, **42**, W02401.

Bhunya, P.K., Ghosh, N.C., Mishra, S.K., Ojha, C.S.P., ve Berndtsson, R. (2003). Hybrid Model for Derivation of Synthetic Unit Hydrograph. *J. Hydraul. Eng.*, **10**(6), 458-467.

Chow, V.T., Maidment, D.R., ve Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, Singapore.

DHI, (2012) *NAM Rainfall-Runoff Technical Reference*, MIKE BASIN User's Guide, 239-263.

Dingman, S.L. (2008). *Physical hydrology*, Waveland Press, INC., Long Grove, Illinois.

Feldman, A.D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference. Manual*., U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, Davis, CA, USA.

Guo, Y., ve Adams. B. J. (1998). Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models.2.Peak discharge rate. *Water Resour. Res.*, **34**(12), 3433–3443.

Guo, Y. (2001). Rational hydrograph method for small urban watersheds. *J. Hydraul. Eng.*, **6**(4), 352-356.

Halwatura, D., ve Najim, M.M.M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *J. Environmental Modelling & Software*, **46**, 155-162.

Hotchkiss, R. H., ve McCallum, B. E. (1995). Peak discharge for small agricultural watersheds. *J. Hydraul. Eng*., **121**(1), 36–48.

Huber, W. C., ve Dickinson, R. E. (1988). *Storm water management model, user's manual, version 4.0*, EPA-600/3-88-001a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

Jain, S.K., V. P. Singh, V.P., ve P. K. Bhunya, P.K. (2006). Development of Optimal and Physically Realizable Unit Hydrograph. *J. Hydraul. Eng*., **11**(6), 612-616.

Krause, P., Boyle, D. P., ve Bȁse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, **5**, 89–97.

Khu, S.T., ve Madsen, H. (2005). Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration. *Water Resources Research*, **41**, W03004.

Liong, S., Chan, W. T., ve ShreeRam, J. (1995). Peak-Flow forecasting with genetic algorithm and SWMM. *J. Hydraulic Eng*., **121**(8), 613-617.

Liong, S., Chan, W. T., ve Lum, L. H. (1991). Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration. *J. Water Resources Planning and Management*, **117**(5), 507-524.

Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* **235**, 276–288.

Madsen, H., Wilson, G., ve Ammentrop, H.C. (2002). Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* **261**, 48–59.

Madsen, H. (2000). Automatic Calibration and Uncertainty Assessment in Rainfall-Runoff Modelling. *Building Partnerships*, 1-10.

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

Meenu, R., Rehana, S., ve Mujumdar, P.P. (2013). Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrol.Process*., **27**, 1572-1589.

Nielsen, S. A., ve Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall runoff process on a daily basis, *Nord. Hydrol*., **4**, 171–190.

Noury, M., Khatami, H.R., Moeti, M.T., ve Barani, G. (2008). Rainfall-Runoff modelling using fuzzy methodology. *Journal of Applied Sciences*, **8**(16), 2851-2858.

Ojha, C.S.P., Singh, K.K., ve Verma, D.V.S. (1999). Single-storm runoff analysis using z-transform. *J. Hydrol. Eng*., **4**(1), 80-82

Özger, M. (2009). Comparison of fuzzy inference systems for streamflow prediction. *J. hydrol*., **253**(1-4), 41-68.

Papiri, S. (1989). *Precipitazioni e deflussinelbacinourbanosperimentale di Cascina Scala (Pavia).* Rapporto n. 166 del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell' Universita' di Pavia.

Parmentier, B., Doogei J.C.I, ve Bruen, M. (2003). Root selection methods in flood analysis. *Hydrol. Ear. Sys. Sci.*, **7**(2), 151-161.

Prasad,T.D., Gupta, R., ve Prakash, S. (1999). Determination of optimal loss rate parameters and unit hydrograph. *J. Hydraul. Eng*., **4**(1), 83-87.

Quader, A., ve Guo, Y. (2006). Peak Discharge Estimation Using Analytical Probabilistic and Design Storm Approaches. *J. Hydraul. Eng*., **11**(1), 46-54.

Rossman, L. A. (2004). *Storm water management model, user's manual, version 5.0*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.

Sabol, K. W. (1988). Clark unit hydrograph and R-parameter estimation. *J. Hydraulic Eng.,* **114**(1), 103-111.

Seaong, K. W., ve Lee, Y. H. (2011). A practical estimation of Clark IUH parameters using root selection and linear programming. *Hydrological Process.,* **25**, 3676-3687.

Shaw, E.M. (1994). *Hydrology in Practice*, Chapman & Hall, India.

Şen, Z., ve Altunkaynak, A. (2006). A comparative fuzzy logic approach to runoff coefficient and runoff estimation. *Hydrol. Process*., **20**(9), 1993-2009.

Timothy D. Straub, T. D., Charles S. Melching, C. S., ve Kyle E. Kocher, K. E. (2000). Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. *Water-Resources Investigations Report* 00–4184.

Todini, E. (2007). Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11**(1), 468-482.

Tokagi, T., ve Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*., **15**, 116-132.

Tokar, A.S., ve Johoson, P.A., (1999). RAINFALL-RUNOFF MODELING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS., *J. Hydrol. Eng*., 4(3), 232-239.

Tsihrintzis, V. A., ve Hamid, R. (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM . *Hydrological Process*., **12**, 311-329.

Turner, J.E., Dooge, J.C.I., ve Bree, T. (1989). Derivating the unit hydrograph by root selection. *Journal of Hydrology*, **110**, 137-152

Wang, K., ve Altunkaynak, A. (2012). Comparative case study of Rainfall-Runoff modelling between SWMM and fuzzy logic approach. *J. Hydrol. Eng.,* **17**(2), 283-291.

Yue, S., Ouarda, T., Bobée, B., Legendre, P., ve Bruneau, P. (2002). Approach for Describing Statistical Properties of Flood Hydrograph. *J. Hydraul. Eng.*, **7**(2), 147-153.

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

Url-1 <*http://dsi.gov.tr/dsi-sozlukler*>, alındığı tarih: 15.11.2013.

Url-2 <*http://www.google.com.tr*>, alındığı tarih: 01.10.2013.

EKLER

EK A: Kök Seçimi birim hidrograf yöntemi

499’nolu fırtına için Kök Seçimi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1- akış polinomunun oluşturulması. 10 dakikalık gözlem akış hidrografı çizelge A.1’de verilmiştir. Buna göre akış polinomu denklem (A.1) gibi elde edilir:

Çizelge A.1 : 499’nolu fırtınaya ait 10 dakikalık akış hidrografı.

Zaman (dk.)	Akış (m^3/s)
0	0
10	0,0711
20	2,1183
30	2,4696
40	1,0909
50	0,2859
60	0,1314
70	0,1459
80	0,0914
90	0,0115

$$y(z^{-1}) = 0{,}0115z^{-9} + 0{,}0914z^{-8} + 0{,}1459z^{-7} + 0{,}1314z^{-6} + 0{,}2859z^{-5} + 1{,}0909z^{-4} + 2{,}4696z^{-3} + 2{,}1183z^{-2} + 0{,}0711z^{-1} \quad \textbf{(A.1)}$$

Bu polinomun kompleks kökleri çizelge A.2’de gösterilmiştir.

Çizelge A.2 : 499’nolu fırtınanın kompleks kökleri.

Kök numarası	Gerçel kısım	Sanal kısım	Yarıçap	Durum
1	-0,1635	0,0000	0,1635	Seçilmedi
2	+0,3604	+0,3603	0,509612	Seçildi
3	+0,3604	-0,3603	0,509612	Seçildi
4	-0,2524	+0,5051	0,564652	Seçildi
5	-0,2524	-0,5051	0,564652	Seçildi
6	-0,6242	+0,1676	0,646309	Seçildi
7	-0,6242	-0,1676	0,646309	Seçildi
8	-28,5972	0,0000	28,5972	Seçilmedi

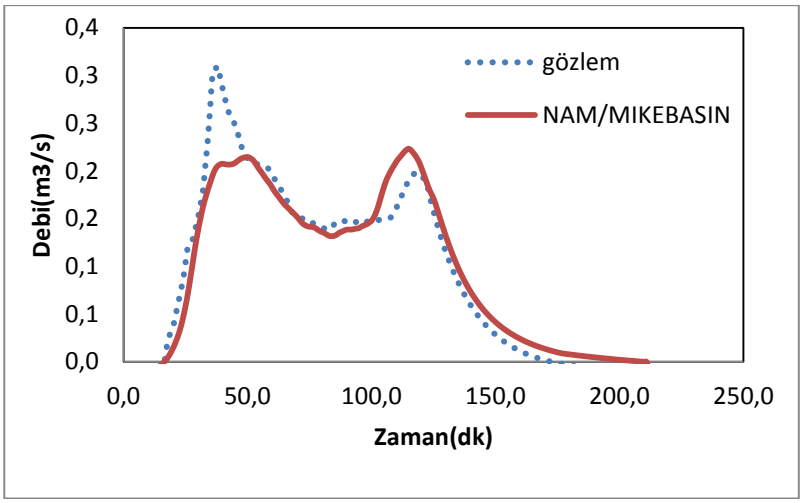
Seçilen köklerle birim hidrograf ordinatları elde edilir. İlgili hesaplamalar çizelge A.3’te sunulmuştur:

Çizelge A.3 : 499'nolu fırtınadan elde edilen birim hidrograf.

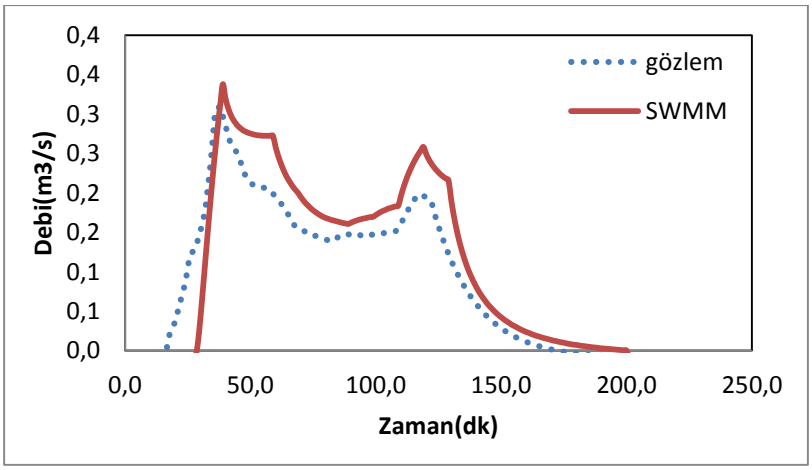
Ordinat no.(1)	BH ordinatları (2)	Düzeltilmiş BH (3)
1	1	0,721
2	1,0324	0,745
3	0,3627	0,262
4	0,0791	0,057
5	0,0492	0,035
6	0,0621	0,045
7	0,0346	0,025

(k_1=1,386 ve (3)=(2)/1,386)

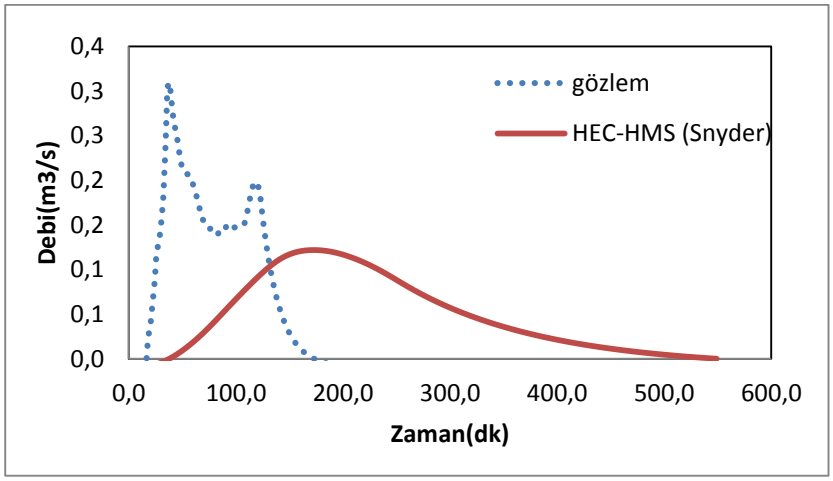
EK B: kullanılan modellerin sonuçları



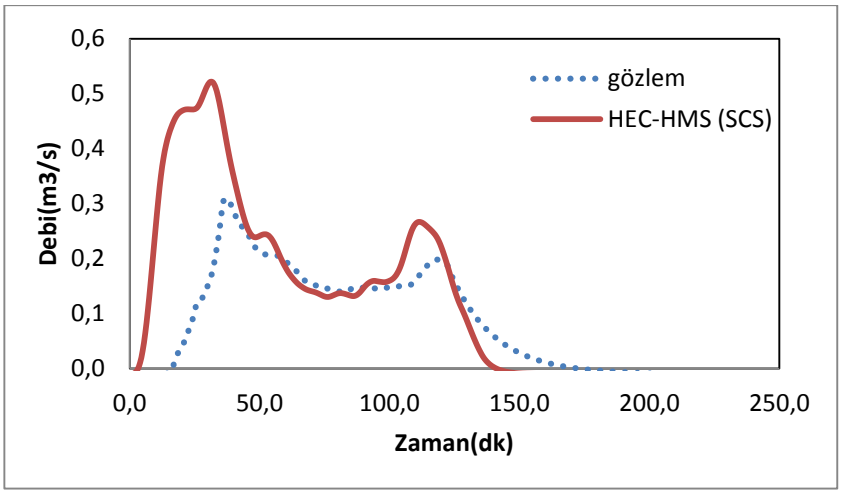
Şekil A.1 : 104'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı.



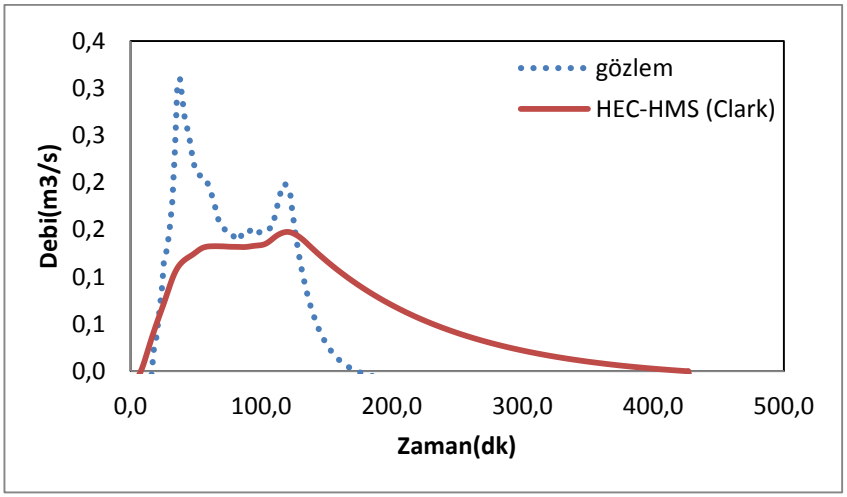
Şekil A.2 : 104'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı.



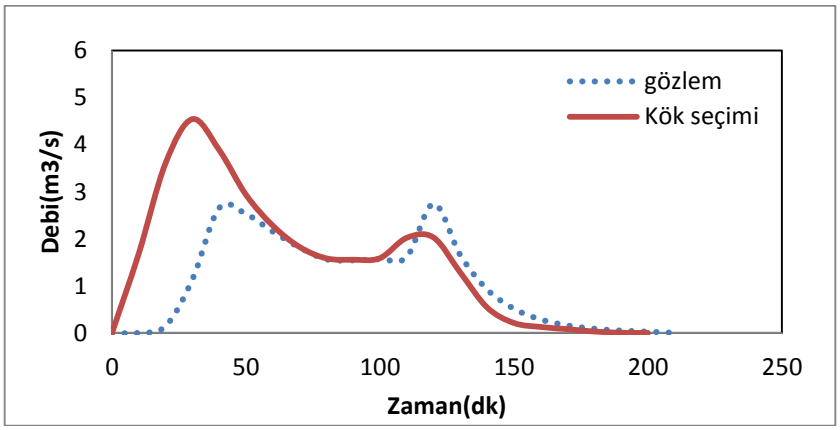
Şekil A.3 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder metodu) modeli ile elde edilen hidrografı.



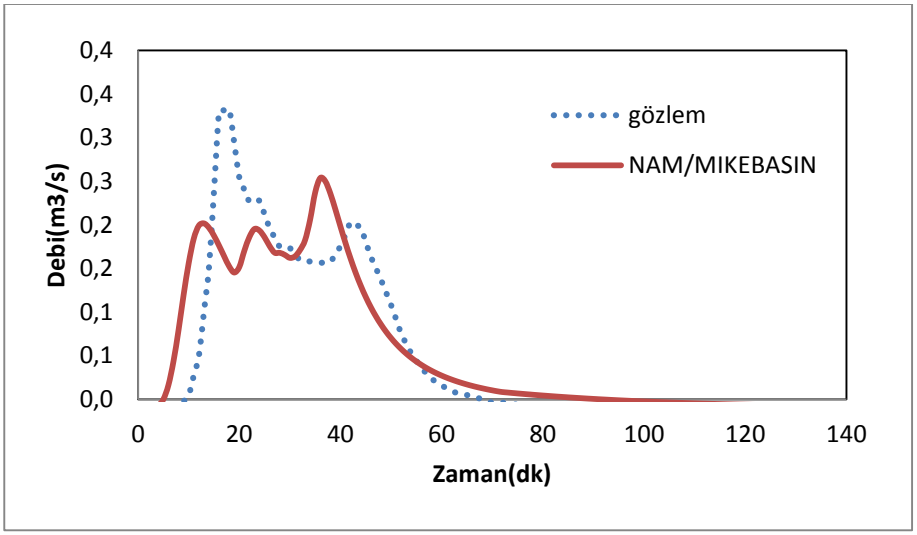
Şekil A.4 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS metodu) modeli ile elde edilen hidrografı.



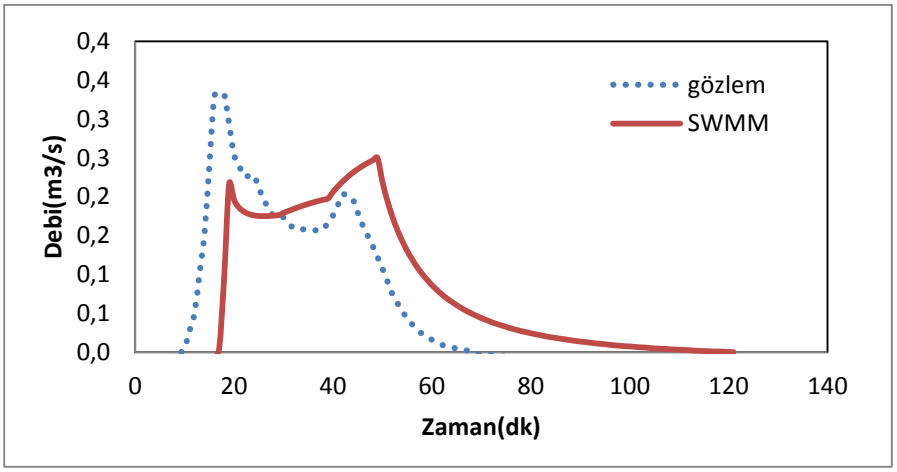
Şekil A.5 : 104'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark metodu) modeli ile elde edilen hidrografı.



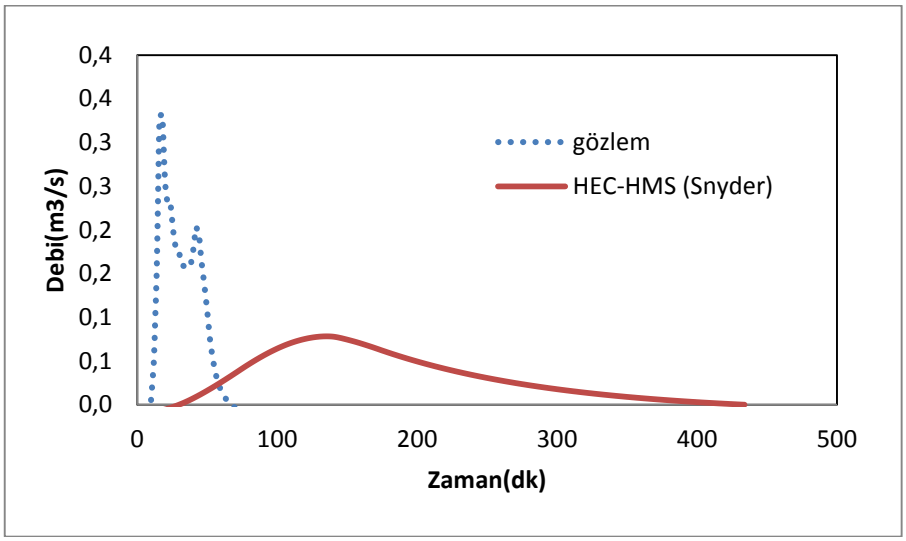
Şekil A.6 : 104'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı.



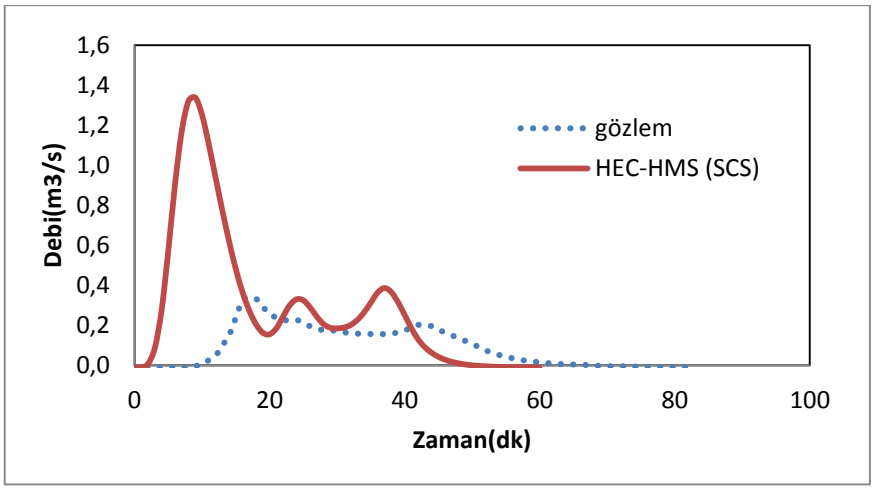
Şekil A.7 : 116'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı.



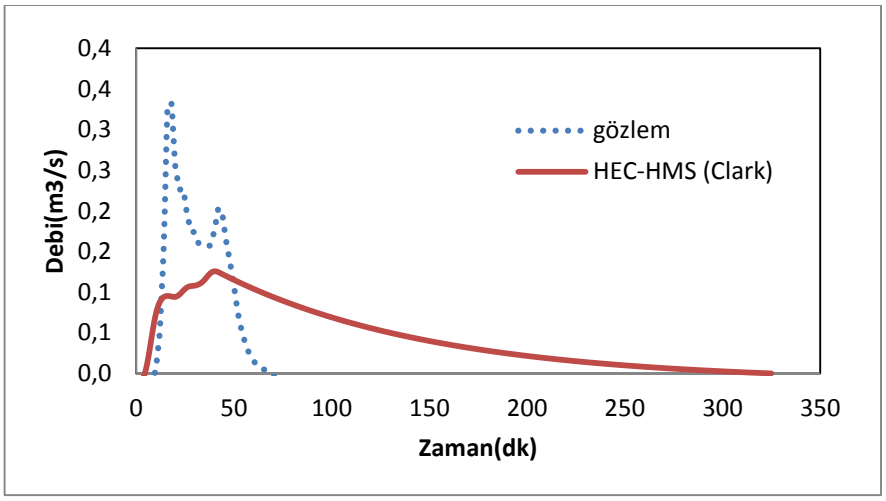
Şekil A.8 : 116'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı.



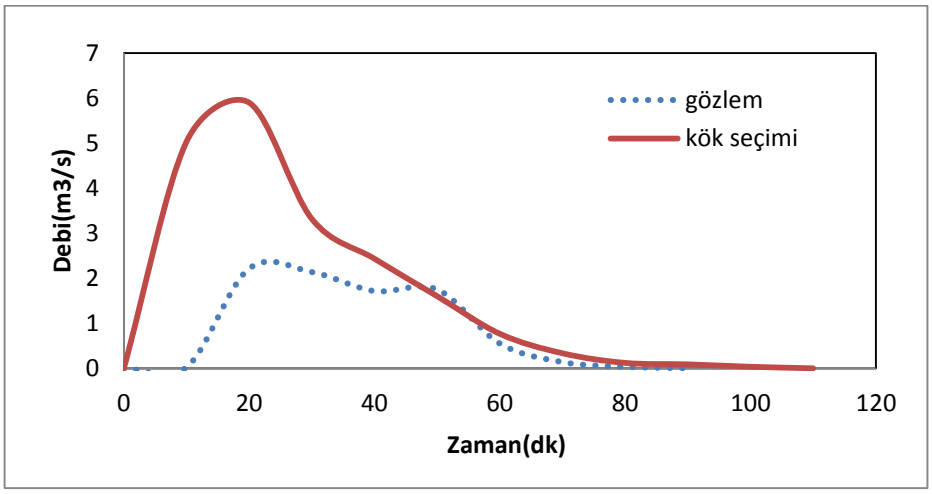
Şekil A.9 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı.



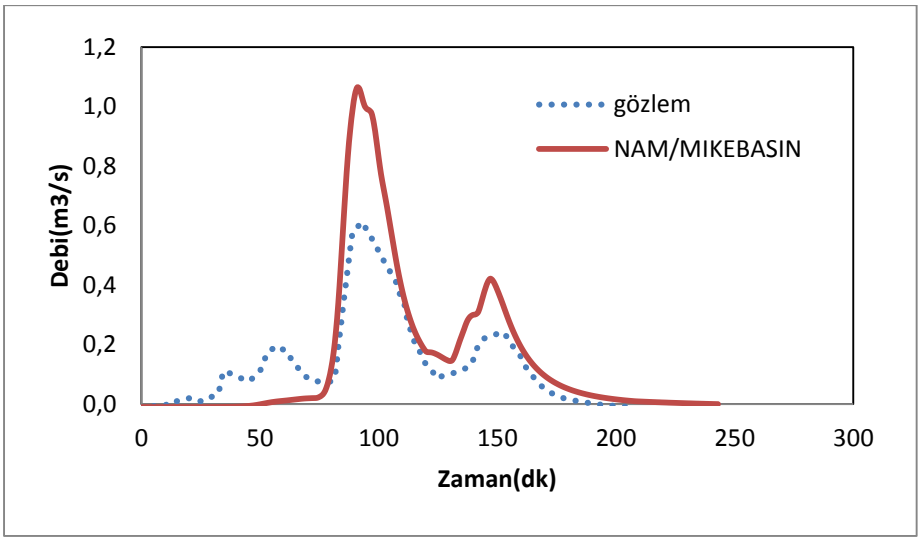
Şekil A.10 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı.



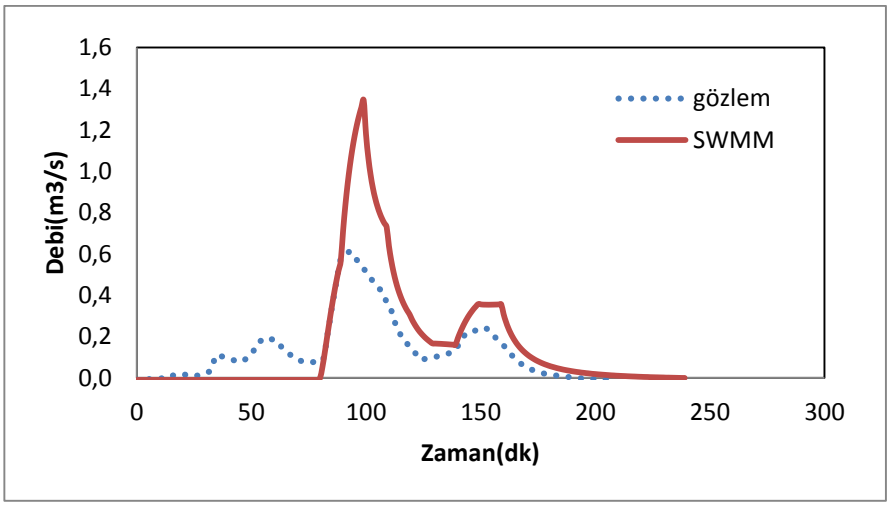
Şekil A.11 : 116'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı.



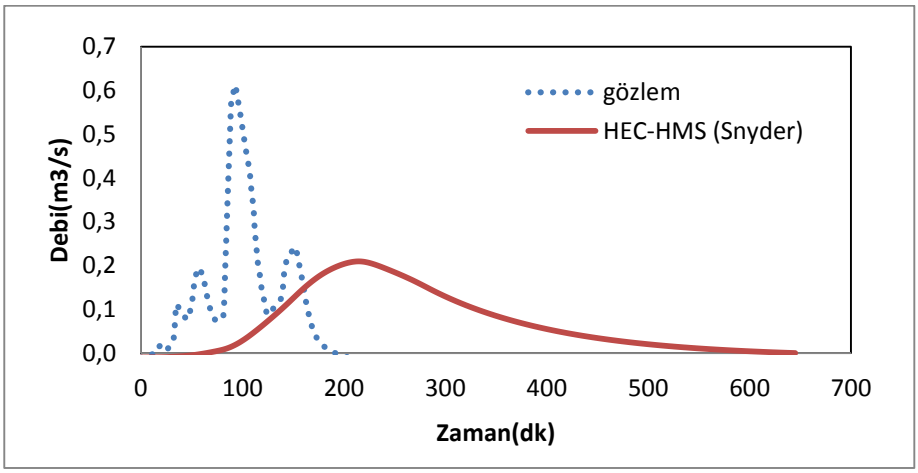
Şekil A.12 : 116'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı.



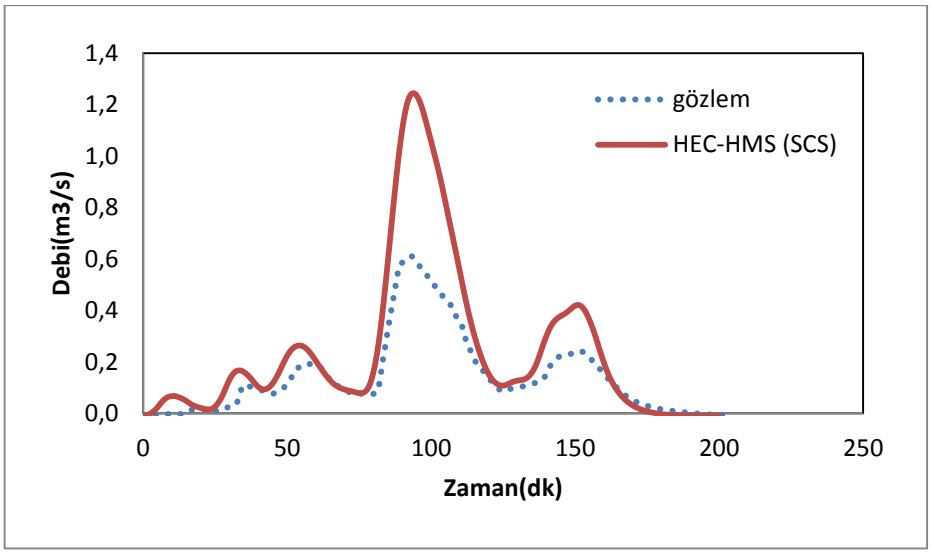
Şekil A.13 : 290'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı.



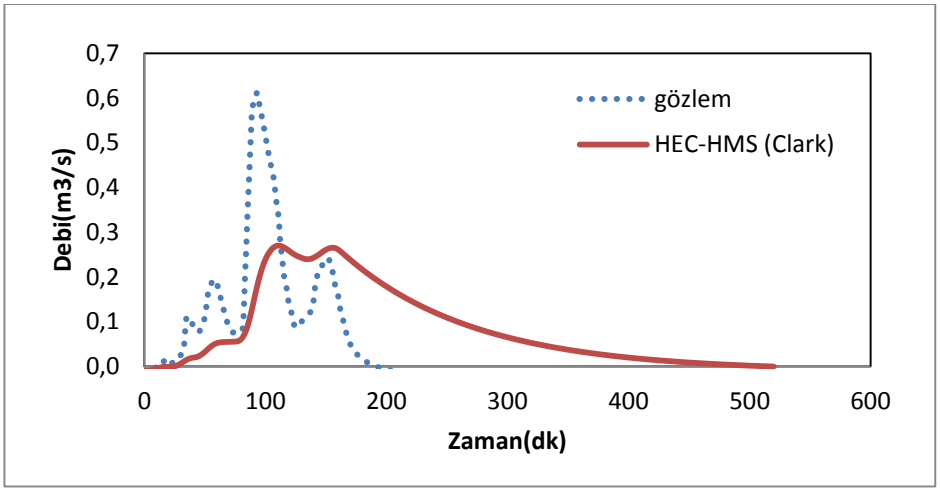
Şekil A.14 : 290'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı.



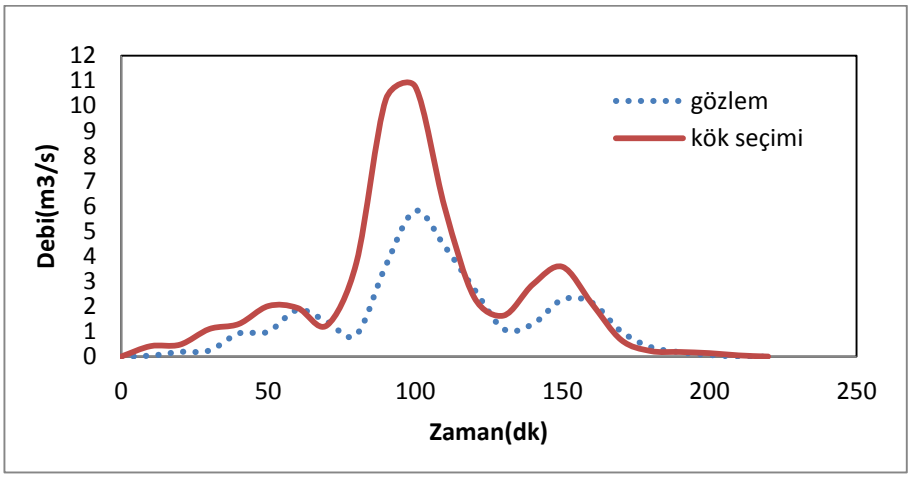
Şekil A.15 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı.



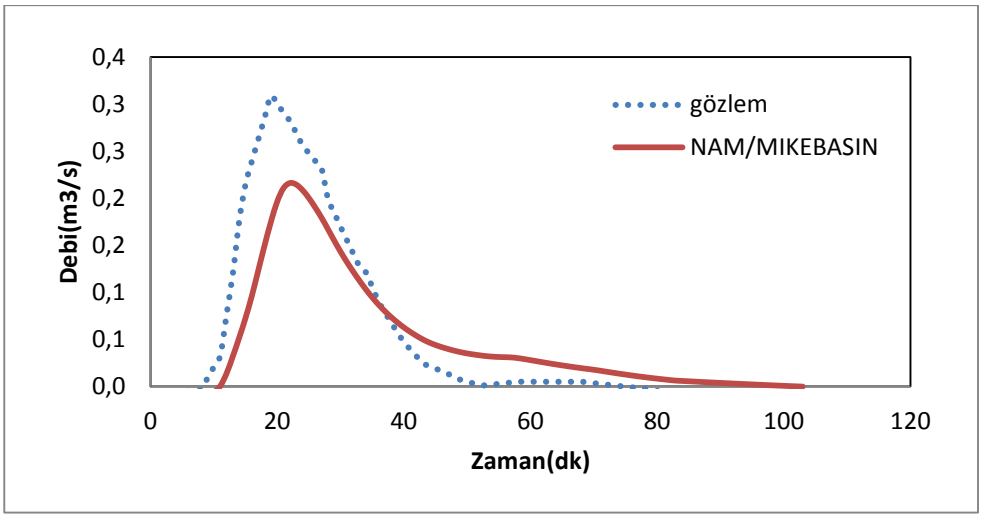
Şekil A.16 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı.



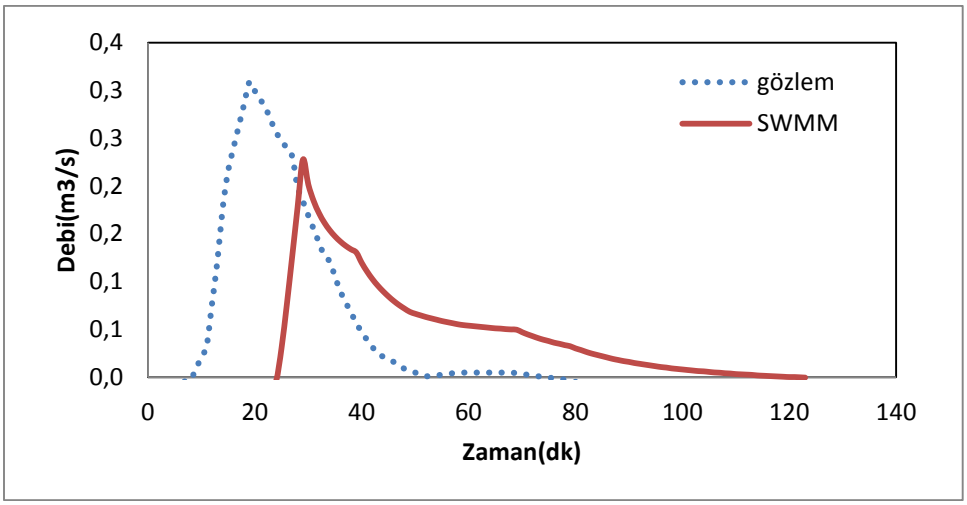
Şekil A.17 : 290'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı.



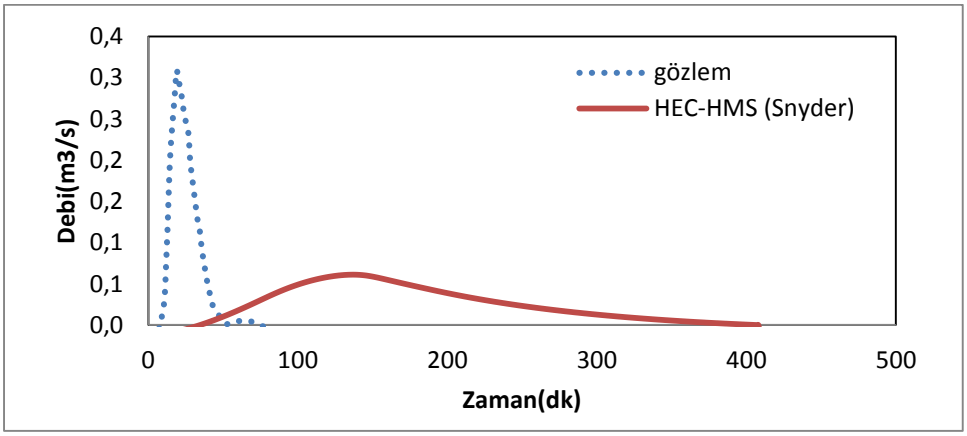
Şekil A.18 : 290'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı.



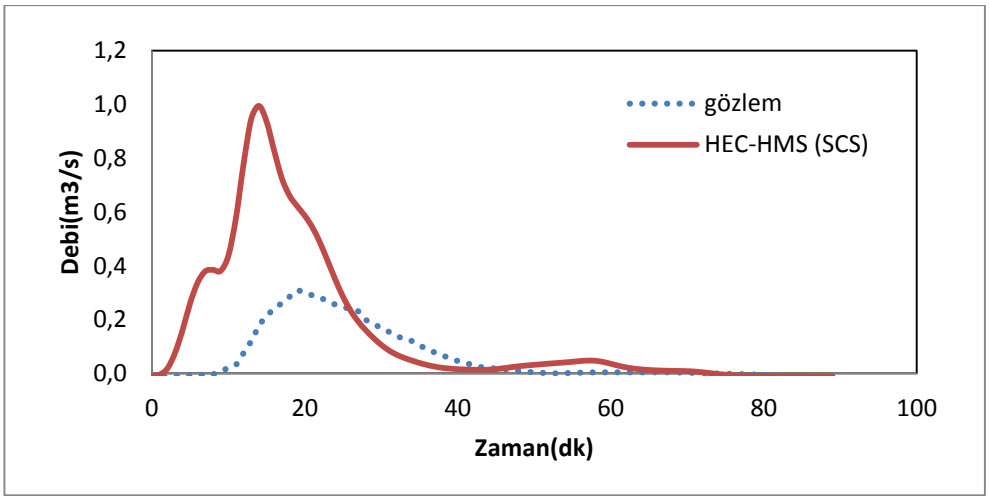
Şekil A.19 : 499'nolu fırtınanın NAM/MIKE BASIN modeli ile elde edilen hidrografı.



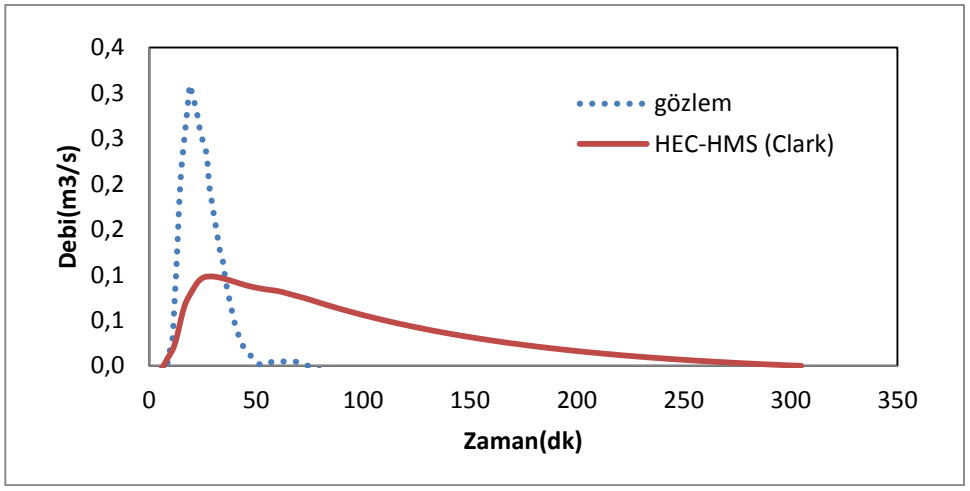
Şekil A.20 : 499'nolu fırtınanın SWMM modeli ile elde edilen hidrografı.



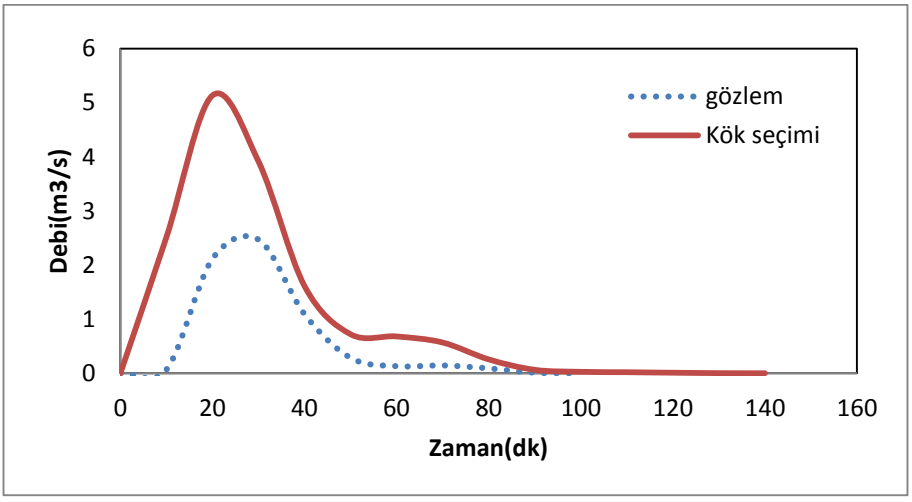
Şekil A.21 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (Snyder) modeli ile elde edilen hidrografı.



Şekil A.22 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (SCS) modeli ile elde edilen hidrografı.



Şekil A.23 : 499'nolu fırtınanın HEC-HMS (Clark) modeli ile elde edilen hidrografı.



Şekil A.24 : 499'nolu fırtınanın Kök Seçimi yöntemi ile elde edilen 10 dakikalık hidrografı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mustafa NURI BALOV

Doğum Yeri ve Tarihi: Tebriz-1983

E-Posta: mustafanuribalov@gmail.com

Lisans: Su mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Teknik ofisi mühendisi, Ağ çay sulama kurutma şebekesi projesi (Cihad i Nasr Azerbaycan), Batı Azerbaycan, İRAN, 2008-2009

Teknik ofisi mühendisi, Qomrud tünel ve barajlar projesi (Peymab), Lorestan, İRAN, 2009-2011

Teknik ofisi şefi, Haraz karayolu tünel ve köprü projesi (Peymab), Amol, İRAN, 2011.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Nuri Balov M., and Altunkaynak A., 2014: Performance Evaluation of HEC-HMS, SWMM and NAM/MIKE BASIN Models for Estimating Runoff Hydrograph. Journal of Hydrological Engineering.
- Nuri Balov M., and Altunkaynak A., 2014 Comparison of different unit hydrograph approaches for estimation of runoff hydrograph using HEC-HMS model. ACE 2014, Istanbul, Turkey.