

DOI: 10.26650/JGEOG2023-1177718

**COĞRAFYA DERGİSİ**  
**JOURNAL OF GEOGRAPHY**  
**2023, (46)**

<https://iupress.istanbul.edu.tr/en/journal/jgeography/home>


# Sayısal Yükseklik Modellerindeki Mekânsal Çözünürlük Değişkenliğinin Taşkın Tehlike Analizine Etkileri

## *The Effects of Spatial Resolution Variability of Digital Elevation Models on Flood Hazard Analysis*

Hasan ÖZDEMİR<sup>1</sup> , Abdullah AKBAŞ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

ORCID: H.Ö. 0000-0001-8885-9298; A.A. 0000-0003-2024-0565

### ÖZ

Taşkın tehlike ve risk çalışmalarında temel altlık veri olarak yüzey topografyasını temsil etmesi bakımından raster tabanlı Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı; küresel ve lokal ölçekte kullanılan ve birçok çalışmaya altlık oluşturan farklı kaynaklı ve farklı çözünürlükteki SYM'lerle taşkın tehlike analizleri gerçekleştirilerek, Ulus yerleşmesi (Bartın) temelindeki tehlikenin değişkenliğini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda atlık verileri, Ulus Çayı havzası ve Ulus yerleşmesi için elde edilen MERIT 90m, FABDEM 30m, TopoSYM 10m, SYM5m, LiDAR 1m ve İHA 0,1m çözünürlüklü SYM verileri, Ulus yerleşmesine akış gösteren Ulus üst kolu, Süleyman, Alçı ve Eldeş akarsularının SWAT yağış-akış modeliyle üretilmiş 500 yıllık akımları oluşturmaktadır. Bu veriler ile mekânsal çözünürlük değişkenliğini iyi ortaya koyabilmek için sabit Manning n değeri kullanılarak (n=0.035), 2 boyutlu LISFLOOD-FP hidrodinamik model temelinde taşkın tehlike analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak düşük çözünürlükten yüksek çözünürlüğe model zamanı ve ortalama hesaplama hataları artarken, suyun yayılışı, insan ve bina için üretilen tehlike sınıflarının alansal dağılışı azalış göstermiştir. Bölgesel yapılacak çalışmalarda FABDEM verisi daha avantajlı iken havza bazlı yapılacak çalışmalarda LiDAR verisi veya üzerindeki bina ve bitki örtüsü topluluklarına ait yüksekliklerin temizlenmesi koşuluyla SYM5 verisi kullanılabilir verilerdir.

**Anahtar kelimeler:** Taşkın tehlike, Sayısal Yükseklik Modeli, LISFLOOD-FP, Ulus Çayı

### ABSTRACT

Raster-based Digital Elevation Models (DEMs) represent the surface topography as the primary input in flood hazard and risk studies. The study aims to reveal the variability of the hazard at the base of the Ulus settlement by performing flood hazard analyses with different source and resolution DEMs, which are used on a global and local scale and form a primary input for many studies. For this purpose, DEMs data, such as MERIT 90m, FABDEM 30m, TopoDEM 10m, DEM5m, LiDAR 1m, and UAV 0.1m, for the Ulus River basin and settlement and the 500-year flood produced for the river tributaries using the SWAT rainfall-runoff model were used. To examine spatial resolution variability, flood hazard analyses were performed based on the two-dimensional LISFLOOD-FP hydrodynamic model, using a fixed Manning n value (n=0.035). As a result, although there is an increase in cost, time, and model instabilities from low resolution to high resolution, it is essential to choose the most appropriate DEM according to the required detail and scale of the hazard analysis to be able to obtain more accurate results. While the model time and average computational errors from low resolution to high resolution increased, the water extent and the spatial distribution of the hazard classes produced for people and buildings decreased. The FABDEM data is more advantageous in regional studies than others, whereas the LiDAR data can be used in basin-scaled studies. In addition, the DEM5 data also can be used in basin-scaled studies after clearing the heights of the buildings and vegetation groups.

**Keywords:** Flood hazard, Digital Elevation Model, LISFLOOD-FP, Ulus River

**Başvuru/Submitted:** 28.09.2022 • **Revizyon Talebi/Revision Requested:** 27.10.2022 • **Son Revizyon/Last Revision Received:** 31.10.2022 •

**Kabul/Accepted:** 31.10.2022



**Sorumlu yazar/Corresponding author:** Hasan ÖZDEMİR / ozdemirh@uludag.edu.tr

**Atıf/Citation:** Ozdemir, H., & Akbas, A. (2023). Sayısal yükseklik modellerindeki mekânsal çözünürlük değişkenliğinin taşkın tehlike analizine etkileri. *Coğrafya Dergisi*, 46, 137-156. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1177718>



## EXTENDED ABSTRACT

Flood hazard analysis is obtained by evaluating flood depths and velocity because combining these two features of floods increases the hazard size for people and structures. To obtain the depth and velocity of the flood water most accurately, the surface topography and the structures should be represented in the base data. Digital Elevation Models (DEMs), which contain this information, are the primary data used in the hydraulic modelling of floods and checking their accuracy. The present study aims to reveal the variability of the hazard at the base of the Ulus settlement (Bartın) by performing flood hazard analyses with different source and resolution DEMs, which are used in global and local scale studies as primary input data.

For this purpose, DEM data, discharge data, and hydrodynamic model selection constitute the main components of the study. Six different data sets with different resolutions were used in this study. These are: MERIT DEM (90m), FABDEM (30m), TopoDEM (10m), DEM5 (5m), LiDAR DEM (1m), and UAV DEM (0.1m). The first two of these datasets (MERIT and FABDEM) are global datasets produced by Yamazaki et al. (2017) and Hawker et al. (2022), respectively. TopoDEM and DEM5 are national datasets, while LiDAR and UAV data are produced by project-based high-resolution data. The TopoDEM was generated from topographic contours scaled at 1:25000 using the TopoRaster function in ArcGIS Pro. The DEM5 data was produced by the General Directorate of Mapping from the stereo photos taken in 2013, with  $\pm 3\text{m}$  vertical accuracy. The LiDAR and UAV data generation steps are provided in Figures 4 and 5.

Since there is no gauge data in each tributary converging in the Ulus settlement, the SWAT (The Soil & Water Assessment Tool) model was used to obtain the data to simulate the hydraulic model. The SWAT rainfall-runoff model is a physical-based and semi-distributed model and overlays the digital elevation model (DEM), land-use, soil, and slope to obtain the Hydrological Response Unit (HRU) level and force the model via weather data based on the water balance equation at HRU. The precipitation (mm), minimum/maximum temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), and relative humidity (%) of the Ulus weather station (17615) between 1970 and 2020 and the gauge data of Emirce-Ulus station (D13A088) between 2016 and 2020 were used in the model (Figure 1). The sensitive parameters model was manually calibrated based on the suggestion of Abbaspour et al. (2015), with the NSE value being found to be 0.3 on a daily scale, which is sufficient to use in the model. For steady flow simulation, the Generalised Extreme Value (GEV) distribution includes three distributions. Namely, Gumbel, Fréchet, and Weibull were fitted to simulate each probability (return period) based on the annual maximum series (AMAX). Finally, the 500-year flow data was produced for the steady-state flow simulations (Fig. 6).

We ran simulations for the 500-year flow data for four main tributaries using the two-dimensional hydrodynamic model LISFLOOD-FP to produce flood depth and velocity data. While modeling is done by distributing the 500-year flow of river tributaries to the back of the basin with Shreve order (1966) in MERIT, FABDEM, TopoDEM, and DEM5 data. The LiDAR and UAV DEMs-based modeling was performed with point-source flow data about 1 km behind the Ulus settlement.

The results indicate that flood modeling studies, especially in areas where settlements spread up to the upper basins, are best to make modeling studies and hazard analyses involving the river networks in the entire basin instead of settlement based. However, the cost of acquiring data and difficulties and increases in computational power from low resolution to high resolution in flood modeling (Table 1) make it difficult to carry out these studies with high resolution across the entire basin. The flood extent of the 500-year flow has decreased 50% from the MERIT to the UAV data (Figure 9). Although the maximum depth values vary between 4.4 and 7.7 m, the increase in maximum velocity is more due to the increase in resolution. The high flood hazard class is distributed over a large area in flood hazard analyses, based on MERIT, FABDEM, and TopoDEM data with low resolution and no riverbed form. In the DEM5, LiDAR, and UAV data, where the bed form started to occur, there was a decrease of up to 50% in the areal distributions of this class. This situation has made the number of buildings exposed to floods and intervention more acceptable in the building-based flood hazard analysis, especially in the very high hazard class, from 152 buildings in the MERIT data to 2 and 0 buildings in the LiDAR and UAV data, respectively (Figure 10). As a result, flood hazard analyses vary depending on the area to be studied, the data detail, and computational power. It should not be forgotten that the results will vary depending on the characteristics of the projects or academic research and that evaluations and risk studies should be carried out within the resolution framework.

## 1. Giriş

Taşkınlar her geçen gün etkisini ve şiddetini arttıran doğa olayları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum insanın doğayı kullanmadaki yanlışlarıyla birleşince afete dönüşmekte ve bundan dolayı oluşan kayıplar da yıldan yıla artış göstermektedir. EM-DAT verilerine bağlı olarak 1980-1999 yılları arasında Dünya genelinde 1389 taşkın afeti kaydedilmiş, bu sayı 2000-2019 yılları arasında iki katından fazla artışla 3254'e ulaşarak doğal afetler arasında meydana gelme sayısı en fazla olan afet olmuştur (CRED-UNDRR, 2020). 2000 yılından sonraki 20 yıl içerisinde her yıl ortalama 163 taşkın afeti kaydedilmiş, bu ortalama 2020'de 201'e, 2021 yılında ise 223 taşkın afetine ulaşmıştır (CRED, 2022). Sadece 2021 yılı içerisinde meydana gelen bu taşkınlarda 4143 kişi yaşamını yitirmiş, 29,2 milyon kişi etkilenmiş ve 74,4 milyar Amerikan doları ekonomik kayıp meydana gelmiştir. Taşkın afetindeki bu artış değişen yağış koşulları, artan nüfus ve yanlış arazi kullanımlarına bağlı olarak her geçen yıl etkisini arttırarak devam ettirmektedir.

Taşkınların tehlike ve riskini azaltmak için havza bazlı birçok çalışma yapılmaktadır. Bunlardan özellikle taşkın tehlike analizleri bölgesel veya yerel ölçekte, taşkınların büyüklük ve olasılıkları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir (Özdemir vd., 2011; Alfieri vd. 2014; Sampson vd. 2015; Vojtek ve Vojtekova, 2016; Dottori vd. 2016; Elbaşı ve Özdemir, 2019; Guerriero vd. 2020; Elbaşı, 2022). Taşkın risk çalışmalarının temelini oluşturan tehlike analizleri, taşkın derinlikleri ile su hızlarının birlikte değerlendirilmesiyle elde edilmektedir. Çünkü taşkınlara ait bu iki özelliğin kombinasyonu hem insan hem de yapılar için tehlikelinin boyutunu arttırmaktadır (DEFRA/EA, 2006). Taşkınların derinlik ve hız bileşenlerinin elde edilmesi modelleme çalışmalarıyla gerçekleştirilir. Dolayısıyla elde edilen sonuç ürünler taşkın risk çalışmalarında (Apel vd. 2006; Dutta vd. 2006; Apel vd. 2009), taşkın hasarı belirlemede (Bhujyan ve Dutta, 2012; Merz vd. 2010), taşkınla ilgili mühendislik çalışmalarında (Gallegos vd. 2009), su kaynakları planlamasında ve akarsu sistemleri hidrolojisi (Dutta vd. 2013) gibi birçok çalışmada kullanılmaktadır. Taşkın suyunun derinlik ve hızının en doğru şekilde elde edilebilmesi için yüzey topografyasının ve suyun akışına yön veren yapıların gerçeğe yakın bir şekilde altlık verilerde temsil edilmesi gerekmektedir. Bu bilgileri içinde barındıran Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) taşkınların hidrolik modellenmesinde kullanılan ve doğruluğunu kontrol eden temel atlık veriler olarak karşımıza çıkar (Bates ve De Roo, 2000; Kenward vd. 2000; Cobby vd. 2001).

Taşkınların hidrolik modellenmesinde kullanılan SYM verilerine ait çözünürlükler literatürde 0,1 m ile 90 m arasında değişiklik göstermektedir. 0,1 m çözünürlüğündeki SYM temelli taşkın modellemeleri sınırlı sayıda araştırmada, daha çok mikro ölçekte gerçekleştirilen taşkın modelleme çalışmalarında kullanılmıştır (Sampson vd. 2012; Ozdemir vd. 2013; De Almeida vd. 2018). Çözünürlük düştükçe modellenen alan genişlemekte ancak yüzey topografyasının temsil kabiliyeti azalmakta, bu da taşkın analizlerinde hatalara neden olmaktadır (Saksena ve Merwade, 2015; Hawker vd. 2018). Yüksek çözünürlüklü olarak taşkın modelleme çalışmalarında kullanılan 1 m ve altındaki SYM'ler, daha çok LiDAR (Light Detecting And Ranging) teknolojisi ve İHA (İnsansız Hava Aracı) teknolojisiyle üretilen SYM'ler olarak karşımıza çıkar. LiDAR SYM verileri küresel olarak yaygın kullanılan veri setleri olmasa da lokal olarak birçok taşkın çalışmasında altlık veri olarak kullanılmıştır. Bununla ilgili olarak detaylı bir derleme Muhadi vd. (2020) tarafından verilmiştir. İHA teknolojisiyle üretilen SYM'lerin taşkın çalışmalarındaki kullanımı LiDAR'a göre daha yeni olup LiDAR verisinden daha lokal ölçekte çalışmalarda kullanılmaktadır (Karamuz vd. 2019; Yalçın; 2019; Annis vd. 2020). 5 ve 10 m çözünürlüklü SYM'ler ise genellikle topografik harita ve planların eş yükselti eğrilerinden üretilen yükseklik modelleridir. 10m üstündeki SYM'ler ise erişimi herkese açık olan ücretsiz veri setleri oluşturmaktadır. Bunlar farklı çözünürlüklerdeki SRTM, Aster GDEM, NASA DEM, ALOS DEM (AW3D-30m), Coastal DEM, TerraSAR X, Copernicus GLO-30 ve EU-DEM verileridir. Bu ücretsiz verilerle üretilen model sonuçları ile meydana gelmiş gerçek taşkın olayı ve/ya yüksek çözünürlüklü modellere ait sonuçların karşılaştırma çalışmaları yapılmış ve yapılmaktadır (Hawker vd. 2019; Utlu ve Özdemir, 2020; Xu vd. 2021; Garrote, 2022; Muench vd. 2022). Her bir makalede farklı sonuçlar elde edilse de Xu vd. (2021) aynı koşullar çerçevesinde gerçekleştirilen taşkın modellerine ait sonuçların birbirinden farklı olduğunu, yalnızca tek bir SYM veri kümesinin kullanılmasının taşkın haritalamasında yanlılığa yol açabileceğini ve maruziyet ve taşkın yönetiminin yüksek güvenilirlik için yeterli olmadığını ortaya koymuştur.

Küresel çalışmalarda kullanılan 90 m çözünürlüklü veri setlerindeki yükseklik hataları, şerit ve nokta gürültüleriyle ağaç yüksekliği sapmaları Yamazaki vd. (2017) tarafından çoklu uydu görüntüleri ve filtreleme yöntemleri kullanarak büyük oranda giderilmiş ve MERIT DEM olarak tanımlanan (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM) ~90m çözünürlüklü yeni düzeltilmiş veri setini bütün dünya ile paylaşmışlardır. MERIT DEM verisi SRTM3 DEM ve AW3D-30m DEM verisi

temelinde oluşturulmuştur. İki SYM verisinde olmayan alanlar ise VFP-DEM (Viewfinder Panoramas DEM) ile doldurulmuştur. MERIT DEM küresel veri setlerinin taşkın modelleme çalışmalarında karşılaştırıldığı yayınlarda 30m çözünürlüklü Copernicus DEM verisinden sonra en iyi sonucu veren veri setlerinden birisi olduğu ortaya konmuştur (örn. Utlu ve Özdemir, 2020; Garrote, 2022). 90 m çözünürlüklü bu veri seti sonrasında Hawker vd. (2022) 30 m çözünürlüklü Copernicus DEM verisindeki bina ve orman yüksekliklerini gidermek ve yükseklik hatalarını minimize etmek için FABDEM (Forest And Buildings removed DEM) verisini üretmişlerdir. Bu veride yerleşim alanlarındaki ortalama mutlak dikey hata 1,61m'den 1,12m'ye ve ormanlık alanlarda 5,15m'den 2,88m'ye düşürülmüştür. Literatürde bu veri seti temelli gerçekleştirilmiş bir taşkın modelleme çalışması henüz mevcut değildir.

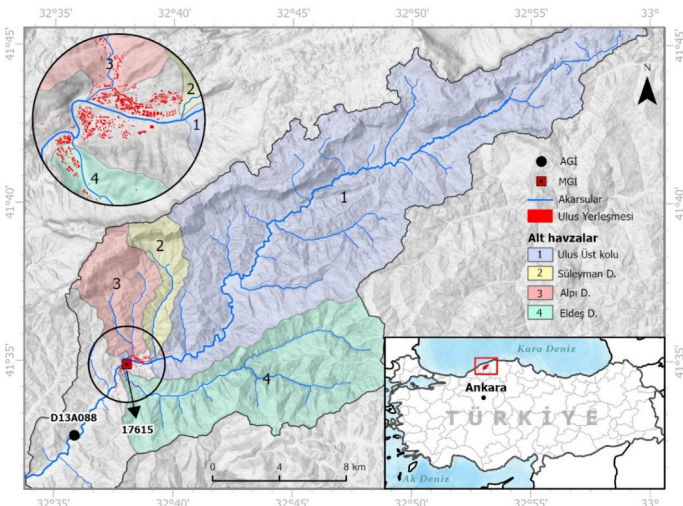
Bu çalışmanın amacı; bazı düzeltmelerin yapıldığı küresel veri setleri olan MERIT (90m) ve FABDEM'in (30m) yanında 1:25000 ölçekli topografik haritalardan üretilen TopoSYM (10m), stereo hava fotolarından üretilen ve Türkiye için en yüksek çözünürlüklü tamamlanmış veri seti olan 5m çözünürlüklü SYM (SYM5), 1m çözünürlüklü LiDAR SYM ve 10cm çözünürlüklü İHA SYM verileri temelinde, 500 yıllık taşkın debisi kullanılarak raster tabanlı 2 boyutlu hidrodinamik modelle (LISFLOOD-FP) üretilen taşkın tehlike analizlerinin Ulus yerleşmesi (Bartın) özelinde değişkenliğini ve kullanılabilirliğini ortaya koymaktır. Bu veri setlerinden MERIT ve FABDEM ücretsiz küresel veri setleri iken, TopoSYM ve SYM5 Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilebilen Türkiye'ye has

verilerdir. LiDAR ve İHA verileri ise proje dahilinde üretilen yüksek çözünürlüklü veri setleridir.

## 2. Çalışma Alanı

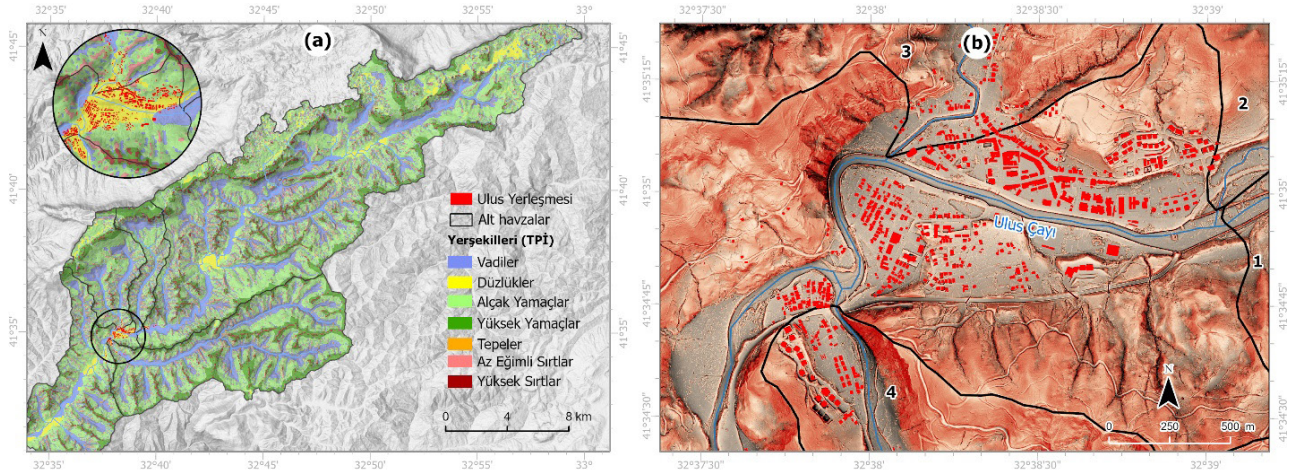
Çalışma alanını oluşturan Ulus yerleşmesi (Bartın), Bartın Çayı'nın bir kolu olan Ulus Çayı havzası içerisinde bulunur. Ulus Çayı havzası yaklaşık olarak 32°33'50" – 32°59'53" doğu boylamları ve 41°30'27"–41°46'4" kuzey enlemleri arasında yer alır ve 103m ile 1352m'lik yükseklik değerleriyle 1249m rölyefe sahiptir (TopoSYM10 verilerine göre). 367,48 km<sup>2</sup> alan kaplayan Ulus Çayı havzasında, Ulus yerleşmesi yaklaşık olarak 160-180m yükseklikler arasında ve dört akarsu kolunun birleştiği konumda bulunmaktadır. Bunlar; Ulus Çayı'nın üst kolu (1), Süleyman (2), Alpi (3) ve Eldeş (4) Dere'leridir (**Şekil 1**). 2021 yılı adrese dayalı nüfus sayımına göre ilçe merkez nüfusu 3926 kişiden oluşmaktadır (TÜİK, 2022).

Ulus Çayı havzası temel olarak Jura, Kretase ve Kuvaternere ait üç ana litolojik birimden oluşmaktadır. En eski birim Üst Jura kireçtaşlarından oluşur ve havzanın kuzeyinde kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı yükseltinin fazla olduğu alan olarak karşımıza çıkar. Üst Kretase filişleri ise kumtaşı, çamurtaşı ve kiltası ardalanmalı olup havzanın genelinde yayılış gösterir. Kuvaterner alüvyonları ise akarsuların içerisinde aktığı vadi tabanlarındaki litolojik birimleri oluştururlar (Timur vd. 1997). Filiş üzerinde gelişen topraklar, ince taneli killi-tınlıdan iri taneli çakıllı blok boyutuna kadar değişen farklı tane boyutlarına sahiptir (Ercanoğlu, 2005), bu da toprakların infiltrasyon kapasitesini olumsuz etkiler. Havzanın sahip olduğu litolojik özellikler, morfolojik görünümün şekillenmesinde büyük rol oynamıştır. Kireçtaşlarının olduğu alanlarda yüksek sırtlar ve tepeler hâkim bir görünüm sunarken, filişlerin yayılış gösterdiği alanlarda kısmen yükseltinin az olduğu engebeli bir topografya ve yamaçlar kendini gösterir (**Şekil 2a**). Havzanın da içinde bulunduğu bölge Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasının Cfb alt tipinde yıllık ortalama 1050 mm yağışla ılıman okyanus iklimine sahiptir (Öztürk vd. 2017). Ancak, çalışma alanında yıllık ortalama yağış 967 mm'dir (1970-2018 yılları arasında), bölge ortalamalarının biraz altındadır. Bölgesel eğilime göre en yağışlı dönem Ekim-Aralık ayları arasındadır. Ortalama sıcaklıklara göre en yüksek sıcaklık Temmuz (22°C), en düşük ise Ocak (3°C) ayında gözlenmiştir (Akbaş ve Özdemir, 2021). Sahanın iklim ve toprak özelliklerine bağlı olarak bitki örtüsü iğne yapraklı ve geniş yapraklı ormanlardan oluşmaktadır (OGM, 2011). Bölgenin ekonomik geçim kaynakları nedeniyle ormanların çoğu tahrip olmuştur.

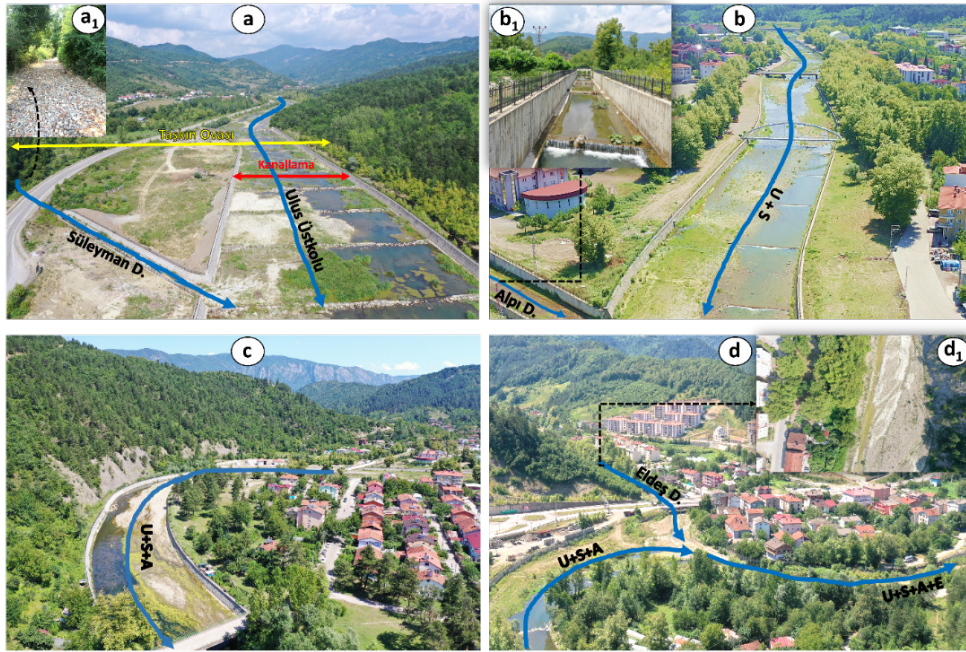


**Şekil 1:** Çalışma alanının konumu ve Ulus yerleşmesinde toplanan alt akarsu kolları ve havzaları.

**Figure 1:** The location of the study area and the tributaries and their basins accumulated in the Ulus settlement.



**Şekil 2:** a) Topografik Pozisyon İndeksi temelli Ulus Çayı havzasının yer şekilleri b) 1m çözünürlüklü LiDAR SYM'de Ulus yerleşmesinin kırmızı rölüf görüntüsü.  
**Figure 2:** a) Landforms of Ulus River basin based on Topographic Position Index b) Red relief image of Ulus settlement with 1m resolution LiDAR DEM.



**Şekil 3:** a) Ulus üst kolu ve Süleyman Deresi, b) Ulus üst kolu ile Süleyman Deresinin birleşmesinden sonraki kanal ve Alpi Deresi katılımı, c) Ulus üst kolu, Süleyman ve Alpi (U+S+A) Dereleri birleşimi, d) U+S+A birleşimi ile Eldeş Deresi birleşimi ve U+S+A+E birleşim kolu.

**Figure 3:** Ulus upstream ve Süleyman Stream, b) The reach joins the Ulus Upstream and Süleyman Stream and Alpi Stream, c) The reach joins Ulus Upstream, Süleyman and Alpi Streams (U+S+A), d) U+S+A reach joins with Eldeş Stream and last reach U+S+A+E.

Bartın Çayı havzasında 1960 yılından bu yana meydana gelen otuz önemli taşkın olayının altısı taşkın yatağında bulunan Ulus yerleşimini etkilemiştir (DSİ, 2021). Özellikle 1998 taşkınlardan sonra Bartın Çayı havzası genelinde taşkınları önlemek ve etkilerini azaltmak için bazı mühendislik uygulamaları yapılmıştır. Ancak bu uygulamalar akarsu havzasının bütüncül fiziksel özelliklerine bağlı kalınmadan yerel bazı çözümler olarak gerçekleştirilmiştir (Turoğlu ve Özdemir,

2005). Bu çalışmalardan birisi de Ulus yerleşmesi içerisinde geçen Ulus Çayı yatağındaki ıslah çalışmalarıdır. 2015 yılından sonra başlanan çalışmalarda akarsu yatağı yerleşmenin konumuna bağlı olarak doğal taşkın yatağından daraltılmış ve kanal içine alınmıştır (Şekil 2b). Bu işlemler daha çok Ulus Çayı üst kolunun Ulus yerleşmesine girmeden 1 km mesafesinde başlamaktadır. Süleyman Deresi kısmen şehir merkezinin dışında kaldığı için yatak formu genellikle doğaldır. Ancak Ulus

Çayı üst koluna bağlantı noktasında yaklaşık 130m mesafede kanal içine alınmıştır (**Şekil 3a** ve **a<sub>1</sub>**). Ulus üst kolu ve Süleyman Deresi birleşiminden sonra (U+S) tamamen yapay kanal içinde akış gösteren akarsu yine Ulus şehir merkezine girdiği alandan itibaren yapay kanal içine alınan Alpi Deresiyle birleşir (**Şekil 3b** ve **b<sub>1</sub>**). Ulus üst kolu, Süleyman ve Alpi Derelerinin birleşiminden oluşan kol (U+S+A) menderes kıvrımı yaparak bir “S” çizer (**Şekil 3c**) daha güneyde yapay kanal içine alınmamış ancak yatak kenarları kısmen yatak içi malzemelerle yükseltilmiş bir akarsu olan Eldeş Deresi ile birleşir ve Ulus üst kolu, Süleyman, Alpi ve Eldeş Derelerinin birleşiminin oluşturduğu (U+S+A+E) Ulus Çayı akışını devam ederek şehir merkezinden uzaklaşır (**Şekil 3d** ve **d<sub>1</sub>**).

### 3. Veri ve Yöntem

#### 3.1. Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM)

Çalışmada farklı çözünürlüklerde altı farklı veri seti kullanılmıştır. Bunlar; MERIT (90m), FABDEM (30m), TopoSYM (10m), SYM5 (5m), LiDAR SYM (1m) ve İHA SYM (10cm) şeklindedir. Bu veri setlerinden ilk ikisi (MERIT ve FABDEM) küresel veri seti, TopoSYM ve SYM5 ulusal veri setleri, LiDAR ve İHA verileri ise proje tabanlı üretilen yüksek çözünürlüklü verilerdir.

**MERIT**, Yamazaki vd. (2017) tarafından SRTM3 DEM ve AW3D-30m DEM verisi temelinde üretilmiştir. Ancak bu verilerdeki bazı eksiklikler VFP-DEM (Viewfinder Panoramas DEM) ile doldurulmuş ve SYM’lerdeki sapmaları tahmin etmek için ICESat (Ice, Cloud and Elevation Satellite) lazer altimetre referansı kullanılmış, orman kanopisi kaynaklı hatalar için de küresel ağaç yoğunluk ve yükseklik haritaları kullanılmıştır. Böylece yükseklik hataları, şerit ve nokta gürültüleri çoklu uydu görüntüleri ve filtreleme teknikleriyle büyük oranda giderilmiş 90m çözünürlüklü bir veri seti oluşturulmuştur. Hatalar giderildikten sonra, ±2m veya daha iyi dikey doğrulukla haritalanan arazi alanları %39’dan %58’e çıkarılmıştır. Yükseklik hatalarının topografya değişkenliğinden daha büyük olduğu düz bölgelerde, akarsu ağları ve tepe-vadi yapıları gibi arazilerin açıkça temsil edildiği alanlarda bu veri setinde önemli gelişmeler elde edilmiştir. Ancak küresel olarak MERIT verisi üzerinden binaların düzeltilmesi henüz gerçekleşmemiş olup, sadece ağaç yüksekliklerinden arındırılmıştır (Hawker vd. 2022).

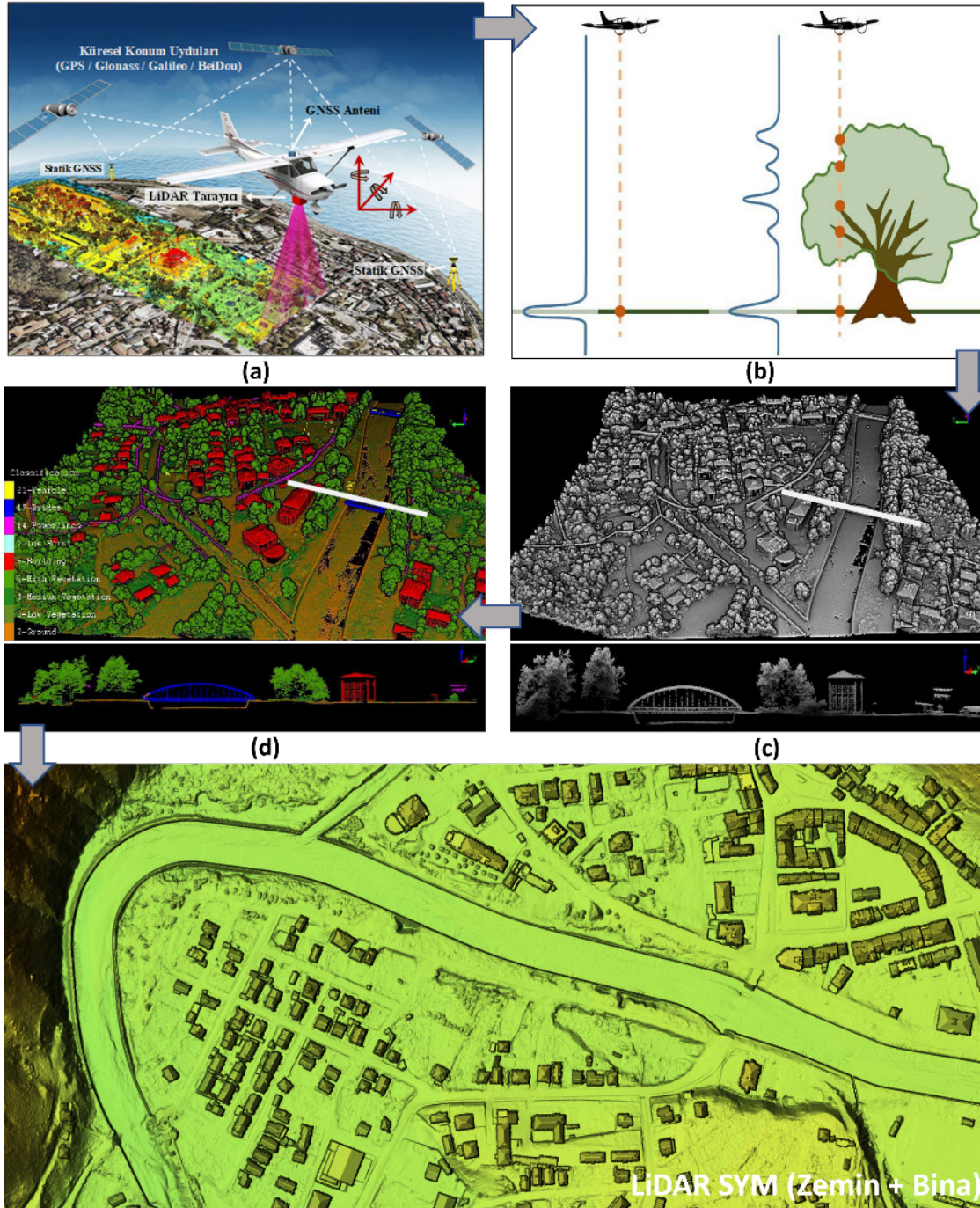
**FABDEM**, Hawker vd. (2022) tarafından Copernicus GLO-30 m verisi temelinde düzenlenmiştir. Burada düzeltme algoritması, çok çeşitli iklim bölgelerini ve kentsel alanları

kapsayan 12 ülkenin LiDAR SYM verisinden bir dizi referans yükseklik verisi üzerinde eğitilmiştir. Dolayısıyla bu yaklaşımın, bir tek ülkeden gelen veriler üzerinden eğitilmiş önceki SYM’lere kıyasla çok daha geniş uygulanabilirliği bulunmaktadır. Tahmin edici veriler ve referans SYM’ler rastgele orman modeli tarafından kullanılan bir tablo veri formatında derlenmiştir. Binalar ve ağaçlarla ilişkili SYM’deki anomalileri tahmin etmede faydalı olduğu belirlenen tahmin verileri seçilmiştir. Orman yüksekliğini, orman örtüsünü ve bina ayak izlerini tanımlayan temel veri kümeleri, Copernicus GLO-30’a benzer bir çözünürlüğe (10-100 m) sahiptir ve raster hücresi düzeyinde bilgi sağlamalarına olanak tanır. Uygulanan yöntemle, yerleşim alanlarındaki ortalama mutlak dikey hata 1,61 m’den 1,12 m’ye ve ormanlık alanlarda ise 5,15 m’den 2,88 m’ye düşürülmüştür.

**TopoSYM**, 1999 yılı hava fotosu çekimlerine bağlı olarak 2001 yılında basılmış 1:25000 ölçekli ve yatayda ±5m düzeyde ise ±2,5m doğruluğa sahip (Akyürek vd. 2018) topografik haritalara ait 10m aralıklı ve 5 m yardımcı izohiplere ait veriler temelinde ArcGIS yazılımı içerisindeki TopotoRaster araç kutusu kullanılarak 10 m çözünürlüklü SYM verisi üretilmiştir. TopotoRaster aracı, hidrolojik olarak doğru SYM’lerin oluşturulması için özel olarak tasarlanmış bir enterpolasyon yöntemidir ve Hutchinson (1988, 2011) tarafından geliştirilen ANUDEM programına dayanmaktadır.

**SYM5**, çekimine 2013 yılında başlanan stereo hava fotoğraflarından otomatik eşlemeyle üretilmiş, arazi topografyasındaki tüm detayları kapsayan (insan yapımı ve bitki örtüsü dahil), 5 m grid aralıklı ve kaba hatalardan arındırıldıktan sonra %90 güven aralığında ±3 m düşey doğruluğuna sahip yükseklik verileridir (Çam vd. 2013). Kaba hatalar ve su yüzeyleri (deniz, göl ve geniş yataklı dere) düzeltilmemiş olan SYM5 verisi, hava fotoğrafı çekilen tüm alanlar için üretilmiştir.

**LiDAR SYM**, hava platformuyla 18 Temmuz 2018 tarihinde Delta LiDAR firması tarafından Cessna T206H tipi uçakla ve Riegl LMS – Q680i hava LiDAR sensörüyle çekimi yapılmış verilerden üretilmiştir. Hava LiDAR sistemi ile elde edilecek veri setinin konum doğruluğunu arttırmak için çalışma alanı içerisinde yer kontrol noktaları (YKN) belirlenmiş ve LiDAR veri alımıyla eş zamanlı çekilen fotoğraflarda görülecek şekilde tesis edilmiştir. Ayrıca uçakta bulunan GNSS alıcısının hareketli olmasından dolayı oluşan konum doğruluğunu dengelemek için saha içerisinde bir adet statik GNSS istasyonu kurulmuştur. Bu istasyon uçuş süresince çalıştırılmış ve böylece uçakta bulunan GNSS alıcısı ile statik GNSS istasyonunun aynı GPS zamanına ait veri seti elde edilmiştir (**Şekil 4a**). Elde edilen LiDAR



**Şekil 4:** LiDAR SYM verisinin üretilme aşamaları, a) uçuş planı ve veri toplama, b) nokta bulutu üretimi süreçleri, c) sınıflandırılmamış nokta bulutu ve örnek enkesiti, d) sınıflandırılmış nokta bulutu ve örnek enkesiti (Şimşek 2020'den değiştirilerek).

**Figure 4:** Production steps of LiDAR DSM, a) flight plan and data collection, b) point cloud generation processes, c) unclassified point cloud and sample cross section, d) classified point cloud and sample cross section (Modified from Şimşek 2020).

verilerinin dengeleme ve kalibrasyon işlemleri sonrasında üretilen veri kontrol noktaları ile karşılaştırılarak konum doğruluğu yatayda “(XY) = ±8 cm ve düşeyde (Z) = ±6 cm” olarak elde edilmiştir. 3 boyutlu koordinatlara sahip ve yeryüzü ya da üzerindeki diğer objeleri belirleyen veri seti olan “nokta bulutu” (Şekil 4b,c), 3 boyutlu koordinat verisiyle birlikte

(XYZ) yoğunluk, sınıflandırma, geri dönüş sayısı, zamanı ve her noktanın uçuş hattı kaynağı bilgilerini içerir (NOAA, 2012). Ayrıca LiDAR sisteminin çoklu dönüş (echo) özelliği sayesinde bitki örtüsünün altında yer alan topografyadan da veri elde edilebilmektedir (Şekil 4b). LiDAR nokta bulutu ASPRS nokta bulutu sınıfları standartları (ASPRS, 2013) tablosundaki kod ve

değerler dikkate alınarak “zemin, binalar, çatı yapıları, duvar ve duvar yapıları, ağaçlar, ağaç dışında kalan bitki örtüsü, yüksek gerilim hattı direkleri ve araçlar” otomatik olarak TerraSolid yazılımının TerraScan modülünde (V.19.025) sınıflandırılmıştır (Şekil 4d). Sınıflandırma işleminde ortaya çıkan eksiklik ve hatalar makine öğrenmesi yöntemiyle LiDAR360 yazılımıyla (V.3.2) ortadan kaldırılmıştır. Metrekareye 16 noktanın

bulduğu LiDAR sınıflandırılmış nokta bulutu verilerinden zemin ve bina noktaları kullanılarak düzensiz üçgen ağı (TIN) yöntemiyle 25 cm çözünürlüğünde SYM verisi üretilmiştir (Şimşek, 2020). Bu veri daha sonra 1 m çözünürlüğe dönüştürülerek çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4).



**Şekil 5:** İHA SYM verisinin üretilme aşamaları, a) uçuş planı ve YKN noktaları belirleme, b) stereo foto elde etme, c) nokta bulutu üretimi ve örnek alanı (Agisoft), d) zemin+bina nokta bulutunun oluşturulması (Cloud Compare), e) nokta bulutundan SYM verisinin üretilmesi ve örnek hata kesiti (ArcGIS Pro), f) SYM verisi üzerindeki hataların temizlenmesi (Quick Terrain Modeler) ve örnek kesiti.

**Figure 5:** Production steps of UAV DSM, a) determining flight plan and GCP points, b) stereo photo acquisition, c) point cloud generation and sample area (Agisoft), d) ground+building point cloud generation (Cloud Compare), e) DEM data generation from point cloud and sample error cross section (ArcGIS Pro), f) Clearing errors on DEM data (Quick Terrain Modeler) and sample cross section.



**İHA SYM** için DJI Mavic 2 Pro, 20MP Hasselblad L1D-20c gimbal kameraya sahip olan drone ile 18-24 Temmuz 2021 tarihleri arasında, 120 m yükseklikten, %80 ön ve yan bindirme ile batarya süresi ve sayısına bağlı olarak bölümlenmiş 15 küçük alandan oluşacak şekilde 4479 görüntüden oluşan çekimler gerçekleştirilmiştir (**Şekil 5a,b**). Stereo görüntülerin konumsal doğruluklarını arttırmak için çekim öncesinde alan içerisine eşit dağılacak şekilde belirlenen 23 adet YKN'ye ait x, y, z hassas koordinatları CHC i90 model GNSS alıcısı ile Türkiye CORS ağına (TUSAGA-Aktif) bağlanarak RTK (Real Time Kinematic) yöntemi ile her YKN'nin koordinatları 5 saniye Epc'la UTM 36 koordinat sisteminde ITRF 96 datumuna göre ölçülmüştür (**Şekil 5a**). Elde edilen görüntüler Agisoft Metashape Pro (V. 1.7.3) yazılımı kullanılarak SYM ve ortofoto üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, görüntüler üzerinde ölçülecek olan noktaları otomatik olarak çıkarmak ve ardından bu noktaları görüntülerin örtüşen kısımları üzerinden birbirine bağlamak için ilk işlem uygulanmıştır. Tüm YKN'lerin ölçülen konum verilerini yükledikten sonra, birden fazla görüntüde 23 YKN'nin tam konumları atanmıştır. Daha sonra, yaklaşık 9,5 milyar noktadan oluşan bir 3B nokta bulutu ve bu noktaların yoğunlaştırılmış nokta bulutunda üçgenleştirmeyle oluşturulan 3B dokulu bir ağ elde edilmiştir (**Şekil 5c**). Son olarak, çalışma alanının yatayda (X, Y) 2,38 cm ve dikeyde 1,06 cm doğruluğa sahip 2,79 cm çözünürlüğünde SYM ve ortofotosu üretilmiştir.

İHA verisi LiDAR verileri gibi çoklu dönüş özelliğine sahip olmadığı için bitki örtüsü yoğunluğuna sahip alanlarda SYM verilerinin direkt modellemede kullanılması sakıncalıdır. Bu nedenle 9,5 milyar noktadan oluşan nokta bulutu çalışma alanı içerisinde 500x500 alanda 31 parçaya bölünerek LAS verisi üretilmiştir. Elde edilen bu LAS dosyaları Cloud Compare (v.2.12) yazılımında CSF (Cloth Simulation Filter) yöntemiyle (Zhang vd. 2016) zemin ve zemin olmayan noktalara ayrılmıştır (**Şekil 5d**). Burada daha çok bitki örtüsünün temizlenmesiyle ilgili eşik değerler kullanılmıştır. Zemin olmayan noktalardan sadece binalara ait nokta verileri seçilerek zemin noktalarına atanmıştır (**Şekil 5d**). Daha sonra bu zemin ve bina nokta bulutunu oluşturan LAS dosyaları, ArcGIS Pro içerisinde bindirme yaklaşımı enterpolasyon tekniği ile 10cm çözünürlüğünde SYM verileri üretilmiştir (**Şekil 5e**). Bu SYM içerisindeki bazı temizlenmeyen yüzeye ait objelerin temizlenmesi ve SYM'nin son şekline getirilmesi için Quick Terrain Modeler (v. 8.2) yazılımı kullanılmış (**Şekil 5f**) ve İHA SYM verisi oluşturulmuştur.

### 3.2. Yağış-Akış Modeli ve Akım Verisinin Üretilmesi

Ulus Çayı havzası içerisinde uzun yıllar ölçüm yapan bir Akarsu Gözlem İstasyonu (AGİ) bulunmamaktadır. Ancak havzada Emirce Orman Deposu içerisinde 2016 yılından günümüze ölçüm yapan D13A088 kodlu AGİ bulunmaktadır (**Şekil 1**). Altlık SYM verilerinin ortak alanı olan ve çalışma alanını da oluşturan Ulus yerleşmesine giriş yapan alt akarsu havzalarından ne kadar akımın geldiği ve bunun taşkın frekanslarının hesaplanabilmesi için SWAT yağış-akış modeli kullanılmıştır. Bu model içerisinde temel girdi verileri için yerleşme içerisindeki 17611 kodlu (**Şekil 1**) meteoroloji istasyonuna ait 1970-2020 yılları arasındaki veriler oluşturmaktadır. SWAT yağış-akış modeli son yıllarda hidrolojik çalışmalarda gerek iklim değişikliği (Akbaş vd., 2020) ve arazi kullanımı gerekse taşkın piklerinin hesaplanması (Akbaş ve Özdemir, 2022) gibi havza içinde gerçekleşen uzun ve kısa süreli etkileri anlamak için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Horton vd., 2021; Peker ve Cüceloğlu, 2022). Modelin en önemli özelliklerinden biri toplu, dağıtımlı ve yarı-dağıtımlı olarak adlandırılan modelleme çeşitlerinden yarı-dağıtımlı olması ve fiziksel tabanlı olmasıdır. Model, yarı-dağıtımlı olarak toprak, arazi kullanımı ve eğim (SYM'den üretilen) parametrelerini çakıştırarak hidrolojik tepki birimleri (Hydrological Response Unit-HRU) elde edilip hidrolojik süreçlerin benzeşimlerini gerçekleştirir ve bunu daha sonra havza ölçeğine taşır (Arnold vd. 1998, 2012). Hidrolojik açıdan benzeşimlerini su dengesi temelinde yapmaktadır (Neitsch vd., 2011) ve bu durum aşağıdaki Eşitlik 1 şeklinde açıklanır:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eşitlik 1}$$

Burada,  $SW_t$  toplam toprak su içeriği (mm H<sub>2</sub>O),  $SW_0$   $i$ 'nci gündeki ilksel toprak su içeriği (mm H<sub>2</sub>O),  $t$  zamanı (günlük),  $R_{day}$   $i$ 'nci gündeki yağış miktarını (mm),  $Q_{surf}$   $i$ 'inci gündeki yüzeyel akış miktarını (mm),  $E_a$   $i$ 'nci gündeki evapotranspirasyon miktarını (mm),  $w_{seep}$   $i$ 'nci gündeki toprak profilinden vadoz zona (doymamış zon) giren suyun miktarını (mm),  $Q_{gw}$   $i$ 'nci gündeki yeraltı suyu (geri dönüş) miktarını göstermektedir.

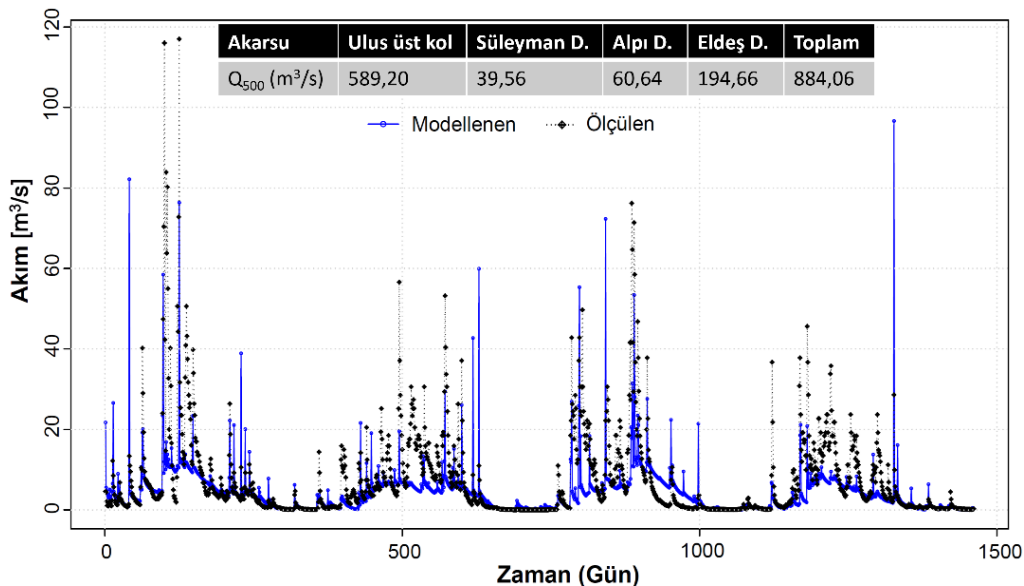
SWAT yağış-akış modeli için kullanılan veri tabanı iki kısma ayrılabilir. Bunlar, sırasıyla fiziksel veri setleri ve iklim veri setleri şeklindedir. Fiziksel iklim setleri arazi kullanımı, toprak ve SYM'dir. Arazi kullanımı veri tabanı için yaygın şekilde kullanılan ve yaklaşık 100 metre çözünürlüğe sahip olan Corine arazi sınıflandırması tercih edilmiştir. Corine arazi sınıflandırması daha sonra SWAT veri tabanındaki arazi sınıflandırmasına dönüştürülüp kullanılmıştır. Diğer bir veri tabanı ise gerek havza

alanı ve akarsu ağı gibi hidrografik özellikleri oluşturmak gerekse HRU veri tabanı için gerekli olan eğim özelliklerinin ortaya çıkarılması için kullanılan SYM verisidir. Bu çalışmada hem ayrıntı hem de çözünürlük bakımından 10 metre TopoSYM verisi kullanılmıştır. Toprak verisi SWAT modeli için hem yüzeysel akış koşulları hem de erozyonal faaliyetlerin hesaplanması için en önemli parametrelerden biridir. Toprak veri tabanı için ise FAO-UNESCO'nun Harmonized World Soil Database verisi kullanılmış ve modelde buna göre HRU oluşturulmuştur (<http://web.archive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>). Diğer bir veri tabanı olan iklimsel veri tabanı için 17615 kodlu Ulus meteoroloji istasyonunun 1970 ile 2020 yılları arası günlük ölçekte elde edilmiş olan yağış (mm), minimum ve maksimum sıcaklık (°C), rüzgâr hızı (m/s), bağıl nem (%), günlük güneş radyasyonu (cal/cm<sup>2</sup> olarak alınıp MJ/m<sup>2</sup> birimine çevrildi) verileri modeli çalıştırmak için kullanılmıştır. Model için veri tabanlarından biri daha olan günlük güneş radyasyonu istasyon içerisinde mevcut olmadığı için CFSR reanaliz verisinin Ulus istasyonuna en yakın olan gridli noktasından günlük olarak elde edilmiştir (Fuka vd. 2013; Saha vd. 2010). Modelin kalibrasyonu için gerekli olan AGİ verisi olarak, 4 yıllık aralığı kapsayan D13A088 kodlu Emirce-Ulus istasyonun günlük akım verileri (m<sup>3</sup>/s) kullanılmıştır. Kalibrasyon için oldukça sık faydalanılan Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) metriği tercih edilmiştir (Krause vd. 2005, Nash ve Sutcliffe, 1970).

SWAT yağış-akış modelinin kullanılması açısından öncelikle birçok dinamik modelleme parametresinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlardan ilk parametre HRU biriminin eşik

değerinin seçilmesidir. Ulus Çayı havzası için sırasıyla toprak %0, arazi kullanımı %0 ve eğim %0 seçilerek toplamda 582 ayrıntılı HRU birimi oluşturulmuştur. Diğer yandan havza içindeki buharlaşma süreçlerinin benzeşimlerini yapmak için Penman-Monteith metodu seçilmiştir (Monteith, 1965). Bu metot evaporasyon verilerine en yakın koşulları sağladığı için FAO tarafından da tavsiye edilmektedir (Allen vd. 1998). SWAT içerisinde rasyonel metot gibi yüzeysel akış üretmek için birçok yöntem bulunsun da U.S. Soil Conservation Service tarafından üretilen SCS Eğri Numarası yöntemi yüzeysel akışı üretmek için seçilmiştir (SCS, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993; Özdemir ve Elbaşı, 2015; Neitsch vd. 2011; Akbaş vd. 2020; Akbaş ve Özdemir, 2022). Buna göre elde edilen yağış-akış modelinin ilksel sonuçlara göre D13A088 ve model çıktısı arasındaki günlük NSE değeri yaklaşık olarak 0,19 bulunmuştur. Bu sonuçlarında daha da iyileştirilmesi açısından Abbaspour vd. (2015) temelinde açıklanan birçok hassas parametre dikkate alınarak SWAT modeli manuel kalibre edilmiş ve günlük NSE değeri ise 0,3 olarak elde edilmiştir (**Şekil 6**).

Ulus yerleşiminde ana akarsu koluna katılan 4 büyük alt havzanın (**Şekil 1**) çıkış noktasında bulunan akım değerlerine göre yıllık maksimum seriler yöntemi (AMAX) dikkate alınarak (Bayliss ve Jone, 1993) her yıla ait maksimum pik akım miktarları elde edilmiştir. Elde edilen pik akımlar ise daha sonra kararlı taşkın modelinde kullanılmak üzere Genelleştirilmiş Ekstrem Değer (the Generalised Extreme Value-GEV) dağılıma uydurulmuştur. GEV dağılımı sırasıyla Gumbel, Fréchet and Weibull olmak üzere üç farklı ekstrem dağılımını kapsamaktadır (Coles, 2001; Villarini et al. 2011; Salas et al. 2020) ve aşağıdaki Eşitlik 2 ile açıklanır:



**Şekil 6:** Kalibre edilmiş SWAT yağış-akış modeli sonrası ölçülen ve modellenen akımların dağılışı ve akarsulara ait 500 yıllık akım değerleri.  
**Figure 6:** Distribution of measured and modelled flows after calibrated SWAT rainfall-runoff model and 500-year flow data of the subbasins.

$$G(\chi) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{\chi - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad \text{Eşitlik 2}$$

$$\Delta t_{max} = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh_{max}}} \quad \text{Eşitlik 4}$$

Burada,  $\mu$ ,  $\sigma$  and  $\xi$  sırasıyla lokasyon, ölçek ve şekilde parametrelerdir ve AMAX örneklem değerlerinden hesaplanır.  $\xi=0$  olması durumunda dağılım Gumbel,  $\xi>0$  durumunda ise dağılım Fréchet olurken  $\xi<0$  durumunda ise dağılım Weibull olmaktadır. Her bir havzanın AMAX değerleri için 50, 100, 200, 500 ve 1000 yıllık dönüş periyotları hesaplanmıştır. Bunlardan SYM modellerinin çözünürlüklerindeki değişkenlikten ve Ulus Çayı vadisinin morfolojik yapısından dolayı suyun yayılışını daha iyi görebilmek için akarsuların 500 yıllık akım değerleri taşkın modellemesinde tercih edilmiştir (**Şekil 6**).

### 3.3. Hidrodinamik Model

Çalışmada mevcut birçok ticari ve bilimsel hidrolik yazılım arasında en basit ve kullanışlı 2 Boyutlu hidrodinamik model olan LISFLOOD-FP (v.8) yazılımı kullanılmıştır. LISFLOOD-FP genel olarak kinematik, serbest (inertial) ve ful sıg su olarak tanımlanan üç tür su yayılım modelini bünyesinde barındırır. Çalışmada yazılımda “acceleration” olarak tanımlanan LISFLOOD-ACC inertial model, sürtünmeyi, su eğimini ve yerel ivmeyi hesaplamaya dahil ettiği için basitliği ve stabil olması ve kaba yüzeyler üzerinde flüviyal, plüviyal ve kıyı taşkınlarının modellenebilmesi nedeniyle (Neal vd. 2011; Neal vd. 2012; de Almeida ve Bates, 2013; Shustikova vd. 2019) tercih edilmiştir. LISFLOOD-ACC, bir raster veri üzerinde iki boyutlu simülasyon için x ve y yönlerindeki akışları ayırıştırarak hesaplamayı basitleştirir. Hücreler arasındaki akımı (q) hesaplayabilmek için Bates ve diğerleri tarafından türetilen (2010) ve daha sonra De Almeida ve diğerleri (2012) tarafından modifiye edilen Eşitlik 3 uygulanır.

$$q_{i-1/2}^{n+1} = \frac{\left[ \theta q_{i-1/2}^n + \frac{(1-\theta)}{2} (q_{i-3/2}^n + q_{i+1/2}^n) \right] - g h_f^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_i^n - \eta_{i-1}^n)}{1 + g \Delta t n^2 \|q_{i-1/2}^n\| / (h_f^n)^{7/3}} \quad \text{Eşitlik 3}$$

Eşitlikte  $\theta$  yapay difüzyon miktarını ayarlayan bir ağırlık faktörü, g yerçekiminden kaynaklanan ivme ( $\text{ms}^{-2}$ ),  $h_f^n$  hücreler arasındaki arayüzdeki derinlik, n Manning pürüzlülük katsayısı ( $\text{sm}^{-1/3}$ ),  $\eta = h+z$  su yüzeyi yüksekliği,  $\Delta t$  zaman aralığı ve  $\Delta x$  piksel çözünürlüğüdür. Model kararlılığını sağlamak için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşuluna bağlı uyarlanabilir bir zaman adımı kullanılmış olup bu Bates ve diğerleri tarafından (2010) Eşitlik 4’te verilmiştir:

Eşitlikte,  $\alpha$  0,3 ile 0,7 arasında değişen bir kararlılık katsayısıdır. Bu çalışmada 0,5 kullanılmıştır. Modelin oluşturulmasında çalışmanın amacı olan çözünürlük değişkenliğinin etkisini net bir şekilde ortaya koymak için sınır koşulları (QFIX:  $Q_{500}$  akımları) ve yüzey pürüzlülük katsayı değeri (ortalama 0.035) bütün SYM modelleri için aynı alınmış ve kararlı akımda modellenmiştir. 500 yıllık akım değerleri MERIT, FABDEM, TopoSYM ve SYM5 verilerinde bütün Ulus Çayı havzasında Shreve dizinleme yöntemine (1966) bağlı olarak akımın havza gerisine dağıtılmasıyla modellenmesi yapılırken, LiDAR ve İHA SYM’lerinin kullanıldığı modellerde Ulus yerleşmesinde toplanan alt kolların yaklaşık 1  $\text{km}^2$ ’lik gerisinden nokta kaynaklı akım verileri kullanılmıştır. Modelin girdi-çıkı arasındaki kararlılık toleransı 0,1 olarak alınmış olup farklı modeller farklı zamanlarda girdi-çıkı akım eşitlemesine ulaşmıştır. Model sonuçlarının gerçek taşkın yayılış alanıyla doğrulaması yapılamamıştır. Çünkü bu tür çalışmalarda sıklıkla kullanılan taşkın anı çekilen radar veya optik uydu görüntüsü saha için temin edilememiştir (Özdemir, 2007). Dolayısıyla literatürde model sonuçlarının gerçek taşkınların yayılışıyla karşılaştırıldığı ve iyi sonuçların bulunduğu çalışmalara (Shustikova vd. 2019; Chone vd. 2021) ve bütün farklı modellerde SYM harici parametrelerin aynı alınmasına bağlı olarak model sonuçları doğru olarak kabul edilmiştir.

## 4. Bulgular ve Tartışma

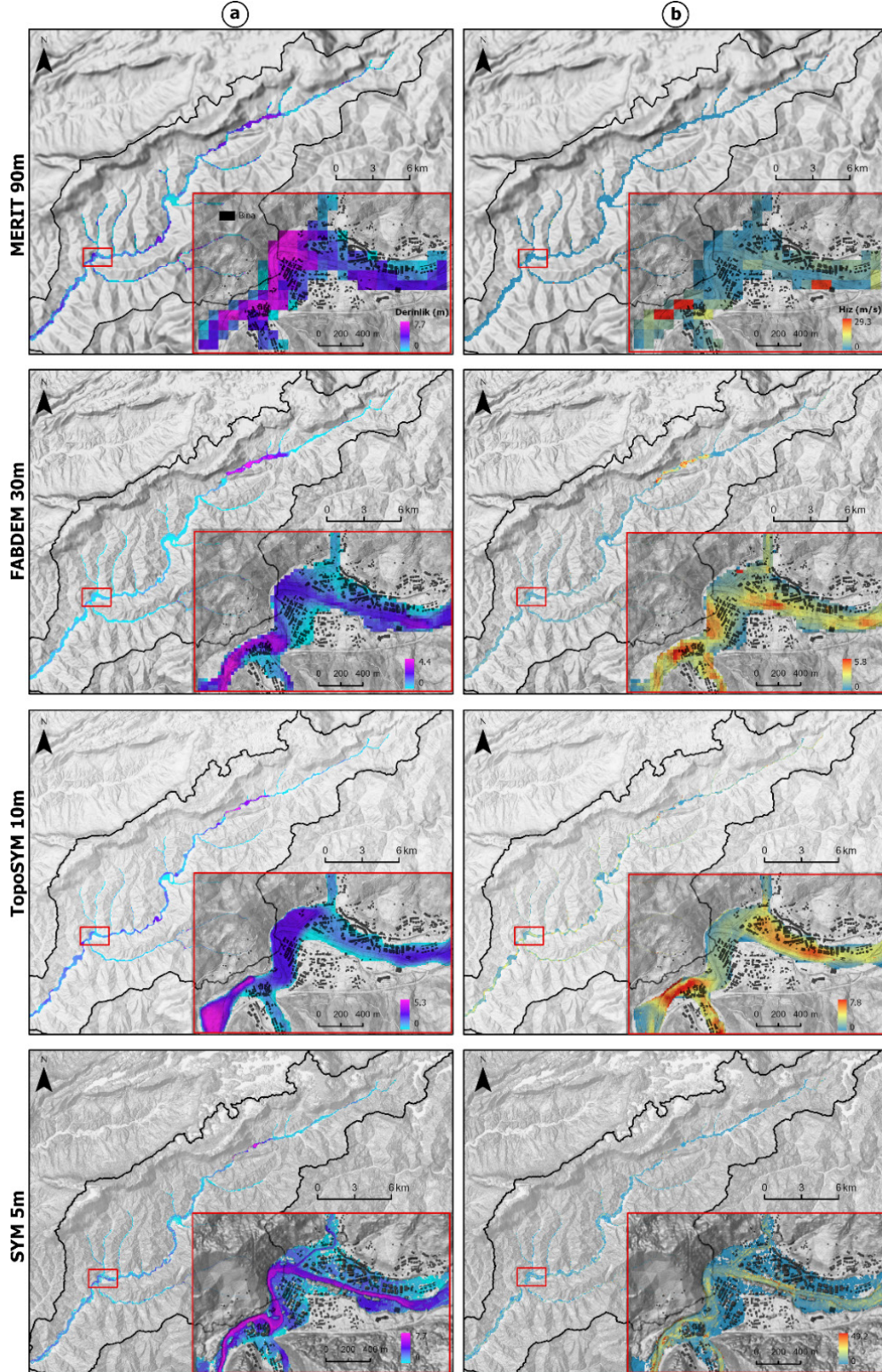
Farklı çözünürlükte ve diğer koşulların eşit kabul edilmesiyle yapılan modelleme çalışmaları neticesinde model sonuçları öncelikle taşkın suyunun kapladığı alanı, derinliği, hızı ve modelleme zamanı çerçevesinde değerlendirilmiştir. Daha sonra farklı çözünürlükte insan ve bina temelli gerçekleştirilen taşkın tehlike analizlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

### 4.1. Taşkın Modeli Sonuçları

Taşkın tehlike analizleri için gerekli olan taşkın suyu derinliği ve hızının raster verisi için veri ve yöntem kısmında belirtilen veri girişleri çerçevesinde modellenmeler gerçekleştirilmiştir. Bu modellerden MERIT, FABDEM, TopoSYM ve SYM5 verileri temelindeki modeller bütün Ulus Çayı havzası için yapılmış, Ulus yerleşmesi özelinde yüksek çözünürlüklü LiDAR ve İHA SYM temelli modellerle karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. 500 yıllık akımın havza ve Ulus yerleşmesi özelinde farklı çözünürlüklü

verilere bağlı dağılımları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir. Buna göre havza içerisindeki taşkın suyu havzanın sahip olduğu morfolojik karakterlere bağlı olarak kısmen “V” tipi vadi içerisinde ve kısmen de geniş tabanlı vadi içerisinde yayılımını sürdürmüştür.

Taşkın suyunun yayılışı, verilerin çözünürlüklerine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Burada çözünürlük olarak en düşük olan MERIT verisine ait taşkın yayılış alanı  $0,99 \text{ km}^2$  ile en büyük taşkın yayılış alanına sahiptir. Bunu sırasıyla  $0,85$

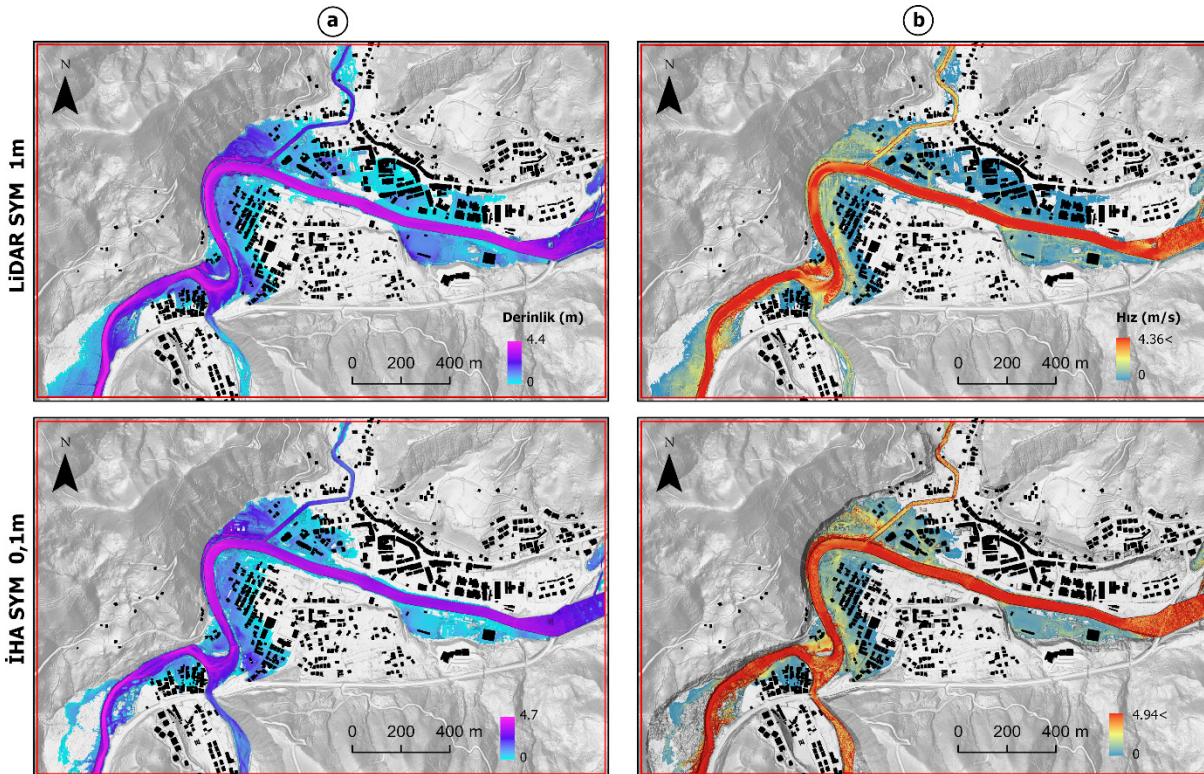


Şekil 7: MERIT, FABDEM, TopoSYM ve SYM5 verilerine ait 500 yıllık a) su derinliği ve b) hızı sonuçları.  
Figure 7: 500-year a) water depth and b) velocity results of MERIT, FABDEM, TopoDEM and DEM5 data.

km<sup>2</sup> ile FABDEM, 0,73 km<sup>2</sup> ile TopoSYM verisi takip eder. Bu sonuçlar düşük çözünürlüklü SYM verilerinin daha geniş taşkın yayılım alanına sahip olduğu sonuçlarını ortaya koyan Saksena ve Merwade (2015), Lim ve Brandt (2019) ve Xu vd. (2021) bulgularını desteklemektedir. Çözünürlüğe bağlı bu düzenli azalış SYM5 verisinde bozulur. SYM5 verisinde vadi tabanındaki bina ve ağaç topluluklarına ait yüksekliklerin varlığına bağlı olarak yayılım kısmen artarak 0,79 km<sup>2</sup>'lik alana ulaşmıştır. Dolayısıyla taşkınlarda suyun yayılımına yön veren özellikle bitki örtüsü topluluklarına ait yüksekliklerin verilerden temizlenmesi gerektiği açık ve net olarak ortaya çıkmıştır. Taşkın yayılımı yüksek çözünürlüklü verilerden LiDAR verisinde 0,54 km<sup>2</sup> olarak, İHA SYM verisinde 0,45 km<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. Ancak bu verilerde zemin yükseklik bilgisi yanında bina yükseklik bilgisi de SYM verisi içinde mevcuttur. Bunda suyun yayılımına binaların yön vermesinin gerçek taşkınlarda da yaşanması etkili olmuştur. Sonuç olarak 500 yıllık taşkın yayılımı 90m çözünürlükten 0,1m çözünürlüğe kadar Ulus yerleşmesi özelinde yaklaşık %50 oranında azalış göstermiştir (Şekil 9). Ancak 1000 yıllık ve üzeri taşkınlarda, bu çalışmada olduğu gibi geniş tabanlı vadi içerisinde bulunan akarsuların kısmen sınırlı yatak özelliklerinden dolayı tüm vadi tabanına suyun yayılması gerçekleşeceği için farklı çözünürlükler arasındaki bu farkın

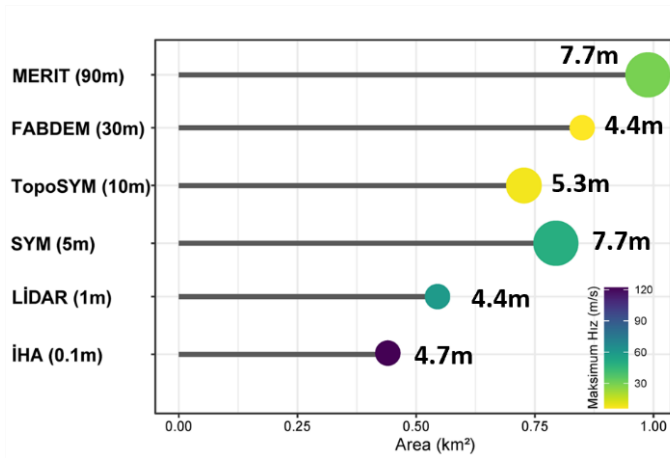
daha az olacağı tahmin edilmektedir. Bu başka bir çalışmanın konusu olduğu için burada ele alınmamıştır.

Model sonuçlarına ait 500 yıllık akımın maksimum derinlik değerleri Ulus yerleşmesi için 4,4-7,7m arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 7, 8 ve 9). Burada MERIT ve SYM5 verisi temelinde yapılan model sonuçları 7,7m, FABDEM ve LiDAR SYM verisi temelindeki model sonuçları 4,4m maksimum derinlik ile aynı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak TopoSYM verisinde maksimum derinlik 5,3m ile bu iki değer arasında çıkmıştır. Ayrıca İHA SYM verisi temelinde model sonucunda ise 4,7m ile LiDAR SYM değerine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Modeller içerisinde FABDEM ve TopoSYM verisi temelindeki sonuçlarda sırasıyla 5,8 ve 7,8 m/s maksimum hız değerleri elde edilmiştir. Bunun haricindeki MERIT verisinde 29,3, SYM5 verisinde 49,2, LiDAR verisinde 58,9, İHA verisinde ise 122 m/s olarak bulunmuştur. Bu değerler oldukça yüksektir ve gerçeği yansıtmamaktadır. Model sonuçlarına ait maksimum hız değerleri derinlikler gibi makul değerlerden ziyade, özellikle yüksek çözünürlüklü verilerde pikseller arasındaki ani düşüş ve değişkenliğe ve LISFLOOD-ACC modelinin uyum sağlayamamasına (Shaw vd. 2021) bağlı olarak büyük değerlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ancak bu maksimum hız verilerine ait piksellerin saha içerisindeki



Şekil 8: LiDAR ve İHA verilerine ait 500 yıllık a) su derinliği ve b) hızı sonuçları.  
Figure 8: 500-year a) water depth and b) velocity results of LiDAR and UAV data.

dağılımları oldukça sınırlıdır. Taşkın suyu hızlarının maksimum seviyeye ulaştığı alanlar geniş tabanlı vadi içerisinde menderesler çizerek akış gösteren akarsuların genellikle çarpak kısımlarında ve LiDAR ve İHA gibi yüksek çözünürlüklü verilerde de akarsuyun kanal içine alındığı alanlarda, özellikle de kenar kısımlarında ve bina aralarında hızların arttığı görülmüştür (**Şekil 8**). Dolayısıyla bu sonuçlar taşkın tehlike analizleri üzerinde sınırlı etkiye sahiptir.



**Şekil 9:** Farklı çözünürlüklü model sonuçlarına ait taşkın yayılış, maksimum derinlik ve hız değerleri.

**Figure 9:** Flood extent, maximum depth, and velocity values for different resolution model results.

LISFLOOD-ACC modelinin performansı 500 yıllık akım için 367,48 km<sup>2</sup> alana sahip Ulus Çayı havzasında yaklaşık 113 km uzunluğundaki akarsu ağı ve 3,36 km<sup>2</sup> alana sahip Ulus yerleşmesi alanında 4,45 km uzunluğundaki akarsular için değerlendirilmiştir. Bu alan, uzunluk ve akım değerine ait modeller Intel® Xeon® Silver 4214R CPU@ 2,40GHz ve 2,39GHz (2 İşlemcili), 24 çekirdekli ve 32GB RAM kapasiteli istasyonunda çalıştırılmıştır. Elde edilen modellerin kararlı akımlara ait girdi ve çıktı eşitlenmesindeki model zamanları ve ortaya çıkan akım (Q) ve hız (V) ortalama hata değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bütün modellerin akım ve hıza ait ortalama hataları kabul edilebilir düzeyde olup modelin güvenilirliğini

arttırıcı özelliğindedir. Havzanın tamamının dikkate alındığı ilk dört SYM verisi temelinde gerçekleştirilen taşkın modellerine ait gerçekleşme zamanları MERIT verisinden (5 dakika) SYM5 verisine (yaklaşık 3 gün) artış göstermiştir. Yani çözünürlük 90 m'den 5m'ye 18 kat artarken, modelin gerçekleşme zamanı 5 dakikadan 4152 dakikaya 830 kat artmıştır. Bunda SYM verisindeki çözünürlük artışı ve havza alanının büyüklüğü etkili olmuştur. Dolayısıyla havza temelli çalışmalarda çözünürlük arttıkça modelin gerçekleşme zamanı da artış göstermektedir. Ulus yerleşmesi özelinde gerçekleştirilen LiDAR ve İHA modelleri ise daha küçük bir alan olmasına rağmen 1m LiDAR modelinde yaklaşık 4,5 saat süren model zamanı 0,1m İHA verisinde 15 gün sürmüştür (**Tablo 1**). Dolayısıyla 0,1m çözünürlüklü veri her ne kadar taşkın yayılışında LiDAR verisine göre farklılık gösterse de sadece çok küçük alanlar için bu detayda modelleme yapılabilir. Daha büyük alanlar için çözünürlüğün 1m seviyesine düşürülmesi ve buna göre çalışmaların yapılması daha makuldür. Burada 0,1m İHA verisi 1m'ye küçültüldüğünde LiDAR verisiyle aynı taşkın yayılış, derinlik ve hız verisi elde edilebilir mi sorusu ortaya çıkar ki bu içerik gelecek çalışmanın konusudur.

#### 4.2. Taşkın Tehlike Analizi Sonuçları

Taşkın tehlike analizleri, özellikle risk çalışmalarında kullanılan, tehlikenin boyutunu ve sahadaki durumunu ortaya koyan önemli bir bileşendir (Özdemir vd. 2011). Tehlike analizlerinde seçilen taşkın büyüklüğü 20 yıllıktan 10000 yıllık tekrarlama aralığına kadar sahanın taşkından korunaklı olup olmamasına bağlı olarak değişebilir (DEFRA/EA, 2006). Bu çalışmada, sahadaki akarsu yataklarının ıslahı kısmen gerçekleştirildiğinden dolayı taşkın korumanın az da olsa mevcudiyetine bağlı olarak 500 yıllık taşkına ait (gerçekleşme olasılığı %2 olan) tehlike analizi farklı çözünürlükler temelinde Ulus yerleşmesi için gerçekleştirilmiştir. Ancak burada tehlikenin kaynağı su kütlesinin derinlik ve hızı olması nedeniyle bu bileşenlerin oluşturduğu tehlike düzeyi insan ve binalar açısından farklılık göstereceğinden iki farklı şekilde ele alınmıştır.

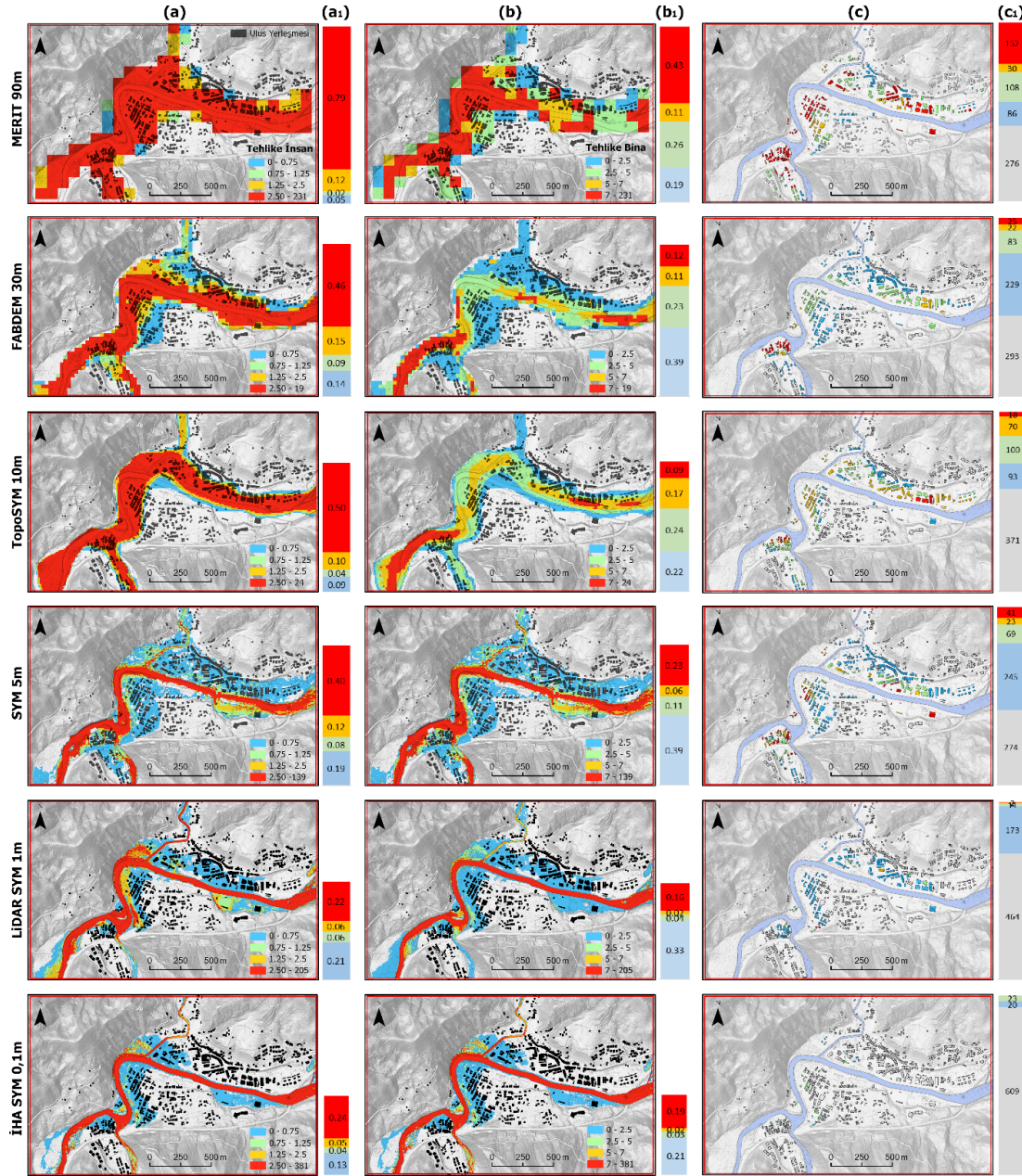
**Tablo 1:** Farklı SYM verileri temelindeki modellere ait performanslar.

**Table 1:** Model performances of different DEM data.

SYM Türü	Model Alanı	Model Zamanı (Dakika)	Q Hatası (Ortalama)	V Hatası (Ortalama)
MERIT (90m)	Tüm Havza	5,38	0.0000	0.0000
FABDEM (30m)	Tüm Havza	57,82	-0.0000	-0.0000
TopoSYM (10m)	Tüm Havza	1143,93	-0.0001	-0.0112
SYM5 m	Tüm Havza	4152,60	-0.0091	-0.9131
LiDAR SYM (1m)	Ulus Yerleşmesi	230,58	-0.0054	-0.5481
İHA SYM (0,1m)	Ulus Yerleşmesi	21445,10	-0.3087	-3.0871

**Tablo 2.** İnsan ve binalara ait taşkın tehlike sınıfları.  
**Table 2.** Flood hazard classes for people and buildings.

Türü	Tehlike Değer Aralığı	Tehlike Sınıfı	Açıklama
İnsan	<0,75	Az	Sığ akan su veya derin durgun su
	0,75 – 1,25	Orta	Çocuk gibi bazı insanlar için tehlikeli
	1,25 – 2,5	Yüksek	Birçok insan için tehlikeli
	>2,5	Çok Yüksek	Bütün insanlar için tehlikeli
Bina	<2,5	Az	Geçici, basit yapılar
	2,5- 5	Orta	İyi yapılmış ahşap binalar
	5- 7	Yüksek	Tuğla yığıma binalar
	>7	Çok Yüksek	Betonarme yapılar



**Şekil 10:** Farklı çözünürlüklere ait taşkın tehlike sınıfları a) insan için, a<sub>1</sub>) insan için alansal dağılış (km<sup>2</sup>), b) binalar için, b<sub>1</sub>) bina için alansal dağılış (km<sup>2</sup>), c) tehlike sınıflarına göre binalar, c<sub>1</sub>) bina sayıları grafiği (gri ton taşkımdan etkilenmeyen binalar).

**Figure 10:** Flood hazard classes of different resolutions a) for humans, a<sub>1</sub>) areal distribution hazard for people (km<sup>2</sup>), b) for buildings, b<sub>1</sub>) areal distribution hazards for buildings (km<sup>2</sup>), c) buildings according to hazard classes, c<sub>1</sub>) building numbers graph in building hazard classes (grey colours are buildings not affected by flooding).

Tehlike analizi için yaygın olarak kullanılan ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılan Batı Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planı'nda da kullanılan (2019) formül, DEFRA/EA tarafından geliştirilmiş olup Eşitlik 5'te verilmiştir (DEFRA/EA, 2006).

$$FHR=dx(v+0,5)+DF \quad \text{Eşitlik 5}$$

Eşitlikteki FHR taşkın tehlike oranı, d derinlik (m), v hız (m/s) ve DF debrî faktörüdür. 0,5 sabit değeri, taşkın su hızının 0 (m/s) olduğu yerlerde su derinliğine bağlı olarak minimum da olsa tehlikeyi ortaya koyar. DF değeri, havzanın hâkim arazi kullanım özelliklerine bağlı olarak belirlenir ve 0 ile 1 arasında değişiklik göstermektedir (DEFRA/EA, 2003). Bu değer çalışmanın amacına bağlı olarak 0 alınmıştır. Elde edilen taşkın tehlike raster verilerinin insan için sınıflandırılmasında DEFRA/EA (2006) tarafından ortaya konan sınıf aralıkları, binalar için ise DEFRA/EA (2003) raporunda ortaya koyduğu sınıf aralıkları kullanılmıştır (**Tablo 2, Şekil 10**). Binalara ait tehlike değeri aralıkları Pistrika ve Jonkman (2010) tarafından kısmen değiştirilmiş olsa da genel sınıf ve özelliklerinin aynı olmasından dolayı burada değişikliğe gidilmemiştir.

Elde edilen taşkın tehlike analizinde insan için belirlenen tehlike sınıflarından özellikle çok yüksek tehlike sınıfının alansal dağılışı MERIT verisinde 0,79 km<sup>2</sup> alan kaplarken bu değer LiDAR ve İHA verisinde sırasıyla 0,22 ve 0,24 km<sup>2</sup> alana düşmüştür. Yaklaşık %70 oranında gerçekleşen bu azalmada yüzey topografyasının temsil kabiliyetinin etkisi büyüktür. Çok yüksek tehlikenin yayılış özellikleri MERIT, FABDEM ve TopoSYM verilerinde benzerlikler göstermektedir (**Şekil 10a, a<sub>1</sub>**). Bunda akarsu yatak özelliklerinin veri içerisinde olmaması etkili olmuştur. Akarsu yatak formunun temsil edilmeye başlandığı SYM5 verisindeki tehlike dağılışı genel form olarak LiDAR ve İHA verilerine benzerlik gösterir. Ancak daha önce de belirtildiği gibi bitki örtüsü topluluklarına ait yükseklikler suyun yayılışındaki hataları artırıcı niteliktedir.

Bina için taşkın tehlike analizi sonuçlarında, en geniş alan kaplayan çok yüksek tehlike sınıfı düşük çözünürlüklü MERIT verisinde (0,43 km<sup>2</sup>) elde edilmiştir (**Şekil 10b, b<sub>1</sub>**). Bunda çözünürlüğün 90m olması ve kısmen sınırlı geniş tabanlı akarsu vadisi olması etkilidir. 3-4 pikselle temsil edilen vadi tabanında tehlike sınıfının 7'nin üzerinde olması suyun hareketi ve hızına bağlı olarak normaldir. Çözünürlük düştüğünde ise FABDEM ve TopoSYM'de çok yüksek tehlike sınıfının alanında bir azalma (sırasıyla 0,12 ve 0,09 km<sup>2</sup>) gerçekleşmiştir (**Şekil 10b, b<sub>1</sub>**). SYM5 ve daha yüksek çözünürlüğe sahip olan LiDAR ve İHA

verisinde akarsu yatağının tamamı ve kısmen çevresindeki alanlar çok yüksek tehlike sınıfına girdiği için alansal olarak artışa geçmiştir (sırasıyla 0,23, 0,16 ve 0,19 km<sup>2</sup>). Ancak bunlardan LiDAR ve İHA verisine ait tehlike sınıfları daha çok akarsu yatak içiyle sınırlı kalmış çok fazla taşkın yatağına çıkmamıştır. Bunu özellikle binaya göre taşkın tehlike sınıfları içinde kalan bina sayılarında görmek mümkündür. Modellenen alan içerisindeki toplam 652 binadan MERIT verisine bağlı oluşturulan çok yüksek tehlikeli sınıf içerisinde 152 bina kalırken, bu değer FABDEM'de 25, TopoSYM'de 18 binaya düşmüştür. SYM5 verisinde ise tekrar 43 binaya yükselmiştir. LiDAR verisinde bu sayı 2, İHA'da ise 0'dır. LiDAR ve İHA verilerinde çok yüksek ve yüksek tehlike sınıfına giren toplam bina sayısı sırasıyla 4 ve 0'dır. Ancak bu analizler 500 yıllık taşkın akımına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun altındaki taşkın frekanslarında bu değerlerin azalması, bunun üzerindeki frekanslarda ise artması muhtemeldir. Dolayısıyla şehir merkezleri için yapılacak taşkın risk analizlerinde daha net doğru kararların alınması bakımından çalışılacak çözünürlüğün daha ekonomik olması dolayısıyla 1m olmasına dikkat edilmelidir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada taşkınların modellenmesi açısından birtakım veri düzetmelerinin yapıldığı MERIT (90m) ve FABDEM (30m) küresel verileriyle, Türkiye'de en yüksek çözünürlüklü veriler olan TopoSYM (10m) ve SYM5 (5m) verileri ve araştırma projeleri kapsamında üretilen LiDAR (1m) ve İHA SYM (0,1m) verileri temelinde Ulus Çayı ve kollarının 500 yıllık akımları karşısındaki taşkın tehlike analiz sonuçlarının değişkenliği ortaya konmuştur. Bunlardan küresel ve Türkiye'ye ait verilere bağlı taşkın modelleri bütün havza geneli için gerçekleştirilmiş, yüksek çözünürlüklü verilerle karşılaştırılması sadece Ulus yerleşmesi özelinde yapılmıştır.

Taşkın modelleme çalışmaları özellikle yerleşmelerin üst havzalara kadar yayıldığı alanlarda, yerleşme bazlı modellemeler yapmak yerine (SYGM, 2019 örneği gibi) tüm havzadaki akarsu ağlarının içinde olduğu modelleme çalışmaları ve tehlike analizleri yapmak en doğrusudur. Ancak taşkınların modellenmesindeki düşük çözünürlüklüden yüksek çözünürlüğe kadar verinin elde edilmesinin pahalı olması ve hesaplama gücündeki zorluk ve artışlar, bu çalışmaların yüksek çözünürlüklü olarak tüm havza boyunca yapılmasını güçleştirmektedir. Düşük çözünürlüklü olan ve akarsu yatak formunun olmadığı MERIT, FABDEM ve TopoSYM verisi temelli taşkın tehlike analizlerinde yüksek taşkın tehlike sınıfı oldukça fazla yayılış göstermiştir. Yatak formunun ortaya çıkmaya başladığı SYM5, LiDAR ve İHA verilerinde ise



bu sınıfa ait alansal dağılımlarda %50'ye varan azalmalar olmuştur. Bu da bina temelli taşkın tehlike analiz sonuçlarında olduğu gibi, çok yüksek tehlike sınıfında MERIT verisinde 152 binadan LiDAR ve İHA verisinde 2 ve 0 binaya düşmesi gibi taşkına maruz kalacak ve müdahale edilecek bina sayılarının daha kabul edilebilir olmasını sağlamıştır. Bu durum taşkın yönetim planlamalarında hangi alanlara öncelik verilmesi ve müdahale edilmesinin kararlaştırılması bakımından önemlidir.

Veriler arasında insan ve bina tehlike analizleri sonuçlarına bağlı olarak düşük çözünürlüklü olan MERIT, FABDEM ve TopoSYM arasında en iyi ve kabul edilebilir sonuçlar FABDEM verisine aittir. Model zamanının özellikle tüm havza için 57,38 dakika sürmesi tehlike analiz sonuçlarıyla birlikte bu veri yapısının bölgesel ölçekli çalışmalarda kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Yüksek çözünürlüklü veriler olan SYM5, LiDAR ve İHA SYM verilerinde LiDAR verisi ön plana çıkmaktadır. Bunda LiDAR verisinin özellikle bitki örtüsü altındaki topografik yüzeylerin temsil kabiliyetinin yüksek olması en önemli etkidir. SYM5 ve İHA verileri stereo hava fotolarından üretildiği için bitki örtüsü varlığı veya temizlenme işlemlerinin zorluğu taşkın modelleme çalışmalarında birtakım güçlükler neden olmaktadır. LiDAR veya İHA verilerine tüm havza için ulaşılabilen çalışmalarda çalışmanın süresine bağlı olarak 1 ile 5 m çözünürlük arasında bir çözünürlüğe dönüştürülerek taşkın modelleme ve tehlike çalışmaları gerçekleştirilebilir. LiDAR ve İHA verilerine ulaşamadığı alanlarda veya projelerde ise tüm havza çalışmalarında etkili olması bakımından Harita Genel Müdürlüğü bünyesinde mevcut olan SYM5 verileri kullanılabilir. Ancak bu veriler üzerindeki bitki örtüsü ve şehirlere ait bina yüksekliklerinin temizlenmesi çalışmanın doğruluğunu arttırması bakımından önemlidir.

Sonuç olarak taşkın tehlike analizleri çalışılacak alana, sahip olunan veri detayına ve hesaplama gücüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Projelerde veya akademik çalışmalarda sahip olunan özelliklere bağlı olarak sonuçların değişkenlik göstereceği ve kullanılan çözünürlük çerçevesinde değerlendirilmelerinin ve risk çalışmalarının yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

**Teşekkür:** Ayrıca Abdullah Akbaş 121Y578 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, çalışma alanının içine alacak şekilde LiDAR verisini sağlayan Delta LiDAR firması ve İbrahim Şimşek'e teşekkür eder.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Yazar Katkıları:** Çalışma Konsepti/Tasarım- H.Ö., A.A.; Veri Toplama- H.Ö., A.A.; Veri Analizi/Yorumlama- H.Ö., A.A.; Yazı Taslağı- H.Ö., A.A.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi- H.Ö., A.A.; Son Onay ve Sorumluluk- H.Ö., A.A.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemişlerdir.

**Finansal Destek:** Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından OUAP(F)-2019/13 nolu projeye desteklenmiştir.

**Peer Review:** Externally peer-reviewed.

**Author Contributions:** Conception/Design of Study- H.Ö., A.A.; Data Acquisition- H.Ö., A.A.; Data Analysis/Interpretation- H.Ö., A.A.; Drafting Manuscript- H.Ö., A.A.; Critical Revision of Manuscript- H.Ö., A.A. H.Ö., A.A.; Final Approval and Accountability- H.Ö., A.A.

**Conflict of Interest:** Authors declared no conflict of interest.

**Financial Disclosure:** This study was supported by Bursa Uludağ University Scientific Research Projects Unit with the project numbered OUAP(F)-2019/13.

## KAYNAKÇA/REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, Srinivasan, R., Yang, H., & Klöve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.
- Akbas, A., Freer, J., Ozdemir, H., Bates, P. D., & Turp, M. T. (2020). What about reservoirs? Questioning anthropogenic and climatic interferences on water availability. *Hydrological Processes*, 34(26), 5441-5455.
- Akbaş, A., & Özdemir, H. (2021). Yağış-Akış Modellerinde ArcSwat Uygulaması: Bartın Çayı Havzası Örneği. In E. Akköprü, & M. F. Döker, Coğrafya Araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları (pp. 107-128). Ankara: Pegem Akademi.
- Akbaş, A., & Özdemir, H. (2022). Tüm modeller yanlıştır, ancak bazıları faydalıdır: Akım Gözlem İstasyonu bulunmayan havzalarda düşük (kurak) ve yüksek (taşkın) akım davranışlarının belirlenmesi. *Journal of Geography-Coğrafya Dergisi*, (45), 33-46.
- Akyürek, S. Z., Yıldız, S., & Aydın, A. (2018). 1/25 000 Ölçekli Standart Topoğrafik Haritalardan Elde Edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Analizi.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9), D05109.
- Aliferi, L., Salamon, P., Bianchi, A., Neal, J., Bates, P. and Feyen, L. 2014. Advances in pan-European flood hazard mapping. *Hydrol. Process.* 28, 4067–4077.
- Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., ... & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping. *Water*, 12(6), 1717.
- Apel, H., Aronica, G.T., Kreibich, H., Thielen, A.H., 2009. Flood risk analyses-how detailed do we need to be? *Nat. Hazards* 49 (1), 79-98.
- Apel, H., Thielen, A., Merz, B., Blöschl, G., 2006. A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Nat. Hazards* 38 (1-2), 79-100.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Kannan, N. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.

- Arnold J.G., Srinivasan R, Muttiah, R.S., Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modelling and assessment- Part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34 (1): 73-89.
- ASPRS (2013). LAS Specification Version 1.4 – R13. USA.
- Bates, P.D., and De Roo, A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236(1): 54–77.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient twodimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387, 33–45.
- Bayliss, A. C., & Jones, R. C. (1993). Peaks-over-threshold flood database. Institute of Hydrology.
- Bhuiyan, M., Dutta, D., 2012. Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. *Nat. Hazards* 61 (2), 729-743.
- Chone, G., Biron, P. M., Belanger, T. B., Mazgaranu, L., Neal, J. C., & Sampson, C. C. (2021). An assessment of large-scale flood modelling based on LiDAR data. *Hydrological Processes*, 35, 1-13.
- Cobby, D.M., D.C. Mason, and I.J. Davenport. 2001. Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56(2): 121–138.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. UK: Springer
- CRED. 2022. 2021 Disasters in numbers. Brussels: CRED. [https://cred.be/sites/default/files/2021\\_EMDAT\\_report.pdf](https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf)
- CRED-UNDRR. 2020. Human cost of disasters, an overview of the last 20 years (2019-2020). CRED Disaster Report, Belgium.
- Çam, A., Fırat, O., & Yılmaz, A. (2013). Harita Genel Komutanlığında ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi faaliyetleri. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 11, 6.
- de Almeida, G. A., Bates, P., Freer, J. E., & Souvignat, M. (2012). Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. *Water Resources Research* 48, 1-14.
- de Almeida, G. A., & Bates, P. (2013). Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. *Water Resour. Res.*, 49, 4833-4844.
- de Almeida, G. A., Bates, P., & Ozdemir, H. (2018). Modelling urban floods at submetre resolution: challenges or opportunities for flood risk management? *Journal of Flood Risk Management*, 11, S855-S865.
- Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F.A. and Feyen, L. 2016. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources* 94, 87–102.
- DSİ. (2021). Devlet Su İşleri Veri Envanteri. [www.dsi.gov.tr](http://www.dsi.gov.tr)
- DEFRA/Environmental Agency. (2003). Flood Risks to People Phase 1. R&D Tecnical Report FD2317. DEFRA/Environmental Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme. UK.
- DEFRA/Environmental Agency. (2006). Flood Risks to People Phase 2. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme. UK.
- Dutta, D., Herath, S., Musiaka, K., 2006. An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrol. Process.* 20 (6), 1365e1384.
- Dutta, D., Teng, J., Vaze, J., Lerat, J., Hughes, J., Marvanek, S., 2013. Storage-based approaches to build floodplain inundation modelling capability in river system models for water resources planning and accounting. *J. Hydrol.* 504 (0), 12-28.
- Ercanoğlu, M. (2005). Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 979-992.
- Elbaşı, E. (2022). Bölgesel Taşkın Analizleri ile Taşkın Tehlike Haritalarının Hazırlanması. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı (Yayınlanmamış Doktora Tezi), İstanbul.
- Elbaşı, E. & Özdemir, H. (2019). Farklı Çözünürlükteki Sayısal Yükselti Modellerinin 2 Boyutlu Hidrodinamik Modeller Üzerindeki Etkisi. 1. İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi. İstanbul.
- Fuka, D.R., C.A. MacAllister, A.T. Degaetano, and Z.M. Easton. (2013). Using the Climate Forecast System Reanalysis dataset to improve weather input data for watershed models. *Hydrol. Proc.* DOI: 10.1002/hyp.10073.
- Gallegos, H.A., Schubert, J.E., Sanders, B.F. 2009. Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: a case study of Baldwin Hills, California. *Adv. Water Resour.* 32 (8), 1323-1335.
- Garrote, J. 2022. Free Global DEMs and Flood Modelling—A Comparison Analysis for the January 2015 Flooding Event in Mocuba City (Mozambique). *Water* 14, 176. <https://doi.org/10.3390/w14020176>
- Guerriero, L., Ruzza, G., Guadagno, F. M., & Revellino, P. (2020). Flood hazard mapping incorporating multiple probability models. *Journal of Hydrology*, 587, 125020.
- Hawker, L., P. Bates, J. Neal, and J. Rougier. 2018. Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) simulation for flood modeling in the absence of a high-accuracy open access global DEM. *Frontiers in Earth Science* 6: Article 233.
- Hawker, L., Neal, J., & Bates, P. (2019). Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111319.
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016.
- Horton, P., Schaeffli, B., & Kauzlaric, M. (2021). Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland.
- Hutchinson, M. F. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia.
- Hutchinson, M.F., Xu, T. and Stein, J.A. 2011. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: *Geomorphometry 2011*, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, pp. 19–22. Redlands, California, USA. See: <http://geomorphometry.org/HutchinsonXu2011>.

- Karamuz, E., Romanowicz, R. J., & Doroszkiewicz, J. (2020). The use of unmanned aerial vehicles in flood hazard assessment. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12622.
- Kenward, T., D.P. Lettenmaier, E.F. Wood, and E. Fielding. 2000. Effects of Digital Elevation Model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment* 74(3): 432–444.
- Krause, P., Boyle, D. P., Båse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.
- Lim, N., and S. Brandt. 2019. Flood map boundary sensitivity due to combined effects of DEM resolution and roughness in relation to model performance. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 10(1): 1613–1647.
- Matej Vojtek & Jana Vojteková (2016) Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7:6, 1973-1992, DOI:10.1080/19475705.2016.1166874.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A., 2010. Review article ‘Assessment of economic flood damage’. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (8), 1697-1724.
- Muench, R., Cherrington, E., Griffin, R and Mamane, B. (2022). Assessment of Open Access Global Elevation Model Errors Impact on Flood Extents in Southern Niger. *Front. Environ. Sci.* 10:880840. doi: 10.3389/fenvs.2022.880840.
- Muhadi, N. A., Abdullah, A. F., Bejo, S. K., Mahadi, M. R., & Mijic, A. (2020). The use of LiDAR-derived DEM in flood applications: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 2308.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In *Symposia of the society for experimental biology* (Vol. 19, pp. 205–234). Cambridge: Cambridge University Press (CUP).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center. 2012. “Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications.” Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- Nash, J.E. Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Neal, J., Schumann, G., Fewtrell, T., Budimir, M., Bates, P., & Mason, D. (2011). Evaluating a new LISFLOOD-FP formulation with data from the summer 2007 floods in Tewkesbury, UK. *Journal of Flood Risk Management* 4, 88-95.
- Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T., & Bates, P. (2012). How much physical complexity is needed to model flood inundation? *Hydrol. Process.*, 26, 264–2282.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- OGM. (2011). Bartın, Ulus ve Safranbolu Orman İşletme Müdürlüklerine ait Orman Amenajman Harita ve Planları. Ankara.
- Ozdemir, H. (2007). Determination of Flood Extent Using Multi-Temporal & Multi-Resolution Satellite Images: A Case Study of Mahanadi River’s Floods in 2003 (Orissa-India). *Journal of Geography-Coğrafya Dergisi*, (15), 13-23.
- Özdemir, H., Akbulak, C., & Özcan, H. (2011). Çoköl Barajı (Çanakkale) çökme modeli ve taşkın risk analizi. *Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi*, 8(2), 659-698.
- Ozdemir, H., & Elbaşı, E. (2015). Benchmarking land use change impacts on direct runoff in ungauged urban watersheds. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 79, 100-107.
- Ozdemir, H., Sampson, C. C., de Almeida, G. A., & Bates, P. D. (2013). Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 4015-4030.
- Öztürk, M. Z., Çetinkaya, G., & Aydın, S. (2017). Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye’nin İklim Tipleri. *Coğrafya Dergisi – Journal of Geography*, 35, 17-27.
- Peker, İ. B., & Cüceloğlu, G. (2022). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye’deki Uygulamaları. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 1(1), 9-26.
- Pistrika, A. K., & Jonkman, S. N. (2010). Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Natural Hazards*, 54(2), 413-434.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058
- Shaw, J., Kesewani, G., Neal, J., Bates, P. & Sharifian MK. 2021. LISFLOOD-FP 8.0: the new discontinuous Galerkin shallow-water solver for multi-core CPUs and GPUs. *Geosci. Model Dev.*, 14, 3577–3602
- Saksena, S. and Merwade, V. 2015. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology* 530: 180–194.
- Salas, J. D., Anderson, M. L., Papalexiou, S. M., & Frances, F. (2020). PMP and climate variability and change: a review. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(12), 1-16.
- Sampson, C. C., Fewtrell, T. J., Duncan, A., Shaad, K., Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2012). Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Advances in water resources*, 41, 1-17.
- Sampson, C. C., Smith, A. M., Bates, P. D., Neal, J. C., Alfieri, L., & Freer, J. E. (2015). A high-resolution global flood hazard model. *Water resources research*, 51(9), 7358-7381.
- SCS, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993. *Hydrology*, National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Shreve, R. (1966). Statistical Law of Stream Numbers, *J. Geol.*, 74, 17-37
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J. C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, 64:14, 1769-1782.

- Şimşek, İ. 2020. Sel-Taşkın Modellerinde Hava Lidar Verilerinin Kullanımı: Ulus Çayı Örneği. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2019). Batı Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planı. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C., & Liu, M. (2021). The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 890-902.
- Villarini, G., Smith, J. A., Baeck, M. L., Vitolo, R., Stephenson, D. B., & Krajewski, W. F. (2011). On the frequency of heavy rainfall for the Midwest of the United States. *Journal of Hydrology*, 400(1-2), 103-120.
- Vojtek, M., & Vojteková, J. (2016). Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1973-1992.
- Timur, E., Aksay, A. ve Çelik, B. 1997. Zonguldak F-28 paftası/100 000 ölçekli jeoloji haritası, MTA Gn. Md., Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Turoğlu, H., & Özdemir, H. (2005). Bartın'da Sel ve Taşkınlar. Çantay Kitapevi, İstanbul.
- TÜİK. 2022. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları 2021. www.tuik.gov.tr
- Utlu, M., & Özdemir, H. (2020). How much spatial resolution do we need to model a local flood event? Benchmark testing based on UAV data from Biga River (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(24), 1-14.
- Yalcin, E. (2019). Two-dimensional hydrodynamic modelling for urban flood risk assessment using unmanned aerial vehicle imagery: A case study of Kirsehir, Turkey. *Journal of flood risk management*, 12, e12499.
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., ... & Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844-5853.
- Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*. 2016; 8(6):501.