

Havza modelleme: Namnam Havzası'nın sınırlarının belirlenmesi ve karakterizasyonunda BASINS uygulaması

Mansoor Ahmed BALOCH*, Ayşegül TANIK

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Hidrolojik Simülasyon Programı-FORTRAN (HSPF) gibi karmaşık modeller, veri analizi ve kuramsal çatıyı biraraya getiren, ileri düzeyde model kalibrasyonuna yönelik araçların kullanımını gerektirmektedir. Noktasal ve yayılı kirletici kaynakların değerlendirilmesi amaçlı kullanılan ve ABD Çevre Koruma Kurumu (USEPA) tarafından geliştirilmiş olan BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources) yazılımı çok işlevli havza analizi ve modelleme aracıdır. BASINS, modeller ile verileri birlikte kullanarak su kalitesi ve havza çalışmalarına destek sağlayabilmektedir. HSPF, BASINS sisteminin çekirdeğini oluşturan modellerden biridir. Bu çalışmada, BASINS aracılığı ile Namnam Havzası'nın sınırları belirlenmiş, karakterizasyonu yapılmış ve HSPF uygulaması için model girdileri oluşturulmuştur. Bu çalışma ile BASINS ilk kez Türkiye koşullarında uygulanmıştır. BASINS sayesinde HSPF için gerekli olan havza karakterizasyonu, veri ön işlemleri, model çıktıları ile ilgili son işlemler, ileri Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı görselleştirme araçları kullanılarak yapılabilmektedir. Çalışma sonunda, HSPF modelinin çalıştırılması için gerekli olan havza alansal verileri, akarsu ağı topolojisi, akarsuyu oluşturan kanalların enkesit geometrileri ve meteorolojik zaman serileri girdi verisi grupları oluşturulmuştur. Sonuç olarak, BASINS yazılımının veri ön işleme, havza sınırlarının belirlenmesi ve havzanın karakterizasyonu, model yapılandırılması amaçlı ön işlemler ve havzanın fiziksel özelliklerinin görselleştirilmesi için güçlü bir araç olduğu belirlenmiş ve ABD'nin dışındaki havza verileri ile olabilecek uyumsuzlukların uygun bir çalışma sistemi seçilerek önemli ölçüde ortadan kaldırabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BASINS, Havza modelleme, HSPF, Havza sınırlarının belirlenmesi, Havza karakterizasyonu, Namnam Havzası.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mansoor Ahmed BALOCH. mansoorbaloch@gmail.com; Tel: (212) 285 68 84.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) Model as a decision support tool for a developing country- A case study from Turkey" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 01.06.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 18.06.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Watershed modeling: Application of BASINS for the delineation and characterization of Namnam watershed

Extended abstract

Calibrated-parameter models are usually constructed from conceptual components and have a number of parameters that can be evaluated based on a trial and correction based fitting of simulated results to observed data. When a calibrated parameter model has a large number of parameters that need calibration, when the connection of these parameter values to physical processes is not straightforward, and when parameters are strongly interrelated, successful completion of a calibration exercise is a real challenge. Hydrological Simulation Program FORTRAN (HSPF) model is one of the such models classified as a conceptual model. It requires topographic, soil, land use, vegetation and other watershed data to evaluate its parameters besides model forcing data. An integrated system that brings together different forms of environmental data analysis and modeling tools is a fundamental instrument for calibration of such a complex model. Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources (BASINS) is an example of multi-functional watershed analysis and modeling system developed by USEPA that combines data with the modeling tools (HSPF, SWAT, PLOAD and AQUATOX) for watershed and water quality based studies. It integrates data acquisition, data preparation, watershed characterization, application of models, interpretation of model results, and development of maps and tables for integrated analysis of watershed based assessments of point and non-point sources of pollutants using advanced model pre-processing and post-processing tools and Geographic Information Systems (GIS). HSPF is the core watershed model integrated with BASINS. Application of HSPF using BASINS facilitates the utilization of its powerful watershed characterization, data pre-processing, post-processing capabilities and enhanced GIS visualization tools for creation of HSPF input files. The latest version BASINS 4.0 toolkit is built on the open source Map Window GIS platform making it the most comprehensive watershed modeling and analysis system available for free download.

The application of BASINS as a watershed analysis and water quality modeling system in USA has been widely cited in the literature. However, because of the intrinsic design and setup of data download tool for watersheds in USA, BASINS has not been applied in countries outside US. This paper describes the detailed

stepwise application of BASINS toolkit for the delineation and characterization of Namnam watershed and preparation of HSPF input files for subsequent model application. This study is the first application of BASINS in Turkey. BASINS was used to define the drainage area boundaries and stream network was extracted using DEM. Major land use/land cover segments were defined. Watershed segmentation into sub watersheds was carried out. Other physically-based attributes were calculated for watershed segments. HSPF model within the BASINS models was selected for application. The sub basins, streams and land use GIS layers were created. Weather data file was created using WDMUtil in BASINS. Project file was created using WDMUtil containing flow data for Namnam gauge station for calibration and validation purposes from October 1990 to September 1999. BASINS creates the input parameters for HSPF in English units; therefore, the meteorologic data and flow data were converted into English units using the unit conversion features of WDMUtil. HSPF input files were created after initiating HSPF within BASINS; Watershed File (.WSD), Reach File (*.RCH), Channel Geometry File (*.PTF), Point Sources File (*.PSR) and Meteorologic data (*.WDM).*

It is believed that the determination of physical characteristics of the individual reach segments, watershed segments and land cover types will improve the parameterization of HSPF model for calibration and validation. Despite the fact that the data download tool of the BASINS is only available for USA watersheds, the application of BASINS for pre-processing of HSPF model setup for Koycegiz watershed enhanced the process of setting up the model network as compared to without its application for this purpose. The model setup created using BASINS is physically more representative of the watershed due to advanced GIS capabilities of the program. BASINS provides broader room for experimentation with watershed model network for optimizing the number of sub watersheds and reaches for simplified modeling setup. It is concluded that BASINS provides a strong toolkit for data preprocessing, watershed delineation, watershed characterization, model setup pre processing and visual representation of physical features of watershed once data compatibility issues are eliminated for watersheds outside USA.

Keywords: *BASINS, watershed modeling, HSPF, watershed delineation, watershed characterization, Namnam watershed.*

Giriş

Modeller, kavramsal olarak parametreleri ölçülebilen ve parametreleri kalibre edilebilen olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Parametreleri ölçülebilen modeller, havzadaki süreçler ve bunların fiziksel anlamları ile kurulup, bilinen havza özelliklerinden hareket ederek tahmin edilebilen parametreleri kullanmaktadır. Ancak, model uygulamasının kapsamı ve ölçeği arttıkça, model karmaşıklığı da artabilmekte ve buna bağlı olarak gereken parametre sayısı da artmaktadır. Belirsizlik parametrelerinin çoğalması, fiziksel bazlı modellerin havza ölçeğinde uygulanmasını kısıtlamaktadır. Böylece, havza ölçeğinde parametreleri ölçülebilen modellerin uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Al-Abed ve Whiteley, 2002). Parametreleri kalibre edilen modeller ise, fiziksel süreçleri tüm ayrıntıları ile ele alan özgün denklemler yerine, süreçleri genel hatları ile temsil eden denklemleri kullanmaktadır. Bu denklemlerin bünyesindeki ampirik katsayılar deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Çok sayıda model parametresinin olduğu, bu parametrelerin sayısal büyüklüklerinin fiziksel süreçlere olan etkilerinin doğrudan anlaşılmadığı ve de parametrelerin birbirlerinin büyüklüklerini etkiledikleri durumlarda, model kalibrasyonunun başarılı bir şekilde tamamlanması zorlaşmaktadır (Hayashi vd., 2004).

Hidrolojik Simülasyon Programı-FORTRAN (HSPF) kavramsal bir model olup karmaşık yapıdadır. Model parametrelerinin değerlendirilmesinin yanı sıra modelde itici dış güçlerle ilgili verilere ve havzanın fiziksel özelliklerini karakterize eden topografya, zemin özellikleri, arazi kullanımı gibi diğer alansal verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Değişik amaçlı çevre verisi analizlerini biraraya getirebilen bütünleşik sistemler, bunun gibi karmaşık yapıdaki modellerin kalibrasyonunda kullanılan temel araçlardır. BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources) ABD Çevre Koruma Kurumu (USEPA) tarafından geliştirilmiş, çok işlevli havza analizi ve modellemesi yapabilen bir yazılımdır. Havza ve su kalitesi çalışmalarında HSPF, Toprak ve Su Analiz Aracı (SWAT), Kirlilik Yüğü (PLOAD) ve AQUATOX gibi modellerle de veri alışverişin-

de bulunabilmektedir. Böylece, bu tip entegrasyonla değişik çevresel verilerin de analizi mümkündür. BASINS veri toplama, veri hazırlama, havza karakterizasyonu, model uygulamaları, model çıktılarının yorumlanması, ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımı ile sonuçların görselleştirilmesi, haritalandırılması ve tabloların oluşturulması süreçlerini bütünleştirmektedir.

HSPF, BASINS sisteminin çekirdeğini oluşturan modellerden biridir. BASINS sayesinde HSPF için gerekli olan havza karakterizasyonu, veri ön işlemleri ve model çıktıları ile ilgili son işlemler ileri CBS tabanlı görselleştirme araçları kullanılarak yapılabilmektedir. Bu makalede, BASINS ile çalışma alanı olarak seçilen Namnam Havzası'nın sınırları belirlenmiş, karakterizasyonu yapılmış ve HSPF uygulaması için model girdileri oluşturulmuştur. Havza ve alt havza sınırlarının belirlenmesi aşamasında yapılan işlemler, yüzeysel akış-akarsu ağının belirlenmesi, havza dış sınırlarının belirlenmesi ve elde edilen havza bütününe alt havzalara bölünmesidir (Tong ve Chen, 2002). Bu aşamayı takiben yapılan havza karakterizasyonu ile sistemin ana bileşenlerinin özellikleri saptanarak model kalibrasyonuna destek sağlanmaktadır. Havza verilerinin analizinde, MapWindow arayüzünün sağladığı ileri CBS olanakları kullanılmıştır. Havza sınırlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu ile uygulanan modelin çatısı kurulmuştur. Bu çalışma ile BASINS Türkiye'de ilk kez uygulanmıştır.

BASINS'in özellikleri

BASINS 4.0 güncel sürümü, açık kaynak kodlu MapWindow CBS platformu üzerinde yapılandırılmıştır. Bu sürüm internetten ücretsiz olarak temin edilebilmektedir. BASINS, WinHSPF, PLOAD ve AQUATOX modelleri ile WDMUtil ve GenScn yardımcı araçlarını içermektedir.

- WinHSPF, HSPF modelinin Windows™ işletim sistemi altında çalışan grafiksel kullanıcı arayüzlü sürümüdür.
- WDMUtil, alansal havza verileri ile meteorolojik ve diğer zaman serisi verilerini içeren HSPF model girdilerini oluşturup yönetilmesini sağlamaktadır.

- GenScn, HSPF model çıktıları ile çalışan bir sonuçlandırıcı ve senaryo analizi aracıdır.
- PLOAD, yayılı kirletici yüklerin hesaplanmasını sağlayan CBS destekli bir elektronik tablolar aracıdır.
- AQUATOX, kapsamlı bir su ekosistemi modelidir.

Ayrıca, Windows tabanlı bir iklim analiz-değerlendirme aracı WinHSPF ile program arayüzü üzerinden bütünleştirilmiştir (USEPA, 2007). BASINS içinde çalışan bir veri indirme aracı ile; ABD'deki havzalar ile ilgili sürekli güncellenen veriler, BASINS web sitesinden yüklenebilmektedir. Bu veritabanları kullanılarak, havza analizi ve modellemesi işlemleri kolaylaştırılabilmektedir. Bu veritabanları, standart bir paylaşım ve yayınlanma protokolu (örneğin veri yapıları ve dosya biçimleri) ile organize edilmiştir. Bu protokolda elde edilen ve derlenen veriler değişik kurumlardan temin edilebilmektedir. ABD Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS), ABD Çevre Koruma Kurumu (USEPA), ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA) bu kurumlar arasındadır. Kullanılacak veriler çevresel analiz, ulusal elde edilebilirlik, ölçek ve çözünürlük açısından uygunluğa göre seçilmektedir.

ABD'de havza verileri her biri kendi kodu (HUC-Hydrologic Unit Code) olan hidrolojik birimlere bölünmüştür ve bunların her biri kolaylıkla internette indirilebilmektedir. Bu kodlar, her hidrolojik birime özel olup, iki ile sekiz rakamdan oluşabilmekte ve hidrolojik birimlendirme sisteminde dört seviyeli bir sınıflandırmaya dayanmaktadır. ABD toprakları dört seviyede belirlenen oldukça küçük hidrolojik birimlere ayrılmıştır. Bunlar; ortamın hidrolojik özelliklerine bağlı olarak bölgeler, alt bölgeler, hesaplama birimleri ve kataloglama birimleri olarak sınıflandırılmıştır. Hidrolojik birimler kendi aralarında küçükten (kataloglama birimleri) büyüğe (bölgeler) doğru organize edilmiştir. Diğer bir deyişle, HUC bir havzanın en küçük birimidir. ABD topraklarının tümü 2264 hidrolojik birime bölünmüştür (Seaber vd., 1987). BASINS idari sınırların, hidrolojik sınırların ve ana ulaşım ağının da içerildiği kartografik veri-

lere dayanmaktadır. Bu veriler, Sayısal Arazi Modeli (SAM), zemin yapısına ilişkin veriler, arazi kullanımının dağılımı ve akarsu hidrografisi verilerini de içermektedir. Zemin ve arazi kullanım sınıflandırması verileri, CBS yazılımının kullanılmasına elverişli olacak şekilde derlenmektedir. BASINS çeşitli çevresel veri ürünlerini de bünyesinde barındırmaktadır. Bunlar arasında iklim ve hava bölgeleri, akım rasat istasyonları, su kalitesi izleme istasyonları, meteorolojik istasyonlar, sediment izleme istasyonları ve yaban hayatı sayılabilmektedir. Bu veritabanları; su kalitesi değerlendirilmesi, su ortamlarının ve havzaların önceliklerinin belirlenmesi ve hedeflerin konulmasına yardımcı olmak üzere konumsal katmanlar halindedir. BASINS aynı zamanda noktasal kaynaklı deşarjlar ile ilgili kirletici yükler hakkında da bilgi içerebilmektedir. Açık kaynak kodlu CBS yazılımı olan MapWindow, BASINS ile kullanılarak havza karakterizasyonu için entegre bir platform yaratmaktadır. Bu arayüz, havzanın yersel özelliklerini de içerecek şekilde veri kaynaklarının görselleştirilmesini ve entegrasyonunu sağlamaktadır. Bu yazılım, diğer lisanslı CBS yazılımlarına standart CBS verisi aktarılabilir ve paylaşılabilir (shape dosyası, dbf, ve GeoTiff) özelliğine sahiptir. BASINS arayüzündeki CBS fonksiyonları, modelleme sistemine eklenti halindeki değişik modüllerle sağlanmaktadır. 'CBS Araçları' eklentisi, bateslem ve vektör tabanlı görüntü analizi işlevlerini barındırmaktadır. 'Havza Sınırlarını Belirleme' eklentisi, BASINS dahilindeki değişik modelleme araçlarının ihtiyaç duydukları havza karakteristikleri verilerini sağlamak için kullanılmaktadır. CBS'de kullanılan shape dosyaları ise, "Shapefile Editor" eklentisi ile oluşturulabilmektedir. Arayüz verilerin harita ve katman olarak ileri düzeyde düzenlenebilmeleri işlevselliğini sağlamaktadır.

ABD Çevre Koruma Kurumu (USEPA) tarafından geliştirilmiş olan BASINS, su kirliliğini azaltma hedeflerine ulaşabilmek için kullanılan toplam günlük azami yükleri (TMDL) belirlemek amaçlı bir sistemdir. BASINS'in, diğer modelleme yazılımları olan HSPF, SWAT ve PLOAD ile entegrasyonu için, içerdiği ileri sonuçlandırıcı ve sonuçlandırıcı araçları-

nın kapasitelerinin kullanımı gerekmektedir. BASINS'in ABD'deki havza analizi ve su kalite modellemesine yönelik birçok uygulamaya literatürde yer verilmiştir (Carrubba 2000; Bergman vd., 2002; Endreny vd., 2003; Elkaddah ve Carey, 2003; Im vd., 2004; Shirinian-Orlando ve Uchrin, 2007; Choi ve Deal, 2008). BASINS içindeki modelleme araçları tek başlarına çalışabilir olsalar da (Tzoraki ve Nikolaidis, 2007), yazılım tasarım ayrıntıları ve veri yükleme araçlarının özellikleri nedeniyle, ABD dışındaki havzalarda pek uygulama alanı bulamamışlardır. Yukarıda da tartışıldığı üzere, veri indirme aracı BASINS paketinden çıkan tek araç değildir. Veri manipülasyon araçları olan WDMUtil ve GenScn de uygun biçimlendirilmiş verileri işlemeye kullanılabilir. CBS becerilerinden, havzanın karakterize edilmesinde ve modellerin çalıştırılması için gerekli girdi verilerinin hazırlanmasında yararlanılabilmektedir.

Namnam Havzası'nda BASINS'in uygulanması

Şekil 1'de Namnam Havzası'nın içinde olduğu Köyceğiz Gölü Havzası'ndaki yeri gösterilmektedir. BASINS'in havzadaki uygulaması:

- Havza Sınırlarının Belirlenmesi
- Havzanın Karakterizasyonu

aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalarda BASINS'in içindeki MapWindow arayüzünün CBS becerileri kullanılmıştır.

Veri analizi

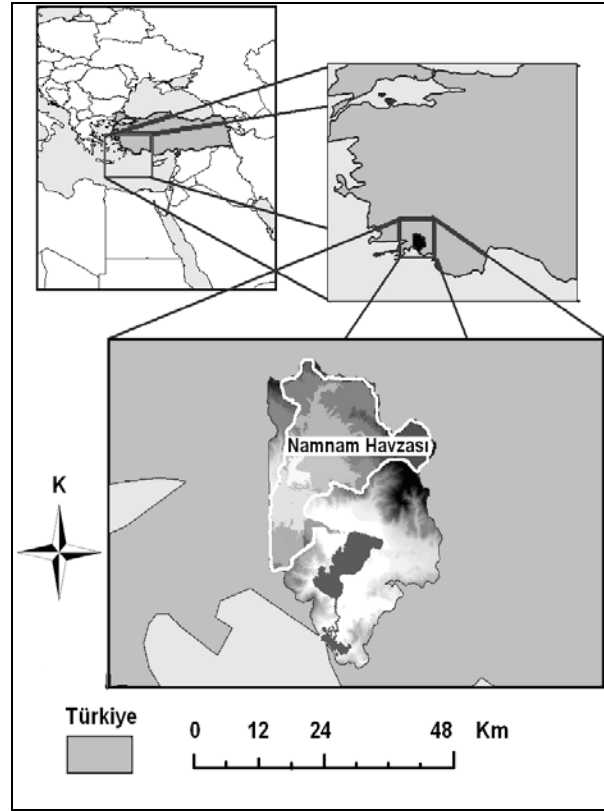
BASINS, havza sınırlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu ile ilgili araçlar;

- Sayısal Arazi Modeli Haritası (SAM)
- Arazi Kullanımı Haritası
- Zemin Özellikleri Haritası

üç ana girdi verisi setini kullanmaktadır.

BASINS'te kullanılacak topografik verilerin SAM ızgara (raster) biçiminde olmaları gerekmektedir. Izzgara verileri, dünyayı bir ızgara içine yanyana ve düzenli yerleştirilmiş hücreler olarak tanımlamaktadır. Bu hücreler tipik olarak kare biçiminde ve x- y yönlerinde sıralı olarak yerleştirilmiştir. SAM raster- ızgarasında her hücrenin bir yükselti özneliği bulunmaktadır (Bolstad, 2003). Sayısal topografik haritalar, TC

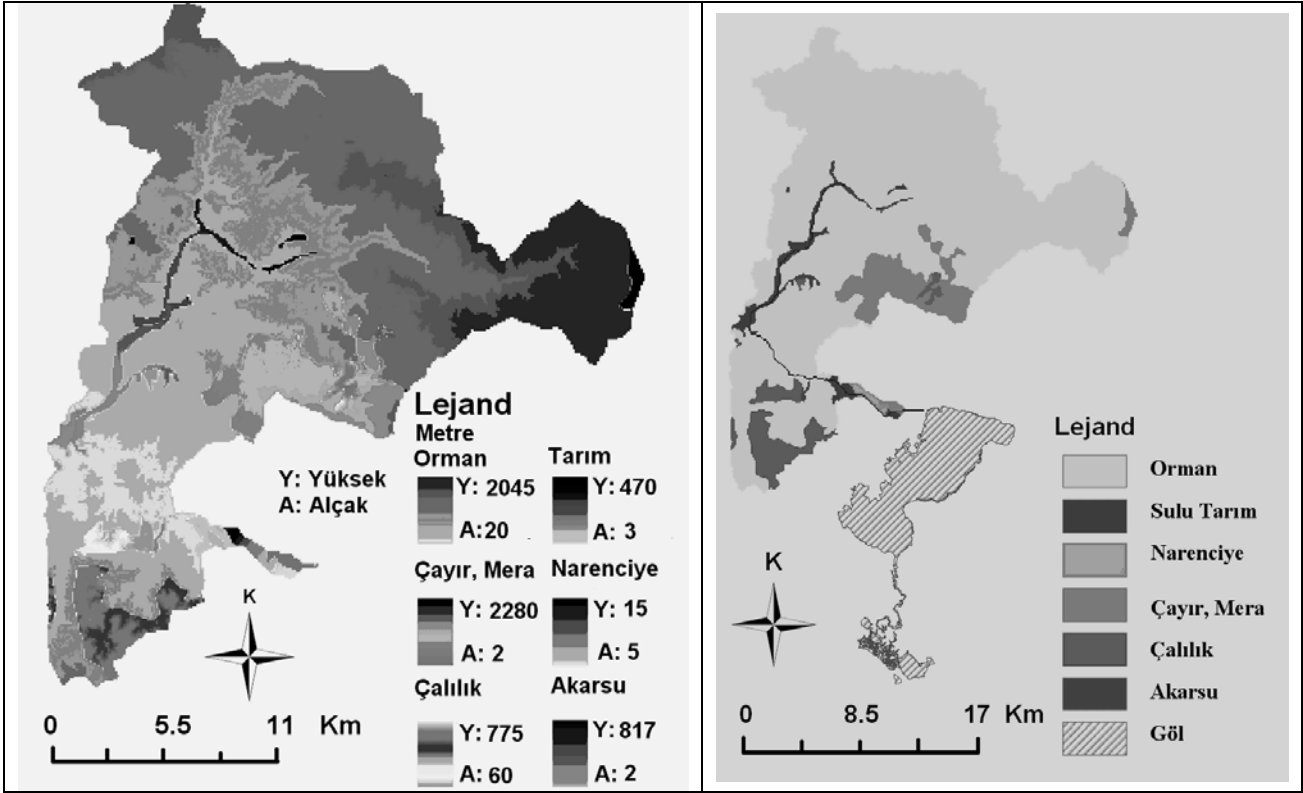
Harita Genel Komutanlığı'ndan 1:25000 ölçeğinde ve AutoCAD dwg biçiminde temin edilmiştir. Bu sayısal haritalar çalışma alanı için 30 x 30 m'lik SAM ızgarasına çevrilmiştir.



Şekil 1. Namnam Havzası'nın konumu

Namnam Havzası'nın arazi kullanım haritaları TC Tarım ve Köyişleri Bakanlığı bünyesindeki Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. BASINS'teki CBS uygulamaları için GIRAS (The Geographic Information Retrieval and Analysis System) ve NLCD (National Land Cover Data) arazi kullanımı/örtüsü sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Kullanıcı tanımlı arazi kullanımı sınıflandırmasının da kullanılması mümkündür, ancak bu durumda arazi verilerinin model ağı ile bütünleştirilmeleri için bazı ek aşamaların da tamamlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada model ağı oluşturulmasının kolaylaştırılması amacıyla, arazi kullanım haritası GIRAS arazi kullanımı/örtüsü sınıflandırmasına dayandırılmıştır. Şekil 2'de Namnam Havzası için geliştirilmiş olan SAM ve arazi kullanım haritası gösterilmektedir.



Şekil 2. Namnam Havzası'nın SAM ve arazi kullanımı/örtüsü haritaları

Zemin yapısı haritası, HSPF modelinin parametrelerinin belirlenmesinde ihtiyaç duyulan havza karakterizasyonu için gereklidir. Bu harita, hidrolojik zemin gruplarını içermelidir. Namnam Havzası için hidrolojik zemin grupları sınıflandırması elde edilememiştir. Bu nedenle, havza karakterizasyonu bu veriseti olmadan yapılmıştır.

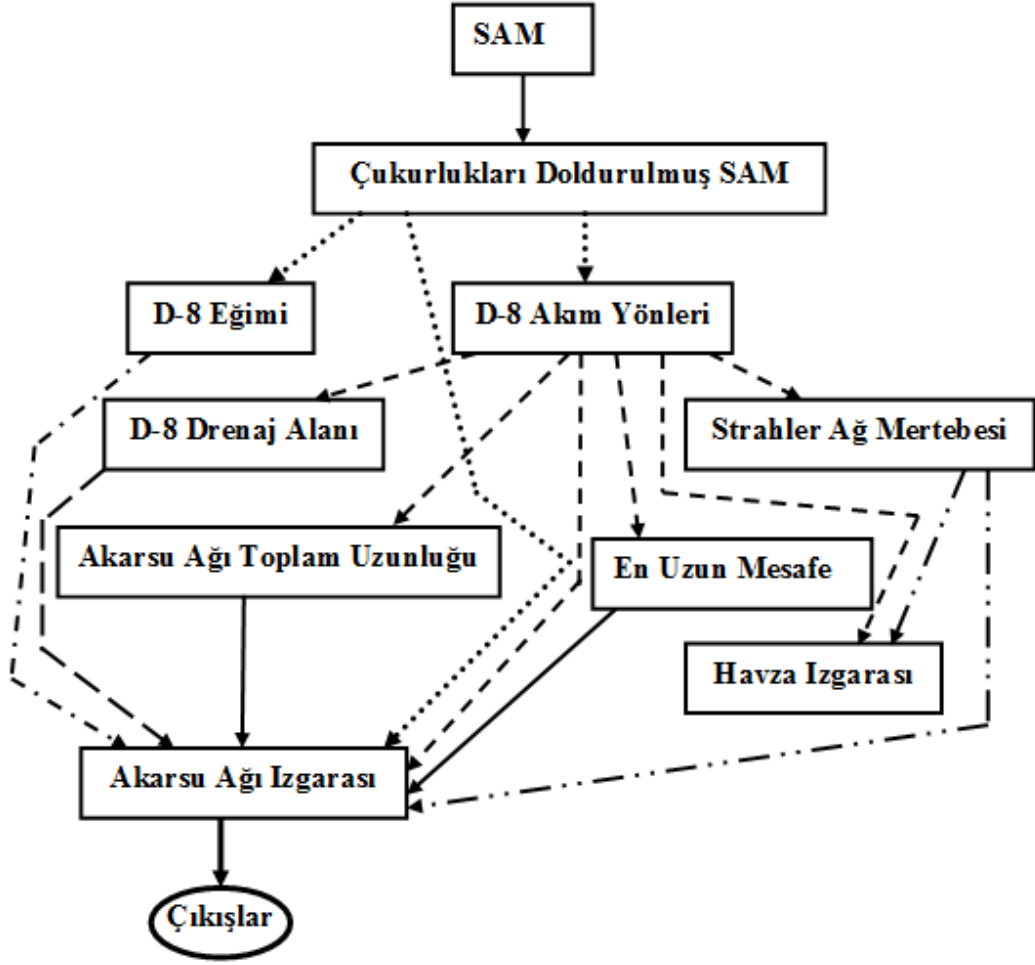
Havza sınırlarının belirlenmesinde kullanılan algoritma

Havza sınırlarının belirlenmesi işlemi, herhangi bir kontrol noktası veya çıkış noktası üzerinden yapılmaktadır. Bu noktaya drene olan alanın tümü havza sınırlarını oluşturmaktadır. Havza sınırlarının belirlenmesi, havza bileşenlerinin oluşturulması sürecinin bir adımıdır. Bu süreç, havzanın davranışının analiz edilebilmesi açısından önemlidir. Havzanın sınırlarının belirlenmesi, gerek karakterizasyon gerekse de HSPF modelleme verilerinin hazırlanması için gereklidir.

Namnam Havzası'nda havza sınırlarının belirlenmesi işlemi AWD (Automatic Watershed De-

lineation) kullanılarak yapılmıştır. AWD, Tarboton (1997) tarafından geliştirilmiş olan TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) algoritmasını kullanmaktadır. TauDEM, SAM tabanlı bir arazi analizi araçları grubudur ve algoritmanın ilgili süreçleri Şekil 3'te gösterilmektedir. TauDEM algoritmasının ana işlevleri ise aşağıda özetlenmiştir:

Çukurlukların doldurulması (pit filling)- Herhangi bir hidrolojik modelleme aracının yapması gereken ilk işlem, SAM'daki çukurluk veya kuyuların ortadan kaldırılmasıdır. Çukurluk veya kuyular, SAM'lardaki bölgesel olarak en düşük kotlu hücrelerdir. Komşu hücrelerin hepsinin kotları bunlardan daha yüksektir ve bu nedenle herhangi bir yöne doğru drene olamazlar. Eğer hücreler SAM ızgarasının kenarları yerine başka bölgelere drene olurlarsa birbirleri üzerine drene olma eğilimine girebilirler ve bu durumda süreç sonsuz bir döngüye girer. Bu çukurluk ve kuyulardaki hücrelerin kotları SAM'in kenarlarına doğru drene olabilecek kadar yükseltilecek bu sorun çözülebilir.



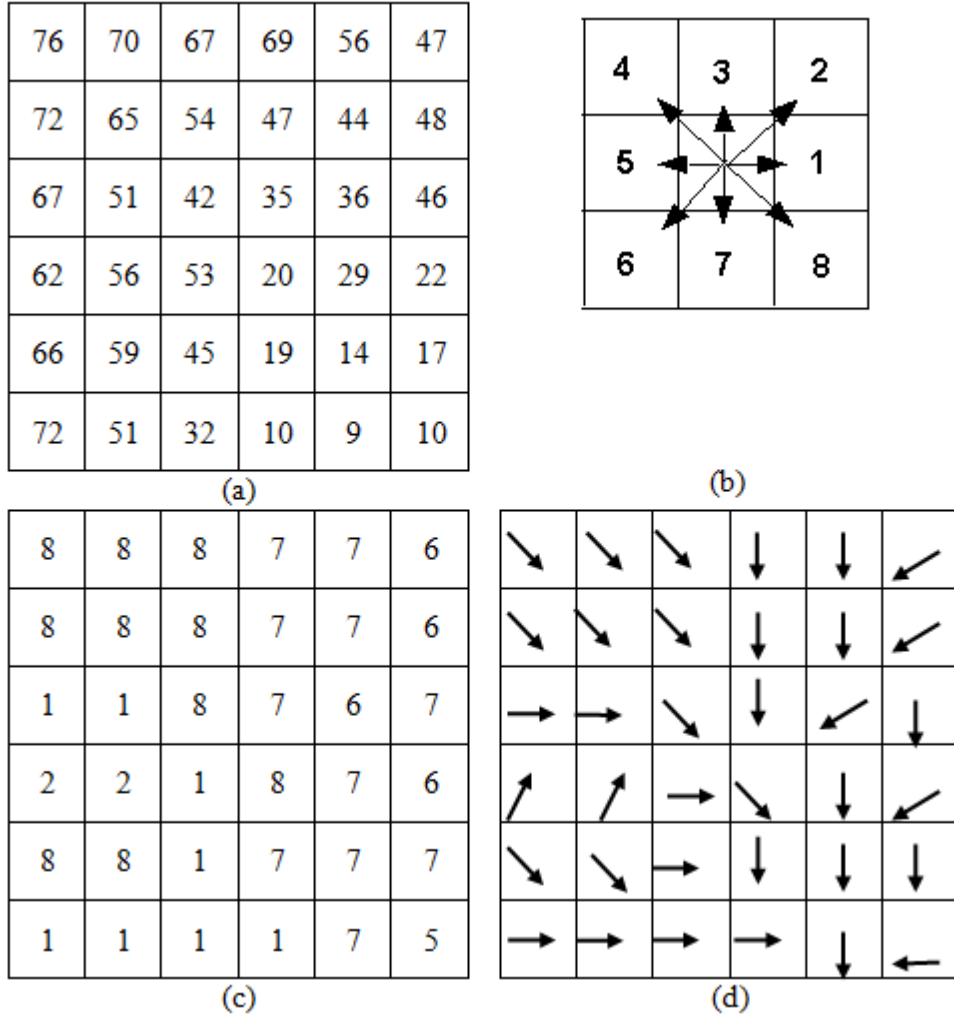
Şekil 3. TauDEM işlevleri

En yüksek eğimin belirlenmesi- Eğim, yüksekliğin mesafeye göre en hızlı azaldığı yönde ele alınmakta ve kot farkı/uzaklık olarak (eğim açısının tanjantı olarak) verilmektedir. SAM'ın kenarına komşu olan herhangi bir hücre için akım yönü “veri yok” olarak değerlendirilir.

Akış yönlerinin belirlenmesi- Izgaradaki her hücredeki akım yönü bir araya getirilerek arazi-deki drenaj yönleri belirlenir. O'Callaghan ve Mark (1984) tarafından geliştirilen D8 algoritması herhangi bir hücredeki akımın aralarında eğim en fazla olan düşük kottaki komşusuna doğru olduğunu kabul eden tek akım yönlü bir algoritmadır. Bu algoritmada kenardakiler dışındaki her hücrenin sekiz komşusu vardır ve bunlar 1- Doğu, 2- Kuzeydoğu, 3- Kuzey, 4- Kuzeybatı, 5- Batı, 6- Güneybatı, 7- Güney, 8- Güneydoğu olarak kodlanmıştır. Alternatif olarak kullanılabilen Dinf yaklaşımında

(Tarboton, 1997) ise, üçgen petekler dikkate alınarak en fazla eğim olan yönde akış olduğu kabul edilir. Akarsu ağının mevcut olduğu durumlarda ise, akım yönleri bir shape dosyası ile belirlenebilmektedir. Bu seçenek, mevcut akarsu ağı verilerinin havzanın SAM'ından elde edilebilecek akarsu ağından daha kaliteli olması durumunda tercih edilmelidir. Şekil 4a, örnek bir yükselti ızgarasını göstermektedir. Şekil 4b, yukarıda bahsedilen akım yönlerinin tümünü (1- Doğu, 2- Kuzeydoğu, 3- Kuzey, vb.), Şekil 4c ise Şekil 4a'da verilen örnek yükselti ızgarası için gerçek akım yönlerini göstermektedir. Şekil 4c'de sayılarla ifade edilen akım yönleri; Şekil 4d'de oklarla gösterilmiştir.

Akımı oluşturan drenaj alanının belirlenmesi- Akışı oluşturan drenaj alanındaki hücre sayısı özyinelemeli (iterasyon temelli) bir yöntem ile belirlenmektedir (Mark, 1988). Her hücrenin



Şekil 4. Akım yönlerinin D8 algoritması ile belirlenmesi (a) yükseklikler, (b) akım yönlerinin kodları, (c) yüksekliklere uygun akım yönleri, (d) akım yönlerinin oklarla sembolik olarak gösterilmesi

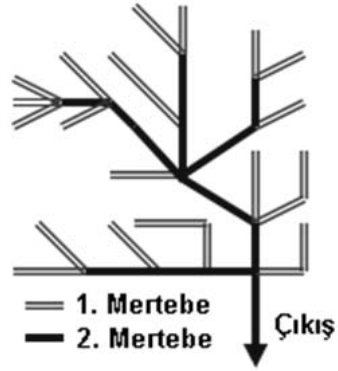
alana kendi katkısı bir olarak alınır ve toplam katkısı kendi katkısı ile membasında o hücreye drene olan hücrelerin katkıları ile toplanarak bulunur. Havzada kalibrasyon amacıyla bir çıkış noktası önceden belirlendiyse, drenaj alanı bu noktadan membaya doğru hesaplanır. Çıkış noktalarından başlayarak yapılan özyinelemeli değerlendirme, ızgaradaki tüm noktalar yerine sadece çıkış noktası için yapılır. Akım yönleri ızgarası kullanılarak; her hücre için, bu hücreye giren akımların ve hücrenin kendisinin toplamı ile hesaplanan bir akım birikme fonksiyonu tanımlanmaktadır. Akım yönleri ızgarası ile oluşturulan akım birikme ızgarası ve akarsu ağı iskeleti, Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu örnekte, akarsu ağına katkı için eşik alan büyüklüğü, bir hücrenin alanına eşit alınmıştır. Eşik alan, akarsuyun

tanımlanması için önemlidir. Örneğin eşik alan 5 hücre alanına eşit alırsa, ancak akım birikme fonksiyonunun değeri 5 veya daha çok hücre alanına karşı gelen hücreler, akarsu ağına dahil edileceklerdir.

Strahler'in ağ mertebeleri- D8 akım yönleri ızgarası, her hücre için akım yönünü içerecek şekilde tanımlanmıştır. Bu işlev, akım yönü ağını Strahler sistemine göre mertebelendirmektedir. Mansap kısmında olmayan hücrelerin mertebesi birdir. Mertebeleri birbirinden farklı iki veya daha Çok akım yolu birleştiğinde ortaya çıkan yeni akım yolunun mertebesi, membadaki akım yollarından mertebesi en yüksek olana eşittir. Mertebelerin eşit olması durumunda ise, yeni oluşan akım yolunun mertebesi membasındaki-

1	1	1	1	1	1
1	2	2	3	3	1
1	4	8	6	5	1
1	1	1	21	1	2
1	1	1	2	25	1
1	3	5	8	36	2

(a)



(b)

Şekil 5. (a) akım birikme ızgarası, (b) akarsu kolu mertebelerini gösteren drenaj ağı

lerinkinden bir yüksektir. Şekil 4 ve Şekil 5a'da gösterilen örnekteki akarsu kolu mertebeleri, Şekil 5b'te akarsu drenaj ağı olarak ifade edilmektedir. Bu örnekte, ızgaradaki her hücrenin akarsu ağına katkısı olabilmesi için gerekli eşik alanın bir hücrenin alanına eşit alındığı unutulmamalıdır. Bu durumda, tüm hücreler, akarsu ağının bir parçası olacaktır.

En uzun mesafe- En uzun mesafe, bir hücre ile o hücrenin kendisine drene olan hücrelerden en uzaktaki ile arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bu uzunluk her hücre için hesaplanır.

Akarsu ağı toplam uzunluğu- Akarsu ağının toplam uzunluğu, her hücrenin kendisine drene olan hücrelerle arasında olan uzaklıkların toplamına eşittir. Hücreler arası olan uzaklıklar, hücre boyutlarına ve akım yönünün düz veya çapraz olduğuna bağlı olarak hesaplanır.

Akarsu ağı belirlenmesi- TauDEM akarsu ağının belirlenmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Konuma göre değişken olan akarsu ağı yoğunluğuna duyarlı olan eğrilik tabanlı (curvature-based) yöntemler ve kullanıcı tarafından tanımlanan eşik değerlere dayalı nesnel yöntemler, bu yöntemlere dâhildir. Mevcut bir akarsu ağının da "Çukurlukların doldurulması-Pits Filling" ve "D8 Akım Yönleri" işlevleri kullanılarak ızgara üzerine dahil edilmesi mümkündür. Akarsu ağı rasteri, bu akım yönlerinden

herhangi birini gerektirmeden tanımlanmaktadır. Akarsu ağı SAM işlemleri ile de belirlenebilir. Bu belirleme sırasında kullanıcının alan ve eğim veya alan ve uzunluk için eşik büyüklükler tanımlaması gerekmektedir. Bu işlemlerle ilgili ayrıntılar Tarboton ve diğerleri (1991, 1992) ve Tarboton ve Ames (2001)'da verilmektedir.

Havza Bölümlerinin Belirlenmesi- Akarsu ağı belirlendikten sonra her akarsu bölümü için alt havzalar veya drenaj alanları belirlenmektedir.

Namnam Havzası'nın sınırlarının belirlenmesi

Bu bölümde, Namnam Havzası'nın sınırlarının belirlenme adımlarına yer verilmektedir. Havza için oluşturulmuş olan SAM, BASINS arayüzüne gönderilmiştir. Bu sırada, SAM için Dünya Koordinat Sistemlerinden (WGS) UTM (Universal Transverse Mercator) 35 N (çalışma alanını içeren bölge) projeksiyonu kullanılmıştır. İleri düzeyde akarsu ağı işleme özelliklerinden dolayı AWD eklentisi havzanın sınırlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Kotlar metre biriminde verilmiş ve SAM temel yükselti veri katmanı olarak seçilmiştir. Namnam Havzası için yüksek kaliteli akarsu ağı çizimleri mevcut olmadığından, BASINS'deki mevcut akarsu ağı yerleştirme seçeneği kullanılamamıştır.

Alt havzaların sayıları ve büyüklükleri çalışmanın amacına göre seçilmelidir. Gereksiz sayıda

çok alt havza bulunması modelleme sürecini karmaşık hale getirip, her alt havza için kalibrasyon yapılması gerekliliğini doğurur. Uygun sayıda alt havza ve akarsu bölümünün bulunduğu sınırları belirlenmiş bir havza elde edebilmek için değişik alan eşik büyüklükleri denenmiş ve alan eşik büyüklüğünün 75 hektar olarak tanımlanmasına karar verilmiştir. Model kalibrasyonu için alt havza çıkış noktaları HSPF debi hesap sonuçlarının çıktılarının üretildiği noktalarda tanımlanmıştır. Bu nedenle, Namnam Çayı'ndaki Devlet Su İşleri (DSİ) izleme istasyonu, hem HSPF çıktısı üreten kesit hem de BASINS havza çıkış noktası olarak tanımlanmıştır.

Namnam Havzası'nın karakterizasyonu

Havza karakterizasyonunda noktasal kaynaklı kirleticilerin tanımlanması için de BASINS kullanılabilir. Bu bağlamda, havzada noktasal kirleticilerin kaynaklandıkları yerler ve konumları, kirlenmiş su ortamları ve arazi kullanım dağılımları bulunabilir. Gerekli veriler genellikle BASINS web sitesindeki ilgili pilot çalışma alanının veritabanlarına ulaşılarak temin edilebilir. Ancak, akarsu bölümlerinin uzunluk ve eğimleri, arazi kullanımı ve alt havzalar gibi bazı fiziksel havza karakteristikleri BASINS içindeki MapWindow CBS becerileri kullanılarak saptanabilir. HSPF'in uygulanması aşamasında, havzanın fiziksel karakteristikleri otomatik olarak aşağıda verilen dört değişik ASCII dosyasında depolanır:

- Havza Dosyası (*.WSD)
- Akarsu Bölümü Dosyası (*.RCH)
- Kanal Enkesitleri Dosyası (*.PTF)
- Noktasal Kaynaklar Dosyası (*.PSR)

Yukarıda sıralanan bu dosyalar HSPF Kullanıcı Kontrol Girdi (UCI) dosyası hazırlama işlemlerinin başlatılması için gereklidir. Söz konusu bu dosyalar, havzaların her bir akarsu bölümüne ait alanları, değişik arazi kullanımlarına ait alansal verileri, değişik arazi kullanımlarını, her bir akarsu bölümündeki geçirimli ve geçirimsiz arazi kullanımlarına ait alansal verileri, her bir akarsu bölümünün uzunluğunu, yine her bir bölümünün eğimini ve kanal enkesitlerini içermektedir. HSPF uygulaması için gerekli girdi verisi dosyalarının oluşturulmasının yanı sıra, para-

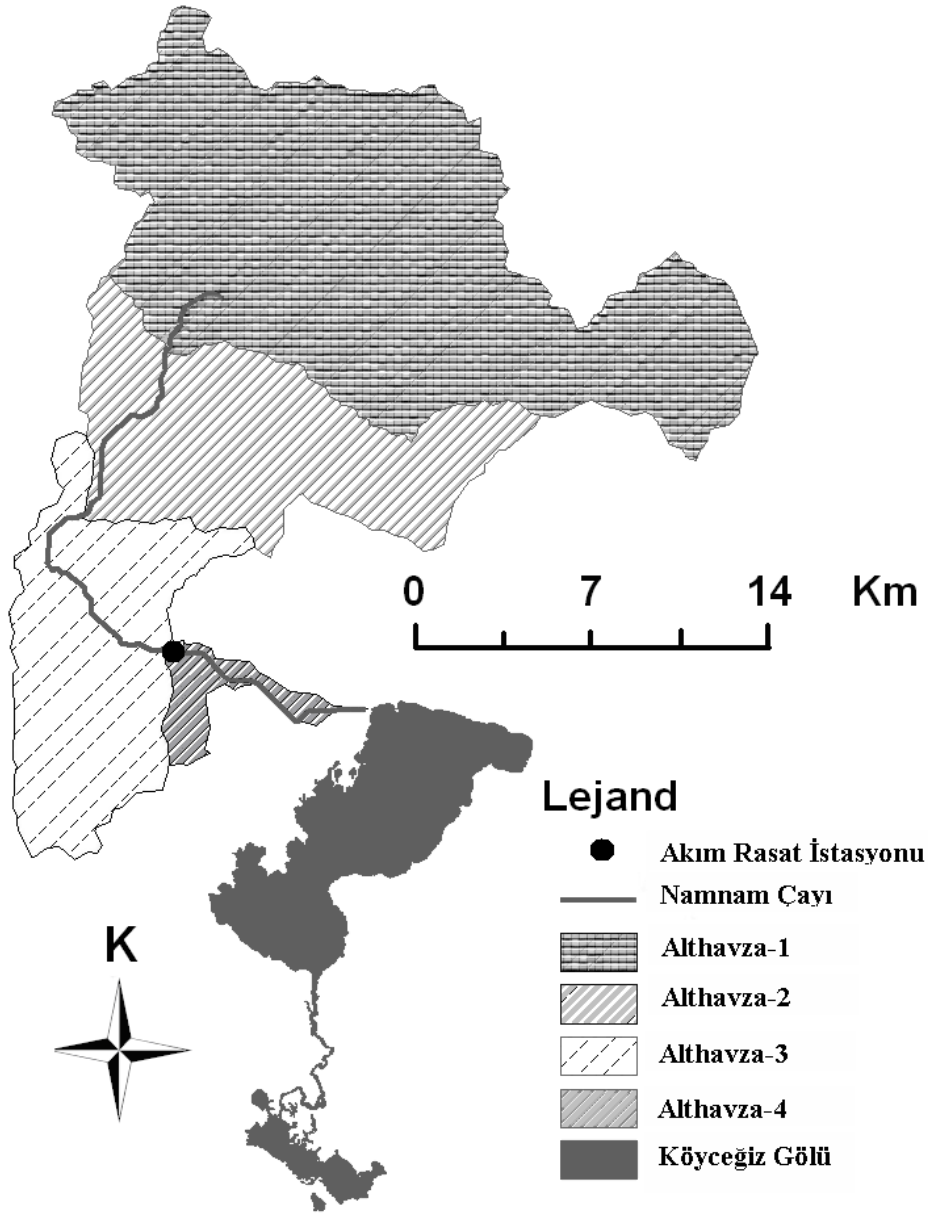
metre tahminlerinde kullanılacak diğer havza özelliklerini (arazi kullanımı, bilinen alanların ortalama kodları ve ortalama eğimleri gibi) belirlemek için CBS becerileri de kullanılabilir.

Sonuçlar ve tartışma

BASINS kullanılarak Namnam Havzası'nda aşağıda sıralanan işler yapılmıştır;

- BASINS içindeki HSPF modeli uygulama için seçilmiştir.
- Alt havzalar, akarsular ve arazi kullanımına ilişkin CBS katmanları oluşturulmuştur.
- Drenaj alanlarının sınırları belirlenmiştir.
- SAM kullanılarak akarsu ağı saptanmıştır.
- Ana arazi kullanımı/arazi örtüsü segmentleri belirlenmiştir.
- Alt havzaların ve drenaj alanlarının sınırları tayin edilmiştir.
- Alt havza ve drenaj alanlarının diğer fiziksel tabanlı öznitelikleri hesaplanmıştır.
- BASINS içindeki WDMUtil kullanılarak meteorolojik veri dosyası oluşturulmuştur.
- WDMUtil'in birim dönüştürme özelliğinden yararlanarak, meteorolojik veri ve akım verileri İngiliz birim sistemine dönüştürülmüştür.
- Kalibrasyon ve doğrulama amacı ile Namnam istasyonuna ait Ekim 1990 ile Eylül 1999 akım verileri içeren WDMUtil kullanılarak proje dosyası oluşturulmuştur.
- BASINS altında çalışan HSPF için gerekli aşağıda sıralanan girdi dosyaları oluşturulmuştur;
 - Havza Dosyası (*.WSD)
 - Akarsu Bölümü Dosyası (*.RCH)
 - Kanal Enkesitleri Dosyası (*.PTF)
 - Noktasal Kaynaklar Dosyası (*.PSR)
 - Meteorolojik Veri (*.WDM)

Şekil 6'da Namnam Havzası'nın sınırlarının belirlenmesi ve karakterizasyonu süreci sonunda oluşturulan harita gösterilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, sistemin ve ana bileşenlerinin sınırları, iki ayrı ölçüt ile tanımlanıp şekillendirilmektedir. Bu ölçütlerden birisi, akarsu ağına katkıda bulunabilecek hücrelerin akım birikme fonksiyonlarının eşik değerleri, ikincisi ise akarsu bölümlerinin sonlandırıldıkları çıkış noktalarıdır. Birçok kez tekrarlanan özyinelemeli işlemlerden sonra, Namnam Havzası için akarsu



Şekil 6. Havza sınırlarının belirlenmesi, karakterizasyon süreçleri ve üretilen harita

bölmeleri ve alt havzaların sayılarını eniyileyecek eşik alan büyüklüğünün 75 hektar olduğu belirlenmiştir. Model kalibrasyonunu kolaylaştırmak için, Namnam Çayı üzerindeki akım rasat istasyonunun konumu bir çıkış noktası olarak belirlenmiştir. Yukarıda açıklanan ölçütler göz önünde bulundurularak, Namnam Çayı'nın akım ve yayılı kirlenme simülasyonları yapılmıştır. Model ağının yapılandırılması ve çalışmanın amaç ve kapsamı göz önünde bulundurularak sistem, Şekil 6'da gösterildiği gibi dört akarsu bölümü ve akarsu bölümleri ile ilişkili dört alt havzadan oluşacak biçimde tanımlan-

mıştır. Havza sınırları, otomatik havza sınırı belirleme aracının akarsu segmentlerini havzanın SAM'ından çıkardığı topografik parametreler ile tanımlayan "burn-in" özelliği kullanılarak belirlenmiştir. BASINS tarafından oluşturulan akarsu ağı ile gerçek akarsu ağı karşılaştırıldığında aralarında, Namnam Çayı'nın Köyceğiz Gölü'ne ulaştığı bölge dışında, önemli farklılıklar olmadığı belirlenmiştir. Namnam Çayı'nın Köyceğiz Gölü'ne ulaştığı konum, model tarafından gerçek durumdakinden daha kuzeyde bulunmuştur. Bu durum mevcut topografik verilerin duyarlılığı, bu topografik verilerle elde edi-

lebilecek SAM'ın en yüksek yatay (bu çalışmada 30 m) ve düşey (bu çalışmadaki yatay çözünürlük ve arazi eğimleri göz önünde bulundurulduğunda 4-5 m) konumsal çözünürlüğü ve otomatik havza sınırlarını belirleme aracının algoritmik anlamdaki sağlamlılığı gibi nedenlere bağlıdır.

Şekil 6, HSPF kullanılarak yapılan akım ve yayılı kirlenme simülasyonlarında temel yapıyı göstermektedir. Bu yapıda modelleme sürecinin sonraki adımları için sistemin ana bileşenleri; akarsu bölümleri, alt havzalar ve arazi kullanımları biçiminde tanımlanmıştır. Yapılandırma, verilerin erişilebilirliği ve erişilebilmiş verilerin kalitesi ve çözünürlüğü ile yakından ilgilidir.

Değerlendirme

BASINS, sunduğu imkanlarla alt havza ve akarsu bölümü sayısını modelleme gereksinim ve amaçlarına uygun olarak eniyilenmesi için yapılacak denemelere destek olmaktadır. Sistem sınırlarının bu araç olmadan HSPF ile tanımlanması, kullanıcıya zor bir arayüz sunan UCI dosyalarının içeriklerinin doğrudan değiştirilmesi ile mümkündür. Bu süreç dosya biçimlendirilmesinde yapılabilecek hatalara çok duyarlıdır ve bu nedenle havza modelleme çalışmaları sırasındaki etkinliği azaltmaktadır. Her bir akarsu bölümünün fiziksel karakteristiklerinin, alt havzaların ve arazi kullanımı/örtüsünün belirlenmesinin, HSPF modelinin kalibrasyonu ve belirlenmesinde parametrelendirme kalitesinin artırılmasına yardımcı olduğu pilot bir havzada yürütülen örnek çalışma ile anlaşılmıştır. BASINS'in veri indirme aracının sadece ABD'deki havzaların verilerini indirmede kullanılabilenliğinden Türkiye'deki bir havza için bu araç kullanılarak hazır veri temin edilememiştir. Ancak, BASINS'in diğer veri düzenleme yetenekleri kullanılarak HSPF önışlemcisinin Namnam Havzası için ihtiyaç duyduğu girdiler üretilebilmiştir. BASINS kullanılarak oluşturulan model yapısı, CBS programının ileri düzeydeki becerileri sayesinde havza fiziksel anlamda oldukça iyi temsil edilebilmiştir. Sonuç olarak, BASINS'in veri işleme, havza sınırlarının belirlenmesi, havza karakterizasyonu, model kurulması, model önışlemleri ve

havzanın fiziksel özelliklerinin görselleştirilmesi amaçlarıyla kullanılan kuvvetli bir araçlar grubu olduğu ve veri tutarsızlıkları önlenebildiği takdirde, Türkiye'deki havzalarda da uygulanabileceği bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Kaynaklar

- Al-Abed, N.A. ve Whiteley, H.R., (2002) Calibration of the Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF) model using automatic calibration and geographical information systems, *Hydrological processes*, **16**, 3169-3188.
- Bergman, M.J., Green, W. ve Donnangelo, L.J., (2002). Calibration of storm loads in the South Prong Watershed, Florida, using BASINS/HSPF, *Journal of the American Water Resources Association*, **38**, 5, 1423-1436.
- Bolstad, P., (2003). GIS fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Eider Press White Bear Lake, Minnesota.
- Carrubba, L., (2000). Hydrologic modeling at the watershed scale using NPSM, *Journal of the American Water Resources Association*, **36**, 6, 1237-1246.
- Choi, W. ve Deal, B.M., (2008). Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA), *Journal of Environmental Management*, **88**, 4, 1119-1130.
- El-Kaddah, D.N. ve Carey, A.E., (2004). Water quality modeling of the Cahaba River, Alabama, *Environmental Geology*, **45**, 323-338.
- Endreny, T.A., Somerlot, C. ve Hassett, J.M., (2003). Hydrograph sensitivity to estimates of map impervious cover: A WinHSPF BASINS case study, *Hydrological processes*, **17**, 1019-1034.
- Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, M. ve Bao-Hua, X., (2004). HSPF simulation of runoff and sediment loads in the upper Changjiang River Basin, China, *Journal of Environmental Engineering*, **130**, 7, 801-815.
- Im, S., Brannan, K.M., Mostaghimi, S. ve Cho, J., (2005). Simulating fecal coliform bacteria loading from an urbanizing watershed, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **39**, 3, 66-679.
- Mark, D.M., (1988). *Network models in geomorphology*, Chapter 4 in Anderson M.G., eds, *Modelling in Geomorphological Systems*, John Wiley, 73-97.

- O'Callaghan, J.F. ve Mark, D.M., (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **28**, 328-344.
- Seaber, P., Kapinos, F. ve Knapp, G., (1987). Hydrologic unit maps, United States Geological Services Water Supply Paper 2294.
- Shirinian-Orlando, A.A. ve Uchrin, C.G., (2007). Modeling the hydrology and water quality using BASINS/HSPF for the upper Maurice River Watershed, New Jersey, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **42**, 3, 289-303.
- Tarboton, D.G., (1997). A New method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, **33**, 2, 309-319.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. ve Rodriguez-Iturbe, I., (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrologic Processes*, **5**, 1, 81-100.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. ve Rodriguez-Iturbe, I., (1992). A physical basis for drainage density, *Geomorphology*, **5**, 1/2, 59-76.
- Tarboton, D.G. ve Ames, D.P., (2001). Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE.
- Tong, S.T.Y. ve Chen, W., (2002). Modeling the relationship between land use and surface water quality, *Journal of Environmental Management*, **66**, 377-393.
- Tzoraki, O. ve Nikolaidis, N.P., (2007). A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin, *Journal of Hydrology*, **346**, 112-121.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, (2007). Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources BASINS 4.0, User's Manual, EPA-823-C-07-001.