

Batman Barajı'nın Yıkılması Durumunda Mansapta Taşkın Riskinin İki Boyutlu Hidrolik Modelleme ve Uydu Verileri ile Analizi

Gökçen Uysal^{1,*}, Enver Taşçı¹

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir.

Özet

Baraj yıkılmalarına bağlı taşkınların mansap bölgesine etkilerinin belirlenmesi afete hazırlık çalışmaları için önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Batman Barajı'nın yıkılması durumunda mansabındaki yerleşim yerlerinin taşkın risk durumu incelenmiştir. Çalışma, HEC-RAS modeli içerisinde bütünlük sağlayan iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, trapez gediklenerek baraj yıkılması sonucu oluşacak taşkın hidrografi elde edilmiştir. İkinci aşamada, taşkının Batman Nehri ve civarında yayılım simülasyonu 2-Boyutlu hidrodinamik modeli ile yapılmıştır. Modelin en önemli girdisi olan arazi bilgisi, 30 m mekânsal çözünürlüklü SRTM ve 12,5 m mekânsal çözünürlüklü ALOS-PALSAR uydu ürünü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerinden temin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar (su derinliği, su hızı, varış süresi ve tehlike haritaları) Harita Genel Müdürlüğünden sağlanan 5 m mekânsal çözünürlüklü Sayısal Arazi Modeli (SAM) tabanlı referans model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Taşkın debisi 3-4 saat içerisinde Batman Havaalanı'na varmakta ve nehir yatağında su hızları 5 -10 m/s arasında değişmektedir. Uydu ürünü SYM tabanlı modeller referans modele yakın ($R^2=0.79$) sonuçlar üretebilmektedir. Maksimum su seviyesi F-indeks performansına göre referans model ile aralarındaki uyum %92 mertebesinde. SRTM uydusu düşük mekânsal çözünürlüğüne rağmen ALOS-PALSAR'a göre düşük/benzer hata değerine (RMSE ve MAE) sahiptir. Taşkın debisinin şehre ulaşmadığı, fakat Atıksu Arıtma tesisi ile Batman Havaalanına kısmi etki edebileceği; kırsal bölgede 10.985 kişinin taşkın riski altında olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Sözcükler

Taşkın, Baraj Yıkılması, 2-Boyutlu Hidrolik Modelleme, Batman Şehri, Afet

Analysis of Downstream Flood Risk in the Failure of Batman Dam with Two-Dimensional Hydraulic Modeling and Satellite Data

Abstract

It is important to determine the flood effects due to dam break on the downstream region for disaster preparedness studies. In this work, the flood risk potential of the residential area located downstream of Batman Dam was investigated. The study consists of two phases which are integrated within the HEC-RAS model. In the first stage, the flood hydrograph as a result of the dam break was obtained considering a trapezoidal breaching of the dam body. In the second stage, the propagation of the flood was simulated in the Batman River and its nearby area using a 2-Dimensional hydrodynamic model. Terrain information, which is the most important input of the model, was obtained from Digital Elevation Model (DEM) based satellite product data using SRTM with 30 m spatial resolution and ALOS-PALSAR with 12.5 m spatial resolution. The results (water depth, water speed, arrival time and hazard maps) were compared with the 5 m spatial resolution Digital Surface Model (DSM) based reference model results provided by the General Directorate of Maps. The flood reaches Batman Airport within 3-4 hours and the water velocities in the river bed vary between 5-10 m/s. Satellite DEM-based models can produce results close to the reference model ($R^2=0.79$). According to the maximum water level F-index performance, the similarity between the reference model is around 92%. Despite its low spatial resolution, SRTM satellite has lower/similar error values (RMSE and MAE) compared to ALOS-PALSAR. The flood does not reach the city, but it may have a partial effect on the Wastewater Treatment plant and Batman Airport. Also, it is predicted that 10,985 people in rural areas will be affected by the flooding risk.

Keywords

Flood, Dam Break, 2-Dimensional Hydraulic Modeling, Batman City, Disaster

1. Giriş

Dünya nüfusundaki hızlı artışa bağlı şehirleşme, küresel iklim değişikliği ve arazi kullanımı gibi faktörler sonucunda sıklığı ve şiddeti artan kuraklık ve taşkın gibi ekstrem olayları yönetmek günümüzün en güncel sorunlarından biri haline gelmiştir (Wilby vd. 2008; Spence vd. 2011; Arnell ve Gosling 2016; Liu vd. 2019). Coğrafi konumu itibarıyla ülkemiz iklim değişikliğinden en çok etkilenecek ülkeler arasında yer almakta ve artan ani yağışlar, sel, kuraklık felaketleri ile karşı karşıya kalmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2012-2023) kapsamında ilan edilen ülkemizin iklim değişikliğinden etkilenebilirlik alanları içinde doğrudan iki tanesi ("Su Kaynakları Yönetimi" ve "Doğal Afet Risk Yönetimi") taşkın ile ilgilidir (URL-1 2021). Bu sebeple bu konuda yapılacak araştırma ve uygulamalar oldukça önem kazanmaktadır.

Taşkınların yönetilmesi ve afete hazırlık için sıklıkla başvurulan yöntemlerden biri de deneysel ya da bilgisayar modellerine dayalı taşkın simülasyonu yapmak; elde edilen sonuçlara göre çeşitli önlemleri almaktır. Bu konuda literatürde farklı uygulama örnekleri mevcuttur. Örneğin; Bingöl İl merkezinden geçen Çapakçur, Gayt ve Göynük çaylarının kent içerisinde oluşturacağı taşkın su derinlikleri ve yayılım alanları Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve 1-boyutlu (1B) HEC-RAS programı ile belirlenmiştir (Çeliker vd. 2020). Başka bir çalışmada Karabük ve Yenice ilçesi arasında kalan alanın, heyelan ve taşkın tehlike potansiyelleri değerlendirilip, bölgesel tehlike haritaları üretilmiştir (Ercanoğlu 2016). Gerçekleştirilen hidrolik analizler için 1B HEC-RAS ve 2-boyutlu (2B) Mike FLOOD programları kullanılmıştır. Buna göre hem heyelan hem de taşkın potansiyelinin bölgede son derece yüksek olduğu, bölgede yaşayan insanların afetlerden etkilenebileceği; ayrıca, ekonomik ve sosyal açıdan da önemli zararların ortaya çıkabileceğine dikkat çekilmiştir. Analiz sonucunda hem hız hem de yayılımın HEC-RAS analiz sonucu ile örtüştüğü görülmüştür. Efe ve Önen (2015) farklı tekerrürlere sahip taşkın debileri ile nehir taşkın analizleri yaparak, Batman Çayı'nın su yüzü kotlarını belirlemiştir. Çalışmada, AutoCAD Civil 3D programı ile çalışma alanından 165 adet en kesit alınmış, bu kesitler 1B hidrolik analiz yapılmak üzere HEC-RAS programına aktarılmıştır. Yapılan analiz sonucunda birçok enkesitin Q_{50} tekerrür debisini aşan değerleri geçirmekte yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Batman Çayı'nın geniş dere yatağı bulunmasına karşı olası yüksek tekerrürlü taşkınlarla ciddi can ve mal kayıplarının olacağı öngörülmüştür. Oğuz vd. (2016) Artvin ili için CBS teknikleri ile taşkın risk alanlarını belirlemiştir. Modelleme aşamasında, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi uygulanmış; yağış, jeoloji, eğim, bakı ve arazi kullanımı gibi haritalardan yararlanılmıştır. Tüm bu haritalara ağırlık dereceleri işlenerek çakıştırılmış ve sonuçta bölgede taşkın etkileyeceği (riskli) alanlar elde edilmiştir. Taşkın çalışmaları baraj membaında yer alan yerleşim yerlerini de kapsayacak analizler ya da bütünleşik modelleri içerebilmektedir. Şensoy vd. (2018) Yuvacık Barajı'nın rezervuar işletme kararlarının alınmasında çeşitli ve birbiriyle entegre simülasyon modelleri kullanarak bir karar destek sistemi oluşturmuştur. Baraj gölüne katılan akımların atmosferik-hidrolojik model entegrasyonu HEC-HMS programı ile hesaplanmıştır. HEC-ResSim ve HEC-RAS modelleri sırası ile rezervuar simülasyonu ve taşkın analizi için çalıştırılarak erken uyarı için kullanılabilir bir sistem geliştirilmiştir.

Diğer olası durum ise yerleşim yerine yakın olan barajların çeşitli sebeplerle (aşma, borulanma, zemin problemleri, kayma vb.) kısmi (gediklenerek) ya da tamamen yıkılması sonucu yerleşim yerlerinde yol açacakları felaketlerin değerlendirilmesidir. Güney vd. (2014) Ürkmez Barajı ve mansap bölgesinin modelini oluşturarak, barajın ani yıkılması durumunda oluşacak taşkın dalgalarının yayılmasını deneysel olarak araştırmış ve yatay ölçeği 1/150 ile düşey ölçeği 1/30 olan fiziksel modelde baraj gölü ve baraj mansabından denize kadar olan yerleşim yerini modellemiştir. Tayfur (2013) Ürkmez Barajı'nda trapez gedik ve üçgen gedik şeklindeki kısmi yıkılma ve ani yıkılma senaryoları gerçekleştirmiştir. Taşkın dalgasının barajın mansap bölgesindeki yayılımı, 2B olarak FLO-2D yazılımı ile modellenmiştir. Su derinliği ve taşkın dalgası hızının baraj çıkışında ve yerleşim yerlerindeki değerleri, taşkın dalgasının baraja yakın bölgeyi ne kadar sürede etkilediği, ne kadar sürede denize ulaştığı ve kaç dakika sonra şiddetini tamamen yitirdiği çalışılmıştır. Devamında ise Özgenç-Aksoy (2019) tarafından yine aynı bölgede baraj yıkılması durumunda mansap bölgesi bitki örtüsünden kaynaklı pürüzlülüğün taşkın dalgası yayılımı üzerine etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Elçi vd. (2017) Porsuk Barajı ve Alibey Barajı'nın yıkılması durumunda oluşacak taşkın debisinin mansapta nasıl ilerleyeceğini 1B, yerleşim bölgelerinde nasıl ilerleyeceği ise 2B modellemelerle araştırmıştır. Baraj yıkılması HEC-RAS programı ile 3 adımda modellenmiştir. Önce hazneye giren akım hazne boyunca ötelenmiş, sonra baraj gediklenme özellikleri tahmin edilmiş ve en son baraj mansabında akım ötelenerek modelleme oluşturulmuştur. 1B analiz için HEC-RAS, 2B analiz için FLO-2D programı kullanılmıştır. Duvan ve Yıldız (2020) Kızılırmak üzerinde yer alan toprak dolgu tipindeki Kapulukaya Barajı'nın olası yıkılma sonrasına ait pik debisinin tahmini ve mansap bölgesinde taşkın etkilerinin araştırılmasını hedefleyen bir çalışmada, HEC-RAS programı ile baraj mansabında 1B taşkın öteleme yapılarak pik debinin çalışma alanındaki yayılımı ve barajdan yaklaşık olarak 12 km mesafede yer alan Bahşılı ilçesi sınırları içerisindeki Celal Bayar rekreasyon alanına ve Kızılırmak üzerindeki Bahşılı karayolu köprüsüne olan etkilerini araştırmıştır.

Bu konuda uluslararası literatürde de devam eden bir ilgi bulunmaktadır. Qi ve Altınakar (2012) baraj yıkılması taşkın yönetiminde kullanılmak üzere geliştirdikleri CBS tabanlı karar destek sistemini test etmek için taşkın modelleme kısmında HEC-RAS ve taşkın zararları tespitinde ise HEC-FDA yazılımlarını kullanmışlardır. Quiroga vd. (2016), Bolivya Amazonyası'nda sürekli olarak Mamore nehri tarafından sular altında kalan Llanos de Moxos'un geniş ovalarında HEC-RAS simülasyonu çalıştırmıştır. Sayısal modelden elde edilen sonuçları taşkın olayının uydu görüntüleri ile karşılaştırmış ve model simülasyonunun iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir. Psomiadis vd. (2021) güney Girit Adası'ndaki Bramianos Barajı'nın yıkılması durumunda mansap bölgesine etkisini HEC-RAS ve iki farklı uzaktan algılama verisi (insansız hava aracından elde edilen Sayısal Arazi Modeli (SAM) [Digital Surface Model] ve Sentinel-2 uydusu tabanlı Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) [Digital Elevation Model] kullanarak değerlendirmiştir. Karim vd. (2021) yaptıkları bir çalışmada HEC-RAS modeli kullanarak Al-Udhaim Barajı'nın yıkılması durumunda taşkın dalgasının yayılımını modellemişlerdir. Baraj gediklenmesi sonucunda elde edilecek hidrograf HEC-RAS modeli içinde elde edilmiştir.

Çalışmanın hidrodinamik model çıktıları mansap bölgesinde su yüzü kotu, ulaşma süresi gibi farklı açılardan değerlendirilmiştir. [Tedla vd. \(2021\)](#) ise HEC-HMS hidrolojik modelini HEC-RAS modeli ile birlikte çalıştırarak Etiyopya’da yer alan Kesem dolgu barajının borulararak yıkılması durumunu analiz etmişlerdir. Yine bu çalışmada sınırlı veriye sahip bölgelerde risk bölgelerinin ve afet sonuçlarının öngörülmesinde 2B hidrodinamik modellerin zorlukları belirtilerek geliştirilecek farklı bütünsel yöntemlerin önemi vurgulanmıştır.

Taşkın modelleri geçmişte sıklıkla 1B olarak yapılmış olup günümüzde St. Venant denklemlerinin tam veya yaklaşık değerlerini çözen sayısal şemalara sahip 2B türleri önem kazanmakta ve uygulamaları artmaktadır ([Quiroga vd. 2016](#); [Mukolwe vd. 2016](#); [Karim vd. 2021](#); [Tedla vd. 2021](#)). 1B hidrolik modelleme sonuçlarının nehir taşkınlarının yükselme ve alçalma durumlarında iyi sonuç verirken oldukça kararsız hidrografa sahip baraj yıkılma senaryolarında yetersiz kaldığına dikkat çekilmektedir ([Qi ve Altınakar 2012](#)). Bu tür denklemleri çözmek, özellikle çeşitli kesitlere sahip açık kanallardan oluşan bir ağ için çok karmaşık ve zaman alıcı olduğundan, uygun yazılım kullanılmalıdır. Mevcut literatürde bu uygulamalar kısıtlı olup afetlere hazırlık kapsamında önerilen bu çalışmada ise yaygın olarak kullanılan ABD Ordusu Mühendisler Birliği (USACE, United State Army Corps of Engineers) tarafından geliştirilen 1B Hydrological Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) modelinin yanı sıra ülkemizde henüz çok fazla uygulaması yapılmamış olan 2B HEC-RAS hidrolik model çalıştırılarak farklı yıkılma senaryosu ve uydu verileri ışığında model performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen model çıktıları sonrasında ise farklı taşkın haritaları üretilmiştir. Çalışmanın yenilikçi tarafı, özellikle taşkın kaplı alanlar için 2B hidrodinamik analiz ve güncel uydu verisine dayalı daha iyi bir modelleme sisteminin geliştirilecek olmasıdır. Bu şekilde çalışmanın, arazi verisinin pahalı olduğu ya da verisi kısıtlı bölgelerin afet çalışmalarına katkı sunması da hedeflenmektedir.

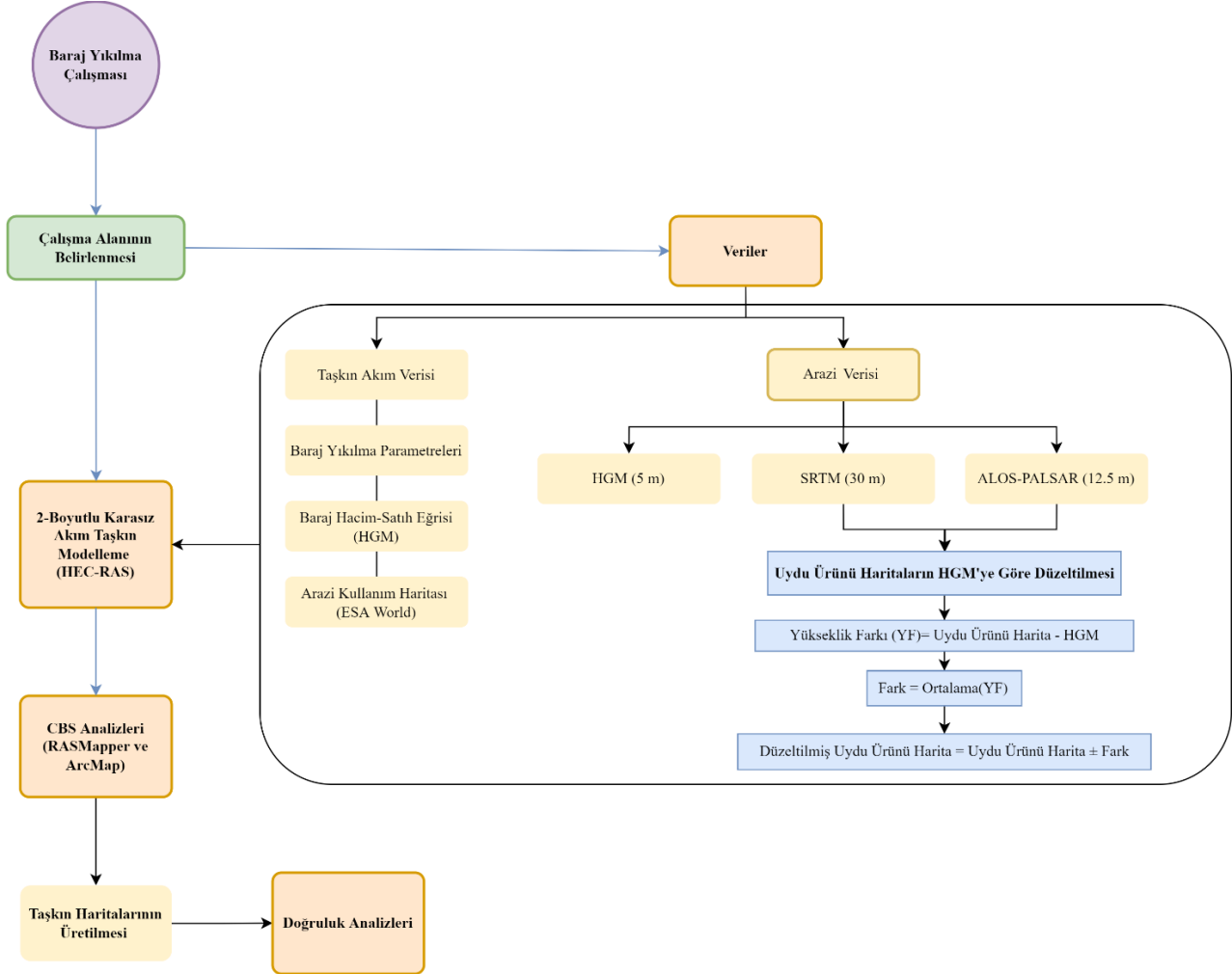
Çoğu gelişmekte olan ülkede nehirlerin geometrik tanımını ve taşkın simülasyonunu üretmek için topoğrafik haritalar kullanılır ([Azizian ve Brocca 2020](#)). 2B hidrodinamik model çalışmaları ise gridlenmiş veri formatı (yaygın kullanılan format olan ve kolayca elde edilemeyen arazi verisi) gerektirir. Doğru bir hidrodinamik model kurmak ve tutarlı sonuçlar elde edebilmek için yeterince detaylı (yüksek çözünürlüklü) ve doğru bir arazi modeline sahip olmak esastır. [Patro vd. \(2009\)](#) Hindistan’da bulunan Mahanadi Nehri taşkınlarını modellemek için 90 m çözünürlüklü SRTM SYM verisini 2B MIKE21 modelinde kullanmıştır. [Kim vd. \(2020\)](#) taşkın modellemede SYM verisinin önemini vurgulayarak SRTM ve Sentinel-2 ürünü görüntüleri girdi alan yapay sinir ağına SRTM verisini iyileştirerek, geliştirilen ürünün taşkın modelleme çalışmalarında daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. [Muthusamy vd. \(2021\)](#) yaptıkları çalışmada 1 m ile 50 m arasında değişen çözünürlüklere sahip SYM verisi kullanarak mekânsal çözünürlüğün kentsel akarsu taşkın modelleme çıktıları üzerindeki etkisinin temel nedenlerini araştırmıştır. Sonuçlara göre çözünürlük 1 m’den 50 m’ye düşürüldüğünde, taşkın boyutunda %30’luk, ortalama taşkın derinliğinde ise %150’lik bir artış olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada ise uzaktan algılama verileri gibi yenilikçi metodların baraj yıkılma sonuçlarını analiz etmede karar verici ve planlama yapan mühendisler ve paydaşlar için değerli sonuçlar sağlayabileceğine dikkat çekilmektedir ([Psomiadis vd. 2021](#)). Bu sebeplerle bu konuda yapılan çalışmalar literatüre katkı sağlamakta ve ücretsiz küresel ürünler veri kısıtlı bölgelerde iyi bir alternatif sunmaktadır. Örneğin; oldukça güncel bir çalışmada ([Khojeh vd. 2022](#)) farklı çözünürlükte uydu ürünü SYM’leri (ALOS-12,5 m, SRTM-30 m, SRTM-90 m, and ASTERv3-30 m) HEC-RAS modelinde karşılaştırarak ALOS ve SRTM-30 m SYM’lerin tutarlılığının daha yüksek ve hata oranının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, öncelikle Batman Nehri’nin mansabında bulunan kil çekirdekli ve kaya dolgululu Batman Barajı’nın kötü durum senaryosunda (baraj rezervuarının dolu olduğu ve Q_{500} taşkın debisinin baraj rezervuarına girerek yıkılması durumunda mansap bölgesinde HEC-RAS 2B hidrodinamik taşkın analizini gerçekleştirmektir. Uzaktan algılama uydu ürünleri, onlarca yıldır birçok hidrolojik uygulamada düşük maliyetli bir alternatif haline gelmiştir, ancak yatay ve dikey çözünürlükler nedeniyle hidrolik uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Bu sebeple ikincil amacı ise 2B modellerin en önemli girdilerinden olan iki farklı uydu ürünü SYM verisini test ederek Harita Genel Müdürlüğü (HGM)’den temin edilen 5 m mekânsal çözünürlüklü SAM verisi tabanlı model sonuçları ile karşılaştırmaktır. Kullanılan uydu ürünü veriler 30 m kaba çözünürlüklü Mekik Radar ve Topoğrafya Görevi [Shuttle Radar and Topography Mission, SRTM] verisi ile yeni yayımlanmış güncel 12,5 m orta çözünürlükte Gelişmiş Kara Gözlem Uydusu – Faz Dizi tipi L-bant Sentetik Açıklıklı Radar [Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, ALOS PALSAR] verisidir.

2. Materyal ve Yöntemler

Taşkın kaplı alanların modellenmesi hidrolik modelleme yardımı ile sıklıkla açık kanal hidroliği denklemlerine dayanmaktadır. 1B modeller yapıları gereği su akışını tek yönde çalıştırarak özellikle dar vadilerde uygun sonuçlar üretebilmektedir. Fakat arazinin genişlediği ve su akışının her iki yönde olduğu (özellikle yerleşim yerinin düzlük alanda olması sebebiyle taşkın yayılacağı bilinmektedir) taşkın alanlarının 2B modellerde çalıştırılması gerekmektedir. Arazi bütününde bu denklemlerin uygulanması ise farklı tasarım aşamaları, farklı veriler ve hedeflenen çıktılara göre değişkenlik göstermektedir. Baraj güvenliğinin bir yönü de “Baraj yıkılırsa ne olur?” sorusuna cevap vermektir. HEC-RAS yazılımı ile baraj yıkılmasının sonuçları değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada, 3 farklı altlık kullanılarak Batman Barajı’nın (üzerinden aşarak) yıkılma durumunda nehir taşkın modelleme ve taşkın etkilerinin tespiti incelenmiştir.

Çalışma iki temel adımda kurgulanmıştır. Birincisi baraj yıkılması ile taşkın hidrografi üretilmesi, ikincisi ise baraj yıkılma hidrografını sınır şartı kabul eden 2B taşkın yayılım modelidir. Her iki aşama da bütünlük bir şekilde HEC-RAS programında çalıştırılmıştır. Şekil 1'de çalışmaya ait akış diyagramı sunulmuştur. Buna göre; belirlenen Batman Barajı çalışma alanı için ilgili veriler temin edilerek (arazi yükseklik verisi [SYM/SAM], akım verisi, arazi kullanım verisi vb.) HEC-RAS 6.0 programında bütünlük baraj yıkılma ve taşkın modeli oluşturulmuştur. Arazi modeli için 3 farklı altlık kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunlar: HGM'den temin edilen 5 m mekânsal çözünürlüklü SAM verisi ile uydu ürünü orta ölçek 12,5 m mekânsal çözünürlüklü ALOS-PALSAR ile daha kaba 30 m mekânsal çözünürlüklü SRTM SYM verileridir. 2B alan oluşturulması ile elde edilen 2B sonuçların analizinde HEC-RAS güncel sürümünde sunulan HEC-RAS Mapper ara yüzü ve ArcMap CBS programından faydalanılmıştır.



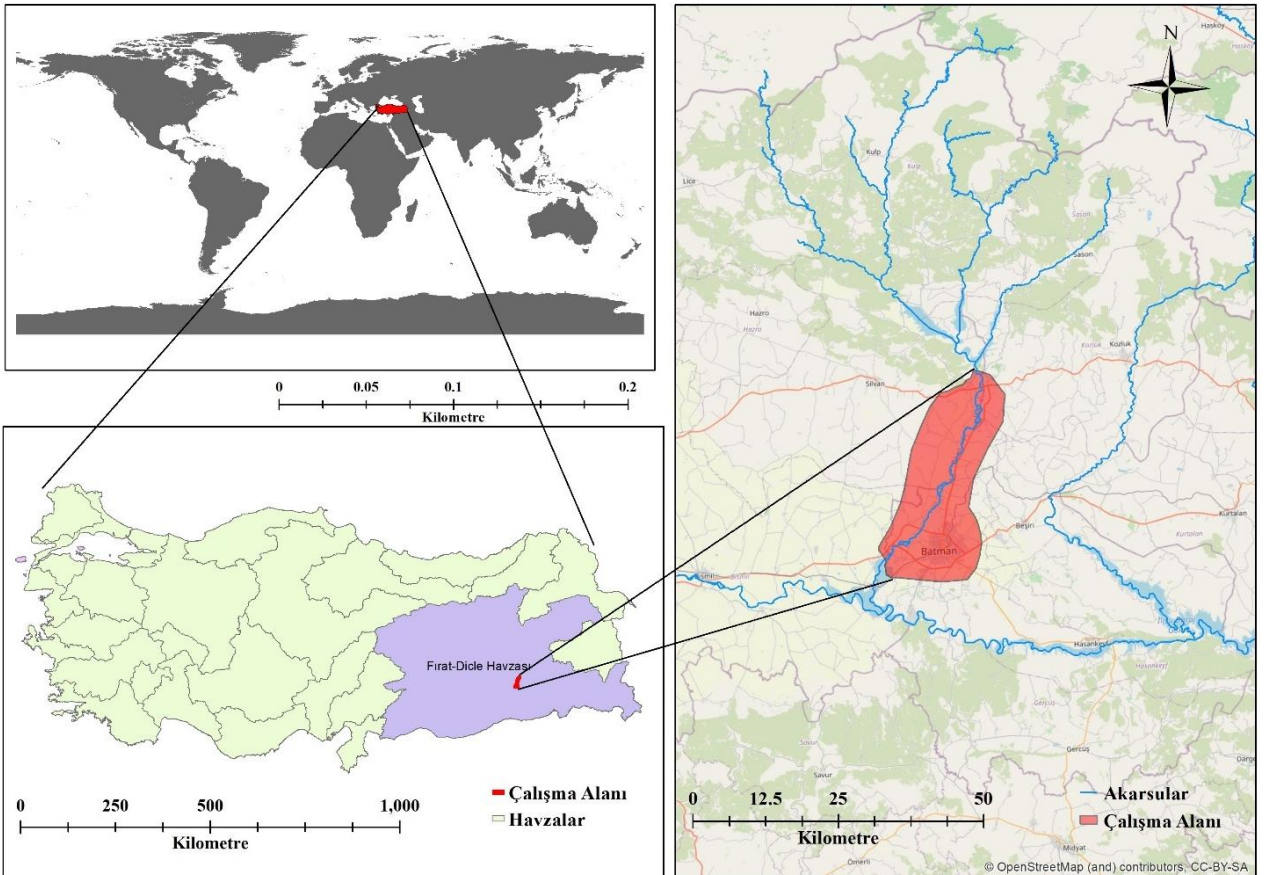
Şekil 1: Çalışma akış diyagramı

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Dicle Nehri'nin bir kolu olan 120 km uzunluğundaki Batman Çayı'nın üzerinde yer alan Batman Barajı ve baraj mansabındaki menderesli bölümü seçilmiştir (Şekil 2). Düşük eğimli bir yatağa sahip olması nedeniyle sık sık akım yatağını değiştiren Batman Çayı, aynı zamanda birçok yerleşim yerinden de geçerek olası bir taşkın durumunda büyük zararlar verebilmektedir. Nehir zemininin 5 m'yi bulan alüvyonal katmana sahip olması ve zeminin kil ve silt gibi zemin tiplerinde olması sebebiyle geçirgenlik çok azdır. Şekil 3'te çalışma alanının Türkiye ve bulunduğu havza üzerindeki coğrafi konumu sunulmuştur. Batman Barajı, 2003 yılından beri hidroelektrik, taşkın kontrolü ve sulama amaçlı hizmet vermektedir ve olası bir yıkılma durumunda etkilerinin önceden bilinmesi can ve mal kaybının en aza indirilmesi açısından önem arz etmektedir. Tablo 1'de Batman Barajı'na ait fiziki özellikler sunulmuştur.



Şekil 2: Çalışma alanı baraj mansabı Batman Nehri uydu görüntüsü (URL-2 2021)



Şekil 3: Çalışma alanının Türkiye ve bulunduğu havza üzerindeki coğrafi konumu

Tablo 1: Baraja ait fiziksel veriler (DSİ 2016)

Nehir	Batman
Yer	Batman-Diyarbakır
Amaç	Sulama, Enerji, Taşkın Kontrol
Drenaj Alanı (km ²)	4.015
Rezervuar Alanı (km ²)	52
Toplam Rezervuar Hacmi (hm ³)	1.250
Aktif Hacim (hm ³)	762
Kret Kotu (m)	668,5
Kret Uzunluğu (m)	530
Temelden Yükseklik (m)	85
Talvegden Yükseklik (m)	72,5
Normal Su Seviyesi (m)	665
Dolusavak Tipi	Karşıdan alışı, radyal kapaklı
Dolusavak Kapak Sayısı	4
Dolusavak Kapasitesi (m ³ /s)	8.210
Kurulu Güç (MW)	198

2.2. Arazi Yükseklik Verisi

Günümüzde hidrolik modelde ihtiyaç duyulan araziye ait topoğrafik ve morfolojik bilgilere, uydu verileri ve hava fotoğrafları kullanılarak ulaşılabilmektedir. Topoğrafyanın sayısal gösterimi olan altlıklar günümüzde, farklı uydu verileri, arazi ölçümleri vb. şekilde üretilebilmektedir. Uydu verileri yükseklik değerleri algoritmalarındaki farklılıklar sebebi ile birbirinden farklı olabilmektedir. Bu bağlamda [Azizian ve Brocca \(2020\)](#) çalışmasında uygulanan yöntem benzer şekilde SRTM ve ALOS-PALSAR SYM verileri taşkın çalışmasında kullanılmadan önce HGM'den elde edilen SAM altlık referans alınarak düzeltme yapılmıştır. Küresel uydu ürünleri ilgili web adreslerinden ücretsiz olarak indirilebilmektedir.

Çalışmada kullanılan altlıklar:

- HGM SAM: Stereo hava fotoğraflarından otomatik eşlemeyle üretilmiş, arazi topoğrafyasındaki tüm detayları kapsayan, yüksek çözünürlüklü (5 m) SAM verisi HGM'den temin edilmiştir ([URL-3 2021](#)).
- ALOS-PALSAR SYM: Orta ölçek çözünürlüklü (12,5 m) uydu verisi SYM "Alaska Satellite Facility" internet ara yüzünden indirilmiştir ([URL-4 2021](#)).
- SRTM SYM: Kaba ölçek çözünürlüklü SRTM (30 m) uydu verisi SYM "EarthExplorer" ara yüzünden indirilmiştir ([URL-5 2021](#)).

2.3. Baraj Yıkılma Analizi ve İki Boyutlu Hidrolik Modelleme

Baraj yıkılmasının modellenmesi ve ortaya çıkan hidrografın mansapta ötelenerek taşkın kaplı alanların tespiti birçok hesap adımını gerektirmektedir. Bu çalışmada baraj yıkılma analizi ve 2B hidrolik modelleme için HEC-RAS 6.0 programı kullanılmıştır. HEC-RAS paket programı ücretsiz olması ve dünyada birçok çalışmada kullanılması sebebi ile önplana çıkmaktadır. Program doğal akarsular ve sonradan inşa edilmiş açık kanallardaki akımların bir ve iki boyutlu hidrolik hesabını gerçekleştirmek üzere geliştirilmiş grafik tabanlı, kapsamlı bir yazılımdır ([USACE HEC 2021](#)). Program kararlı ve kararsız akımlarda su yüzü profili hesaplamaları, sediment taşınım/hareketli taban hesaplamaları, su kalitesi analizleri ve birçok hidrolik yapı hesaplamalarını yapabilmektedir. Sonuçların tablo ve grafiksel olarak görüntülenmesi, taşkın yayılma haritalarının oluşturulması ve animasyonu, raporlanması ve depolanması yapılabilmektedir. Yeni sürümlere eklenen HEC-RAS Mapper özelliği ile program CBS tabanlı işlemler de (veri sağlama, kesit elde etme, sonuçların görselleştirilmesi) kolaylıkla yapabilmektedir. 2B kararsız akış modellemesi (St. Venant denklemleri veya Difüzyon Dalgası denklemleri) ve aynı zamanda birleşik 1B ve 2B kararsız akış öteleme gerçekleştirilebilir. HEC-RAS'taki 2B akış alanları, ayrıntılı 2B kanal modelleme, ayrıntılı 2B kanal ve taşkın yatağı modelleme vb. gibi çeşitli şekillerde de kullanılabilir.

Ortaya çıkan taşkın dalgası, kararsız akış denklemleri kullanılarak mansaba yönlendirilir. Barajlar, "Inline Structure" editörü veya "SA/2D Area Connection" (2B modelleme için) kullanılarak HEC-RAS içinde modellenmektedir. Bu düzenleyicilerin her biri, kullanıcının bir toprak dolgu set koymasına, kontrolsüz dolusavakları ve bentleri, kapaklı açıklıkları (radyal ve savak kapakları), menfezleri, anahtar eğrilerini ve deşarj salınımlarının zaman serilerini tanımlamasına izin verir. Barajın membaindaki rezervuar göl alanı, enkesitler, depolama alanı veya "2B Akış Alanı" ile modellenir. Bu çalışmada baraj yıkılması modeli "Geometrik Veri" editörü altında "SA/2D Area Connection Breach Data" modülünde tanımlanmıştır. Bu modül kullanıcı tarafından belirlenecek baraj fiziksel özellikleri ile gediklenme parametrelerini manuel olarak girmeye imkân tanımaktadır. Baraja ait fiziksel veriler Devlet Su İşlerinden (DSİ) temin edilmiştir.

Baraj yıkılma senaryosu olarak üzerinden aşma (overtopping) ve bunun sonucunda gediklenerek (breaching) yıkılma kurgusu yapılmıştır. Fiziksel veriler ve gediklenme parametreleri programda ilgili modüle girilmiş ve buna göre oluşan baraj en kesiti ve trapez gediklenecek kısım Şekil 4’te gösterilmiştir.

Baraj gediklenme parametreleri hesaplanırken baraja ait kret kotu, yıkılma anındaki su seviyesi, gediklenme alt yüksekliği, yıkılma anındaki rezervuar su hacmi ve yıkılma tipi bilgileri dikkate alınarak hesap yapılmaktadır. Bu çalışmada gediklenme hesabı literatürde de (Psomiadis vd. 2021; Haltas 2016a; Haltas 2016b; Zhang vd. 2009) sıklıkla kullanılan Froehlich (2008) yöntemi (Denklemler 1-2) ile gerçekleştirilmiştir. Froehlich (2008)’e göre, ortalama yan eğimler, üstten aşarak gediklenme için 1H:1V, borulanma ve sızıntı için ise 0,7H:1V olmalıdır. Gediklenme parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Rezervuarın su yüzü kotu ile yükseklik/hacim eğrisi, memba sınır koşulu olarak tanımlanmış; savak katsayısı 2,6 olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2: Gediklenme parametreleri

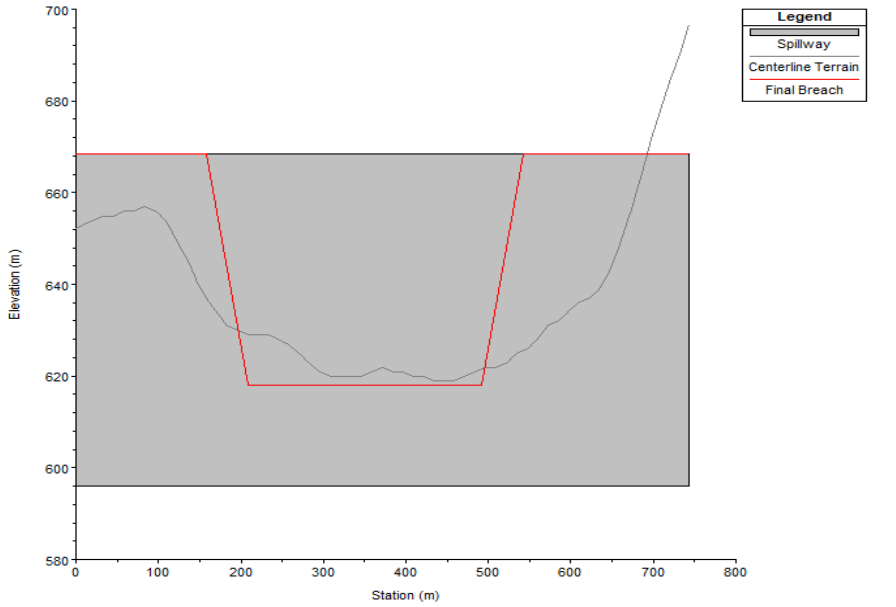
Parametreler	Değer
Gedik alt yüksekliği (m)	618
Gediklenme anındaki su yüksekliği (m)	668,5
Gediklenme anındaki rezervuar hacmi (1000 m ³)	1250000
Son gediklenme alt genişliği (m)	284
Gedik oluşma zamanı (saat)	3,92

$$B_{ave} = 0.27K_0V_w^{0.32}h_b^{0.04} \quad (1)$$

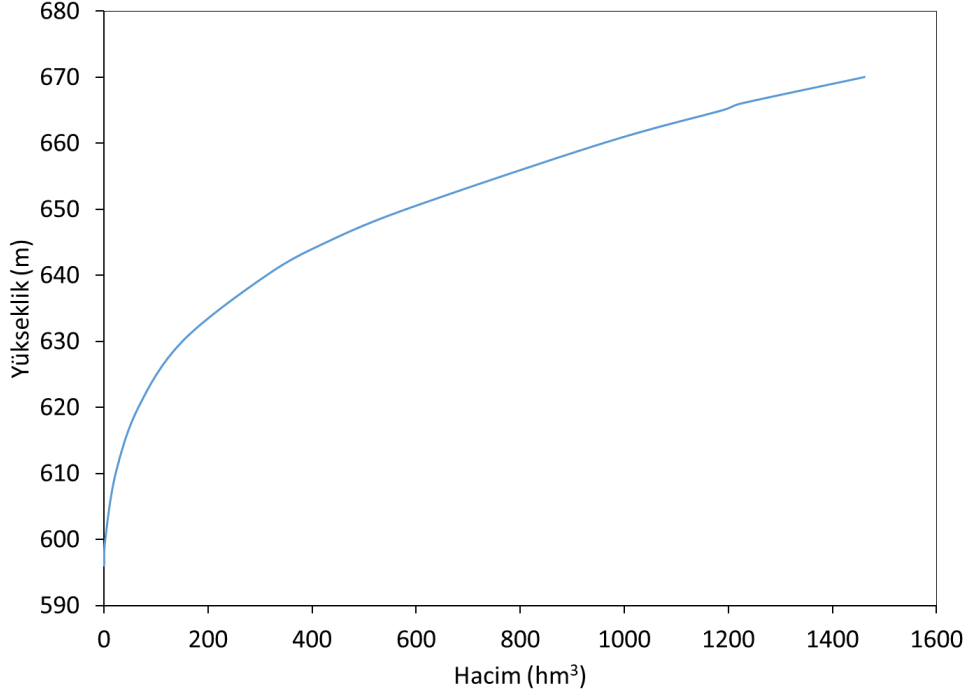
$$t_f = 0.0176 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (2)$$

“ B_{ave} ”, ortalama gedik genişliğini (m); “ t_f ”, gedik oluşma zamanını (saat); “ V_w ”, gediklenme anındaki rezervuar hacmini (m³); “ h_b ” son gedik yüksekliğini (m); “ K_0 ”, sabitini (üzerinden aşarak yıkılma için 1,3 diğer durumlarda 1,0), “ g ” yer çekimi ivmesini ifade eder.

Son olarak çalışmada baraj gölü ise Geometrik veri editörü altında DSİ’den temin edilen hacim-yükseklik eğrisinin (Şekil 5) “Storage Area Editor” bölümüne girilmesi ile tanımlanmıştır. Bir depolama alanı kullanılıyorsa, HEC-RAS göl boyunca (level-pool routing) ötelemeyi, ardından barajın mansabında kararsız akış ötelemesini kullanır.



Şekil 4: Baraj gediklenme senaryosu için 2B depolama alanı ile 2B alan arası HEC-RAS ekran görüntüsü (gri bölge barajı, gri çizgi arazi verisini, kırmızı çizgi gediklenecek alanı temsil etmektedir)



Şekil 5: Batman Barajı haznesine ait hacim-yükseklik eğrisi

Baraj yıkılması gibi durumlarda taşkın dalgası oldukça hızlı bir şekilde yükselir ve alçalır. Buna bağlı olarak hızdaki yersel ivme (konuma bağlı değişim) ve zamansal ivmenin (zamana bağlı değişim) hesaba katılması sonuçlar açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple denklemdeki bütün terimlerin dikkate alındığı tam hidromekanik çözüm gereklidir. Hidrodinamik model çözümü prensipte kütle ve momentum korunumu yasalarına (Navier-Stokes) dayanmaktadır. İki yönde bir yayılım için sıvının düşey yöndeki terimlerinin ihmal edildiği form, sıvı su denklemleri (St. Venant denklemleri) olarak basitleştirilebilir. Sıvının sıkıştırılmaz olduğu kabulü ile kütle korunumu (süreklilik) ve momentum korunumu denklemlerinin kararsız diferansiyel formu Denklem 3 ve Denklem 4 – 5 ile gösterilmektedir. Momentumun korunumu denklemi ise Newton'un 2. Yasasına dayanmaktadır ve sol taraftaki terimler ivmeyi sağ taraftakiler ise içsel ve dışsal kuvvetleri belirtmektedir. Denklemlerin çözümü HEC-RAS'ta "Kapalı Sonlu Hacim Algoritması" kullanılarak hesaplanmaktadır (USACE HEC 2021).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (5)$$

"H", su yüzü kotunu (m); "h", su derinliğini (m); "x", yatay düzlemi (m); "y", düşey düzlemi (m); "t", zamanı (s); "u" ve "v" sırasıyla x ve y yönünde hız bileşenlerini (m/s); "q", ise giren/çıkan akımı (m³/s); "g", yer çekimi ivmesini; "v_t" yatay eddy viskozite katsayısını; "c_f" taban sürtünme katsayısını; "f" Coriolis parametresini ifade eder.

2.3.1. Altlıklardan Çözüm Ağının Oluşturulması, Pürüzlülük ve Akım Verisi Tanımlanması

Taşkın modelleme çalışmalarında uygun arazi kullanımının tespiti oldukça önemlidir. Bu çalışmada günümüzde literatürde tercih edilen uydu ürünü arazi kullanım haritası kullanılarak pürüzlülük değerleri tanımlanmıştır. Bunun için ESA WorldCover uydusunun 2020 yılında üretilmiş 10 m alansal çözünürlüğe sahip uydu görüntüsü indirilmiştir (URL-6 2021). ESA WorldCover neredeyse gerçek zamanlı olarak geliştirilen ve doğrulanan Sentinel-1 ve 2 verilerine dayalı olarak küresel arazi kullanım ürünü sağlamaktadır. Sonrasında görüntü yeniden sınıflandırılmış ve arazi kullanım haritası elde edilmiştir (Şekil 6(a)). Manning değerleri ise ESA WorldCover uydusunu sınıflandırmasına uygun olarak seçilmiştir (Papaioannou vd. 2018).

Baraj yıkılma senaryosu literatürdeki çalışmalara benzer şekilde (Haltas 2016a; Haltas 2016b) barajın tam dolu olduğu ve bu esnada 500 yıl tekerrürlü taşkın hidrografının baraj rezervuarına gelerek barajın üzerinden aşması durumunda gediklenerek yıkılmasına sebebiyet verdiği kötü durum düşünülerek kurgulanmıştır.

Çalışma metodoloji HEC-RAS içerisinde birbiri ile bütünleşik iki alt modelden oluşmaktadır: birincisi, baraj yıkılma hidrografını üretmek için baraj yıkılma modeli ve ikincisi, barajın mansabındaki taşkın dalgasının yayılması için hidrodinamik modeldir.

Batman Barajı'na ait taşkın hidrografi (pik debisi yaklaşık 3665 m³/s) ve baraj su yüksekliği DSİ'den temin edilerek gediklenme modeline memba sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Baraj yıkılması sonucu oluşan ve HEC-RAS içerisinde gediklenme parametreleri ile hesaplanan hidrograf ise 2B hidrodinamik modele memba sınır koşulu teşkil etmektedir. Şekil 6(b)'de sunulan 2B alan genişliği tüm taşkın yayılımını kapsayacak şekilde deneme ve yanılma simülasyonları yapılarak tespit edilmiştir. 2B alan mansap sınır koşulu ise arazi eğimi üzerinden Şekil 6(b)'de mansap kısmında mavi ile gösterilen hat üzerinde normal derinlik seçilerek tanımlanmıştır. 2B alan başlangıç koşulunda HEC-RAS tarafından varsayılan suyun yayılacağı mansap bölgesinde kuru durum kabulü ile çalıştırılmıştır.

HEC-RAS 2B modelinde her çözüm ağı gözü (mesh) içerisinde diğer sonlu eleman modellerinden farklı olarak üç, dört, beş (sekize kadar) değişen hücrelerden oluşmaktadır. Ağ gözlerinde arazi modelinden gelen tek bir yükseklik değil, alttaki arazinin ayrıntılarını temsil eden ayrıntılı bir yükseklik hacmi/alan ilişkisi mevcuttur. Bu yaklaşım ile HEC-RAS, modelleyicinin daha büyük hücre boyutlarını kullanmasına rağmen araziyi doğru bir şekilde temsil etmesine olanak tanır. Öte yandan, su yüzeyi eğimi ve hızı ani şekilde değişiyorsa, değişen su yüzeyini ve hızını yakalamak için o alanda daha küçük hücre boyutları kullanılmalıdır. Çalışmada da bu kriterler ışında farklı hücre aralıkları ile analizler yapılarak tüm altlıklar için ortak ve uygun bir çözüm ağı gözü aralığı (25 m) kullanılmıştır.

Hidrodinamik model çözümünde hesaplama zaman aralığı seçimi önemlidir. Yetersiz hesap adımı stabil olmayan sonuçlara neden olurken küçük hesap adımı ise çözüm süresini bir hayli arttırmaktadır. Bu amaçla Denklem 6'da gösterilen Courant sayısı (C_n) ile akımın ilerlediği mesafe ile işlemsel mesafe aralığını karşılaştırmaya imkân tanır. HEC-RAS gibi çoğu hidrodinamik modelde kullanılan örtük çözüm şemaları, açık yöntemlerle sayısal kararlılık için gerekli olduğu gibi, Courant sayısı için önceden belirlenmiş bir sınır olmadığı anlamına gelir (USACE 2014). Bu çalışmada da Courant sayısı gözetilerek hidrodinamik modelin taşkın dalgasını çözüm ağı gözünde biriktirme yapmadan taşkın dalgasının hareketini gerçekçi şekilde temsil eden ve stabil olmayan durumları ortadan kaldıran değerler denenerek en uygun hesap zaman adımı 5 saniye olarak tespit edilmiştir.

$$C_n = (c + V) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 \quad (6)$$

" C_n ", Courant sayısını; " c ", dinamik dalga yayılma hızını (m/s), (ayrıca $c = \sqrt{gy}$); " V ", bölgesel derinlik ağırlıklı hız (m/s); " Δx ", çözüm ağı gözü aralığı (m); " g ", yerçekimi ivmesi, (9,81 m/s²); " y ", (m) bölgesel derinliği ifade eder.

2.4. Performans Kriterleri

Baraj yıkılmasına bağlı kararsız akım taşkın modelleme sonuçlarından farklı zaman adımları için çeşitli haritalar üretilmektedir. Taşkın analizi için ise genellikle en kritik değerlere sahip maksimum değerlerin olduğu haritalar değerlendirilmede kullanılmaktadır. Bunlar: Maksimum taşkın kaplı alan, maksimum taşkın su derinliği, maksimum taşkın su hızı haritalarıdır. Bu verileri birleştiren farklı karar verici haritalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada taşkın alanları içerisinde kalan alanların tehlike derecelerine göre sınıflandırılması (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) ile yeni haritalar oluşturulmuştur. Haritalar çeşitli eşik değerleri için incelenmiştir. Taşkın modelleme çıktıları literatürde de sıklıkla kullanılan (Bates ve De Roo 2000; Tayefi vd. 2007; Cook ve Merwade 2009; Azizian ve Brocca, 2020) farklı performans kriterleri ile de test edilmiştir. Bunlar HGM tabanlı model sonuçlarının daha az hataya sahip olduğu kabulü ile HGM'yi referans olarak elde edilen ve aşağıda sunulan ilişki analizi için korelasyon katsayısının karesi (R^2), hata değerleri için ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE), Kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error, RMSE) ve F-indeksidir.

$$R^2 (m) = \left(\frac{\sum (x_{HGM} - \bar{x}_{HGM})(x_i - \bar{x}_i)}{\sqrt{\sum (x_{HGM} - \bar{x}_{HGM})^2 \sum (x_i - \bar{x}_i)^2}} \right)^2 \quad (7)$$

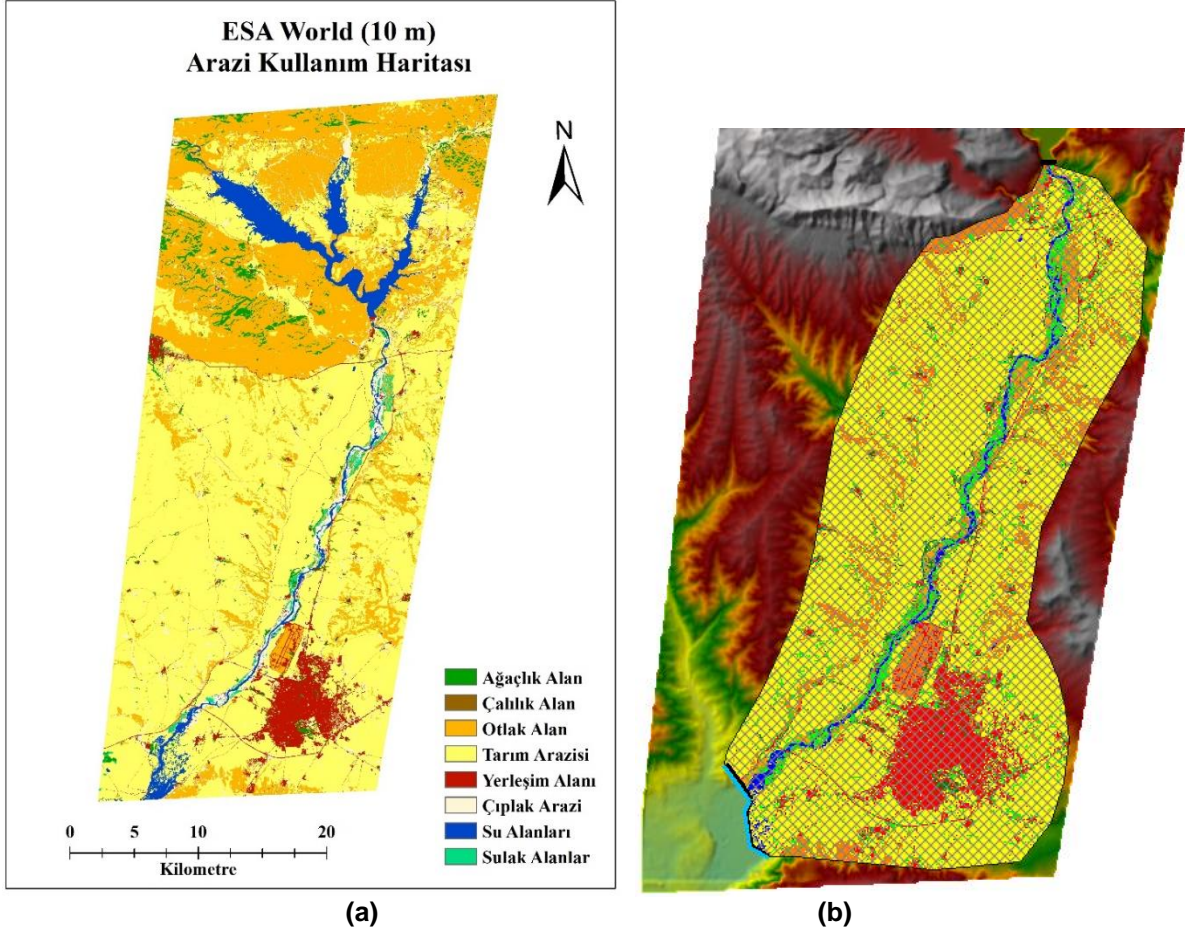
$$MAE (m) = \frac{1}{N} \sum |X_{HGM} - X_i| \quad (8)$$

$$RMSE (m) = \sqrt{\frac{\sum (X_{HGM} - X_i)^2}{N}} \quad (9)$$

$$F - indeks(\%) = 100 \times \left(\frac{A_{Os}}{A_0 + A_S - A_{Os}} \right) \quad (10)$$

" X_{HGM} " geometrik ve hidrolik olarak HGM-SAM ile bulunan sonuçları; " X_i " farklı SYM'lerden elde edilen sonuçları; " N " kesit sayısını; " A_0 " HGM-SAM ile elde edilen taşkın kaplı alanı " A_S " uydu tabanlı SYM'lerden elde edilen alanı; " A_{OS} " hem HGM'den hem de diğer uydu tabanlı SYM'lerden elde edilen ortak alanı ifade eder.

R^2 değeri (0 – 1) arasında değişir ve değişkenler arasında (HGM tabanlı referans model ile SYM tabanlı model arası) doğrusal ilişkinin karesini ifade eder. R^2 'nin 1 olması mükemmel uyum anlamına gelir. RMSE ve MAE değerleri ise (0 - ∞) arasında değişmektedir ve iki farklı model için karşılaştırılarda düşük değer daha az hataya sahip model sonucu anlamına gelir. Ayrıca bu iki hata geometrik ve hidrolik seçilen parametre ile aynı birimdedir. MAE ortalama, RMSE uç değerlerdeki hatayı temsil etmekte daha başarılıdır. F-İndeks için 100 değeri, taşkın alanlarını simüle etmede HGM ve SYM'ler arasında mükemmel bir eşleşme anlamına gelir.



Şekil 6: (a) Çalışma alanı ESA WorldCover arazi kullanım uydu görüntüsü (b) RAS-Mapper'da altlık olarak SRTM SYM, 2B akış alanı, çözüm ağı gözü ve farklı pürüzlülük bölgelerinin gösterimi

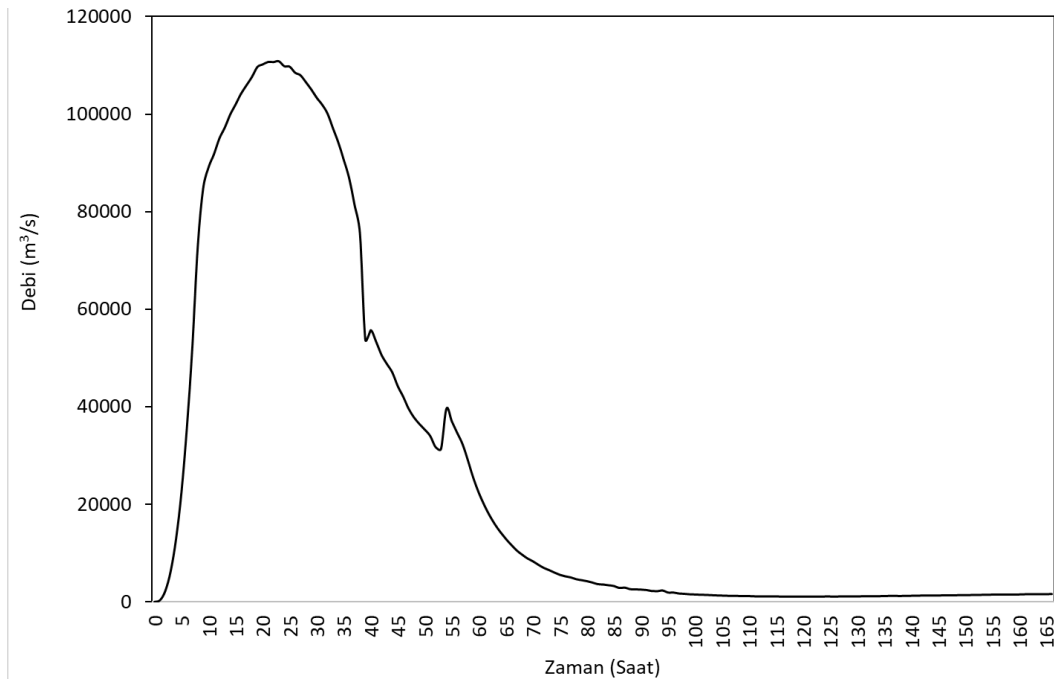
3. Bulgular ve Tartışma

Bu kısımda oluşturulan kötü durum senaryosuna (barajın tam dolu olduğu ve o esnada taşkın hidrografının gelerek üzerinden aşma sonucu barajı gedikleyerek yıkmasına durumuna) göre mansaptaki taşkın etkileri ve sonuçları irdelenmiştir.

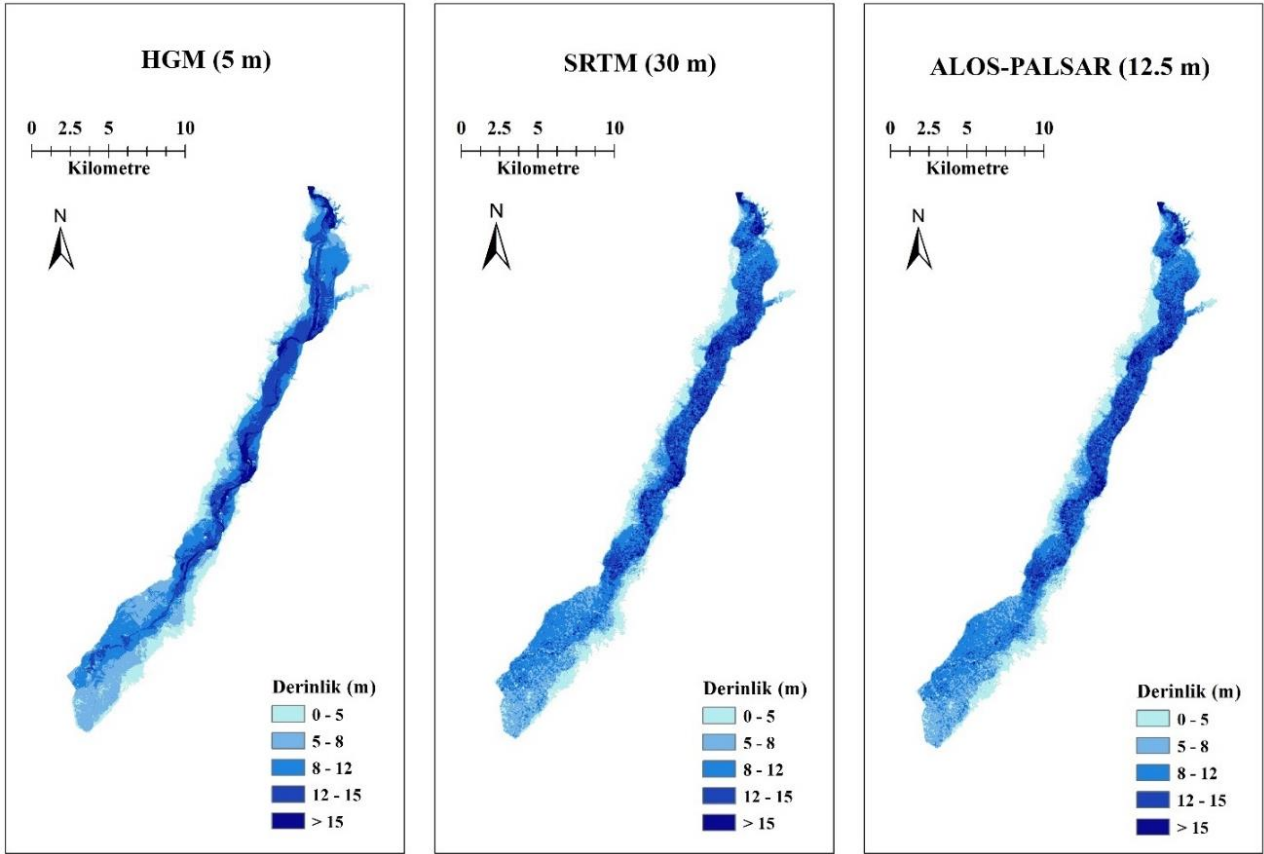
3.1. Baraj Yıkılma Hidrografı, Taşkın Kaplı Alan ve Taşkın Su Derinliği Sonuçlarının İncelenmesi

Batman Barajı'nın HEC-RAS'ta yıkılma senaryosu ve taşkın yayılım haritaları 3 farklı altlık kullanılarak kararsız akım 2-B taşkın modellemesi altında elde edilmiştir. Modelleme çalışmasında baraja ait hacim-yükseklik eğrisi ve yıkılma parametreleri aynı değerlerde olduğundan baraj yıkılması sonucu elde edilen hidrograflar 3 farklı modelde benzer şekilde elde edilmiştir (Şekil 7). Kötü durum senaryosuna (baraj seviyesinin maksimumunda olduğu ve 500 yıllık tekerrür periyoduna sahip taşkın debisinin baraj gövdesi üzerinden aşarak barajı trapez şeklinde gediklenerek yıktığı duruma) göre (pik değeri 100.000 – 120.000 m³/s arası değişen) yüksek debili ve uzun zaman aralığında sönmünecek debinin mansaba deşarjı öngörülmektedir. Yıkılma sonucu hesaplanan taşkın hidrografı 2B hesap çözüm ağı gözü alanı için kararsız akım sınır şartı teşkil etmektedir.

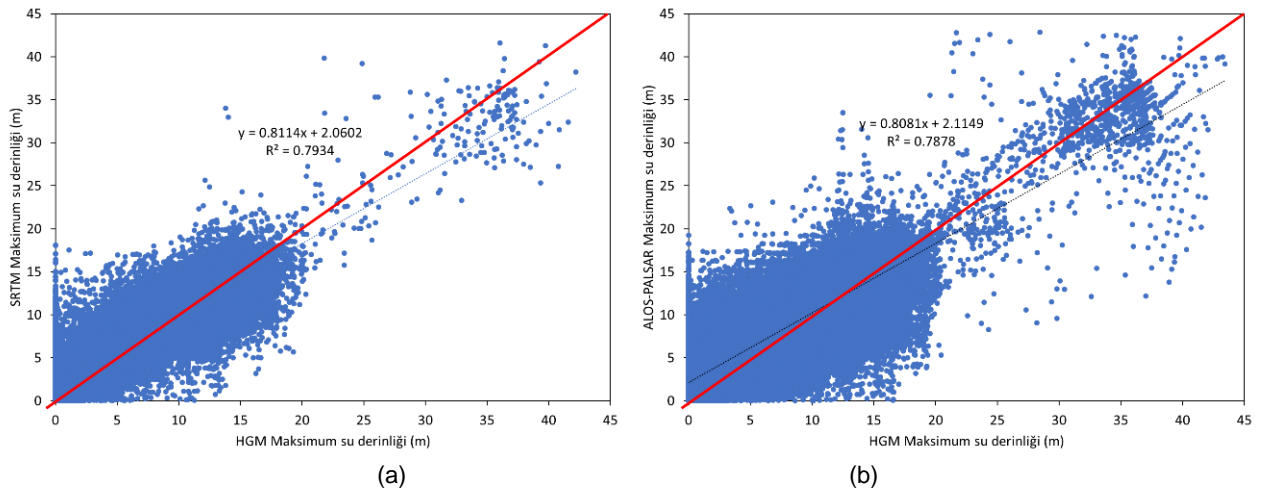
Bu durumda mansapta hidrodinamik model ile elde edilen taşkın yayılım haritalarının farklı su derinlik sınıflarındaki (0-5, 5-8, 8-12 ve 12-15 ve 15 m üzeri aralıklar olmak üzere) dağılımları Şekil 8’de sunulmuştur. HGM’den elde edilen sonuçlara kıyasla iki uydu verisi tabanlı haritanın arazi yüzeyindeki girinti ve çıkıntılara bağlı olarak inişli ve çıkışlı su seviyesi verdiği görülmektedir. Maksimum taşkın kaplı alanların ise farklı modellerde benzer dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Sayısal olarak tutarlılıkları da HGM tabanlı model sonuçlarını referans alan maksimum su seviyesi F- indeks hesabına göre HGM ile SRTM arası uyum %92,8 ve HGM ile ALOS-PALSAR arası uyum ise %92,35 olarak hesaplanmıştır. Tablo 3’te farklı derinlik eşikleri için taşkın kaplı alanlar km² cinsinden gösterilmiştir. Buna göre; iki aralık haricinde (5-8 m ve >15 m) uydu verisi tabanlı modellerin daha fazla taşkın kaplı alan öngördüğü görülmektedir. Şekil 9’da ise baraj yıkılma senaryosu sonucu mansapta elde edilen maksimum derinlik noktalarının saçılma grafiğinde karşılaştırılması sunulmuştur. Buna göre; R² değerleri benzer olmakla birlikte SRTM tabanlı modelde saçılmanın ALOS-PALSAR tabanlı modele göre daha doğrusal olduğu görülmektedir. Özellikle su derinliği arttıkça ALOS-PALSAR’daki saçılma daha da genişlemektedir. Bu sebeple Tablo 4’te de farklı su derinliği eşik değerleri için mevcut hücre sayısı ve ilişkilerin durumu incelenmiştir. Buna göre farklı eşiklerde ilişkinin SRTM ile elde edilen sonuçlarda görece yüksek olduğu ve 15 m eşiğe kadar benzer şekilde azaldığı görülmektedir. Eşik değerlerinde özellikle 15 m üzeri eşikte ilişkinin daha yüksek oranda arttığı görülmüştür. Fakat bu noktada mevcut hücre sayısının da yüksek oranda azaldığı göz önünde bulundurulmalıdır. En yüksek eşikte ise (>20 m) R² değerleri daha düşük eşik (> 10 m) mertebesine düşmüştür.



Şekil 7: Baraj yıkılması sonucu oluşan ve 2B hidrolik modele memba sınır şartını oluşturan taşkın hidrografı



Şekil 8: Baraj yıkılma senaryosu sonucu mansapta elde edilen maksimum taşkın kaplı alan ve maksimum taşkın derinlik haritaları



Şekil 9: Baraj yıkılma senaryosu sonucu mansapta elde edilen maksimum derinlik noktalarının saçılma grafiğinde kıyaslanması

Tablo 3: Farklı derinlik sınıflarına göre taşkın kaplı alanların karşılaştırılması

Derinlik (m)	Alan (km ²)		
	HGM	SRTM	ALOS-PALSAR
0 - 5	18.1	21.4	21.3
5 - 8	22.7	19.9	19.5
8 - 12	29.8	34.7	35.0
12 - 15	21.1	22.4	22.7
> 15	5.2	4.9	5.2

Tablo 4: Farklı eşiklerine göre HGM tabanlı model ile uydu tabanlı modeller arası ilişki analizi

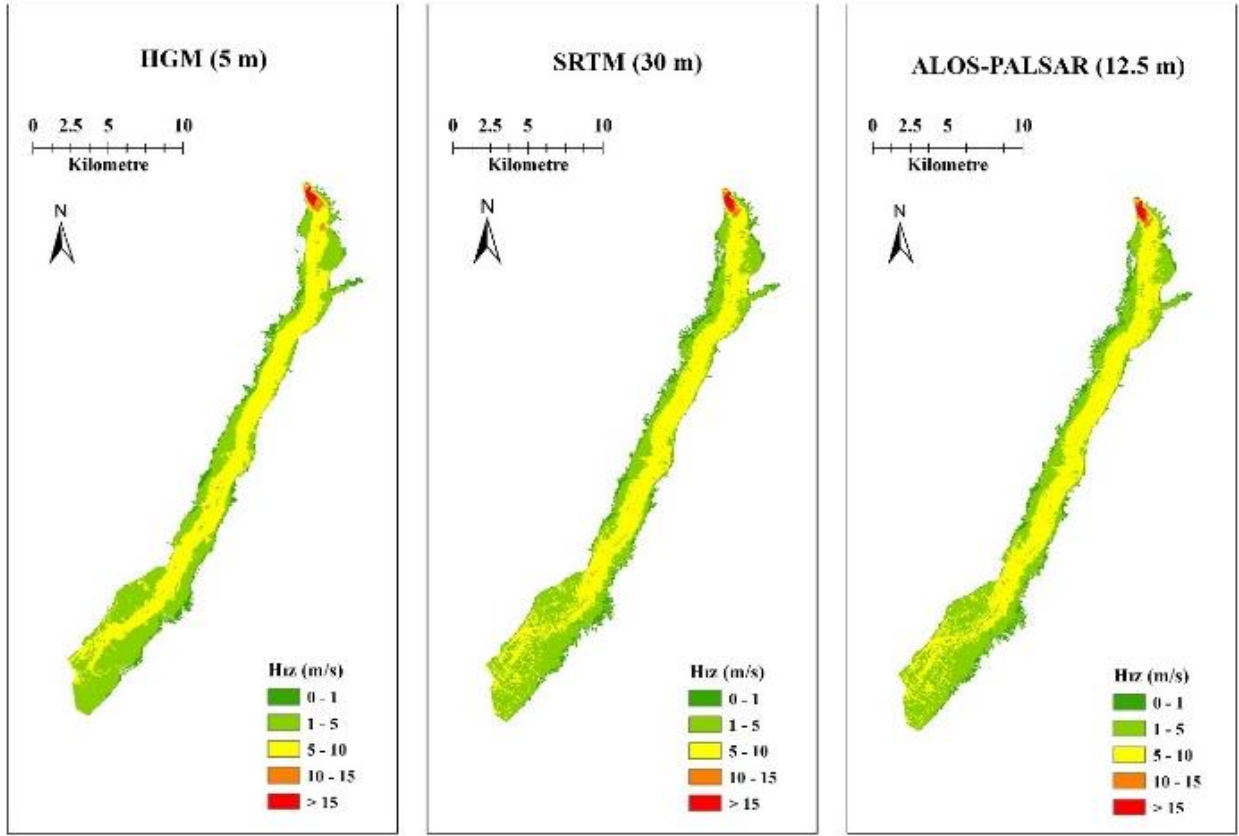
Derinlik (m)	HGM ile SRTM		HGM ile ALOS-PALSAR	
	R ²	Hücre sayısı	R ²	Hücre sayısı
> 0	0.7934	113622	0.7878	653123
> 1	0.7103	100544	0.7013	578036
> 5	0.6016	84540	0.5945	486784
> 10	0.3698	37976	0.3615	218806
> 15	0.8416	1514	0.8165	8554
> 20	0.3644	186	0.3186	1003

3.2. Taşkın Yayılım Hızı, Varış Süresi ve Tehlike Haritası

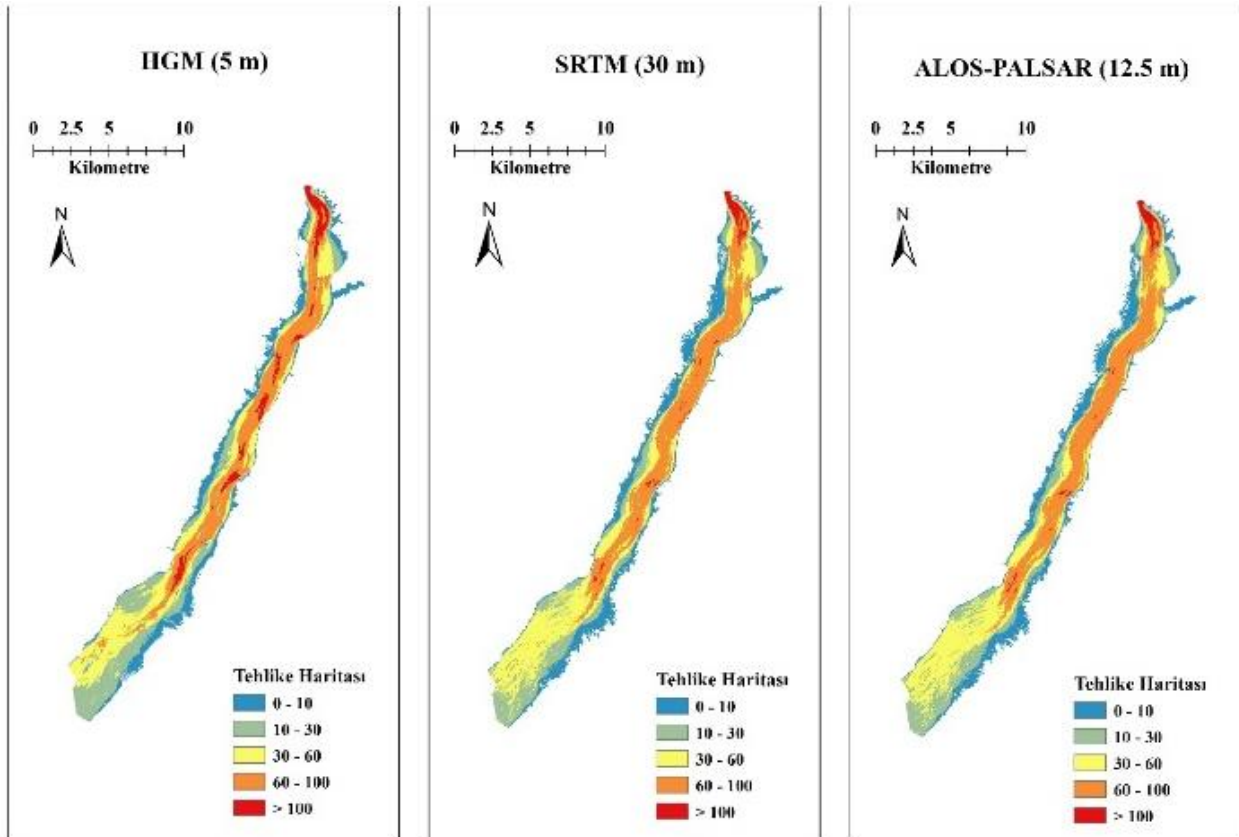
Taşkın kaplı yerlerin alan ve derinlik değerleri taşkın etkilerini belirlenmesinde karar vericiler için yeterli olmamaktadır. Bu noktada 2B hidrodinamik modellerden farklı ürünler elde edilebilmektedir. Bunlardan ilki zamansal olarak değişken taşkın yayılım hız simülasyon sonucudur. Şekil 10(a)'da 3 farklı hidrodinamik model sonucundan elde edilen maksimum taşkın hızı haritası sunulmuştur. Hız haritaları farklı sınıflara ayrılarak (0-1, 1-5, 5-10, 10-15 ve >15, m/s cinsinden) gösterilmiştir. Taşkın tehlike haritaları hız ve derinlik gibi farklı parametreler kullanılarak mekânsal tehlike değerlerine dönüştürülebilmektedir (de Moel vd. 2009). Bu çalışmada taşkın maksimum su derinliği ve taşkın maksimum hız değerleri birbiri ile çarpılarak Şekil 10(b)'de sunulan taşkın tehlike haritaları elde edilmiştir. En yüksek tehlike seviyesi doğrudan baraj civarında ve çok düşük bir bölgede mansap kısmında ve kanal içerisinde. Üç farklı modelde de şehir merkezine yaklaştıktan sonra tehlike dereceleri düşmektedir. Öte yandan Şekil 11'de maksimum seviyeye varış süresi haritaları sunulmuştur. Taşkın maksimum seviyeye ulaşması 1 ila 4 saat arasında değişmekte, HGM tabanlı modelde mansap bölgelere maksimum seviyenin varması daha erken öngörülmektedir.

Bunun haricinde Tablo 5'te HGM referans modele göre hız hem de derinlik için MAE ve RMSE hata değerleri performans karşılaştırması yapılmıştır. Genel olarak her iki modelin benzer hata değerlerine sahip olduğu, hatta çözünürlüğü daha düşük olan SRTM-SYM tabanlı modelin görece daha az hataya sahip olduğu görülmektedir. Tablo 6'da ise HGM referans modele göre MAE değerlerinin farklı sınıf aralıkları için MAE hata değerleri sunulmuştur. Buna göre farklı eşik değerlerde de hem hız hem de derinlik için her iki uydu ürünü tabanlı SYM'de benzer performanslar elde edildiği görülmüştür.

Akarsu yatağında oluşan su yüzü profillerinin zamanla değişiminin incelenmesi özellikle farklı çözünürlükteki haritaların taşkın dalgasının ilerleyişine etkisini göstermesi açısından yararlı olmaktadır. Bu amaçla farklı harita girdisine sahip kararsız akım modellerine ait sonuçlar farklı zaman adımlarında elde edilerek taşkın yayılım durumu Şekil 12'de nehir profili üzerinde karşılaştırılmıştır. Taşkın varış süresine benzer şekilde HGM tabanlı model çıktısında diğer modellere nazaran taşkın dalgasının daha erken ilerlediği ve taşkın çekilme aşamasında da daha erken çekildiği tespit edilmiştir.

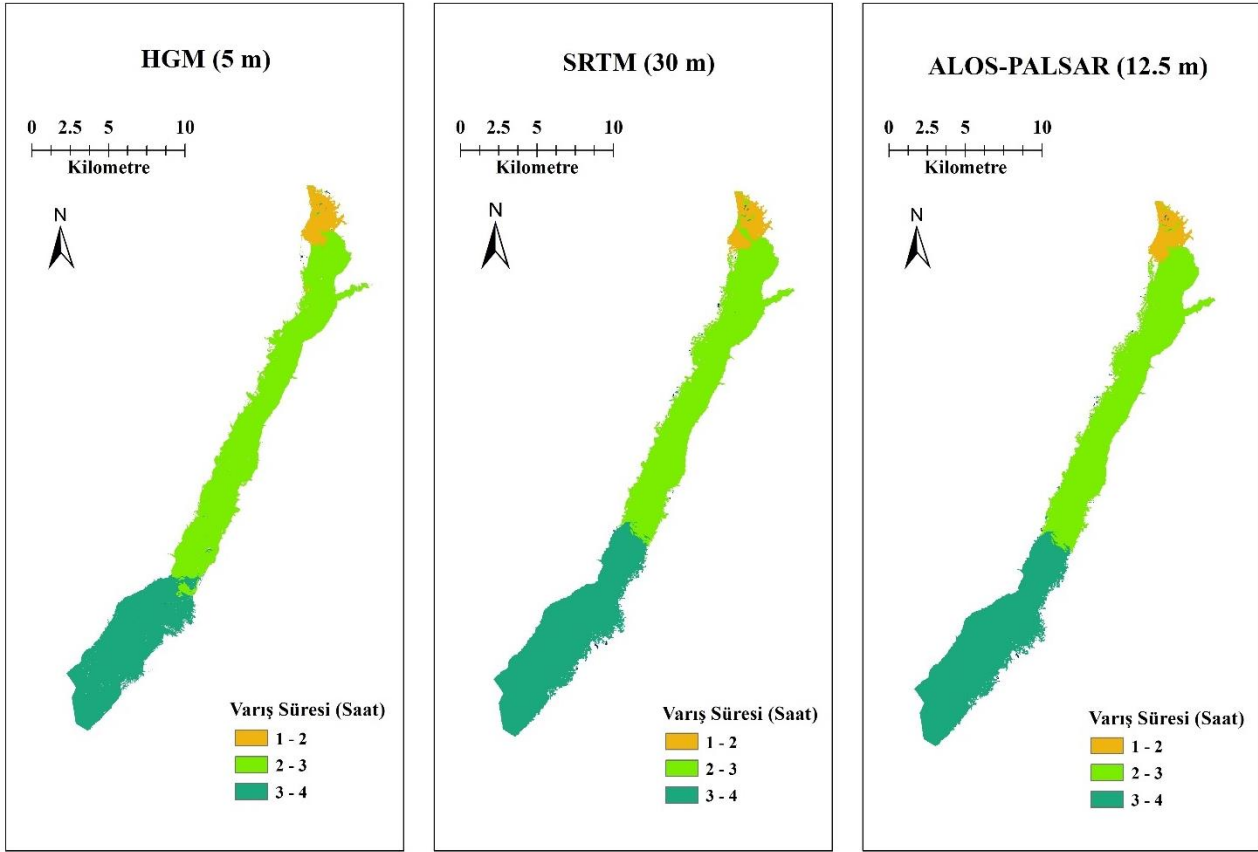


(a)



(b)

Şekil 10: Baraj yıkılma senaryosu sonucu mansapta (a) Maksimum taşkın hız haritası (b) Taşkın tehlike haritası ($D \cdot V$)



Şekil 11: Baraj yıkılma senaryosu sonucu mansapta taşkın maksimum seviye varış süre haritası

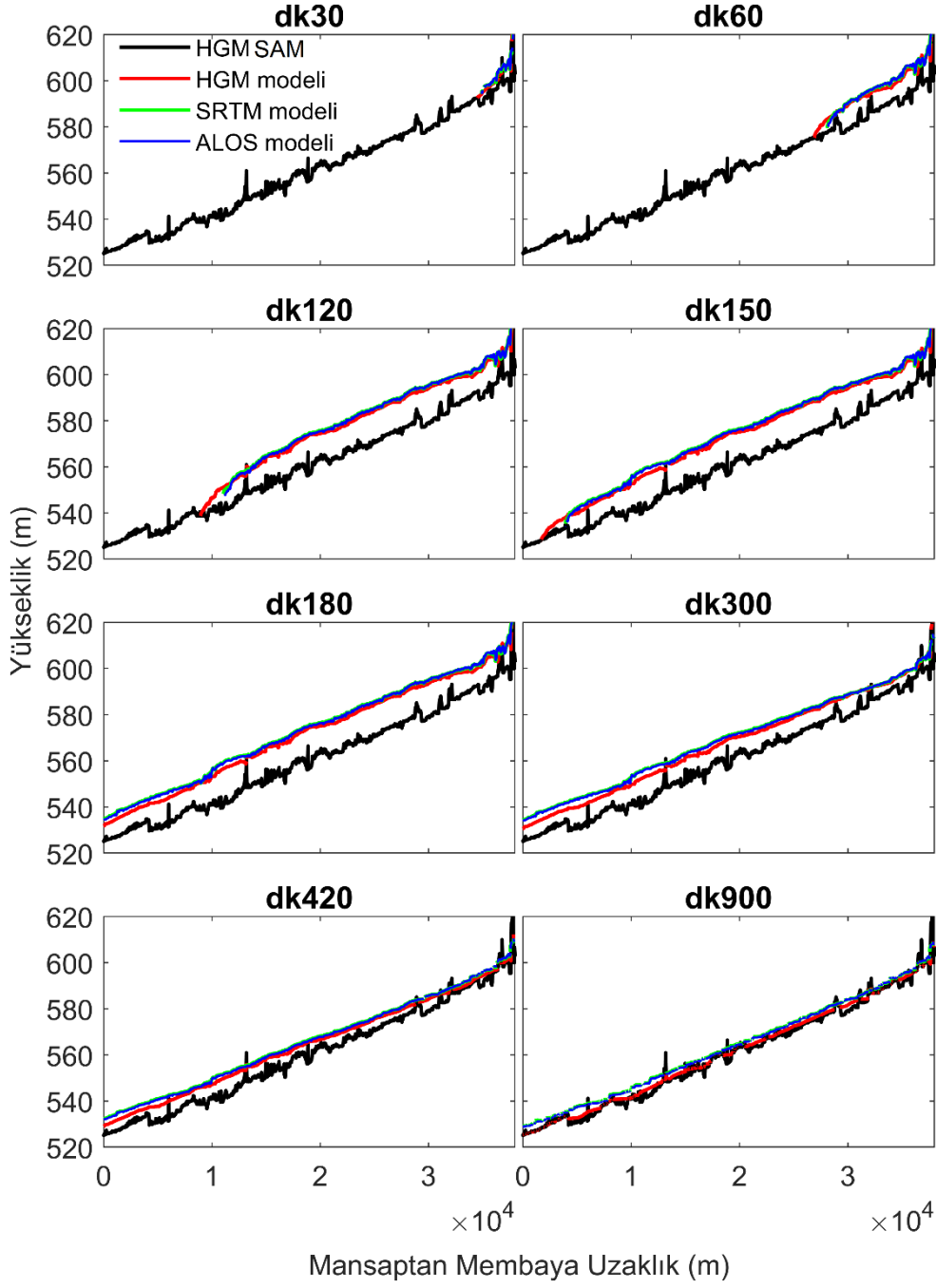
Tablo 5: HGM referans modele göre MAE ve RMSE performans karşılaştırılması

	Derinlik (m)		Hız (m/s)	
	SRTM	ALOS-PALSAR	SRTM	ALOS-PALSAR
MAE	1,69	1,72	0,84	0,87
RMSE	2,24	2,28	1,22	1,27

Tablo 6: HGM referans modele göre MAE değerlerinin sınıf aralıkları için karşılaştırılması

Referans-Ürün	Hız (m/s)					Derinlik (m)				
	<= 1	<= 5	<= 10	<= 15	>15	<= 5	<= 8	<= 12	<= 15	>15
HGM-ALOS	0,36	0,70	0,84	0,85	2,63	1,30	1,34	1,52	1,63	1,63
HGM-SRTM	0,34	0,67	0,81	0,83	2,04	1,25	1,29	1,47	1,59	1,64

Şekil 13 HGM tabanlı SAM'a göre çalıştırılan taşkın modeli sonucu Batman Barajı mansap bölgesinde baraj yıkılması sonucu su altında kalan yerleşim yerlerini göstermektedir. Buna göre 12 yerleşim yeri, 1 Atıksu Arıtma Tesisi ve Batman Havaalanı'nın bir kısmının su altında kalacağı öngörülmektedir. Öte yandan bu yerleşim yerlerine ait ilgili referans yıl bazında Türkiye İstatistik Kurumundan elde edilen (2020 ve 2021) nüfus değerlerine göre ise bu bölgede ikamet eden toplamda 10.985 kişinin taşkın riski ile karşı karşıya olduğu tespit edilmiştir (Tablo 7).

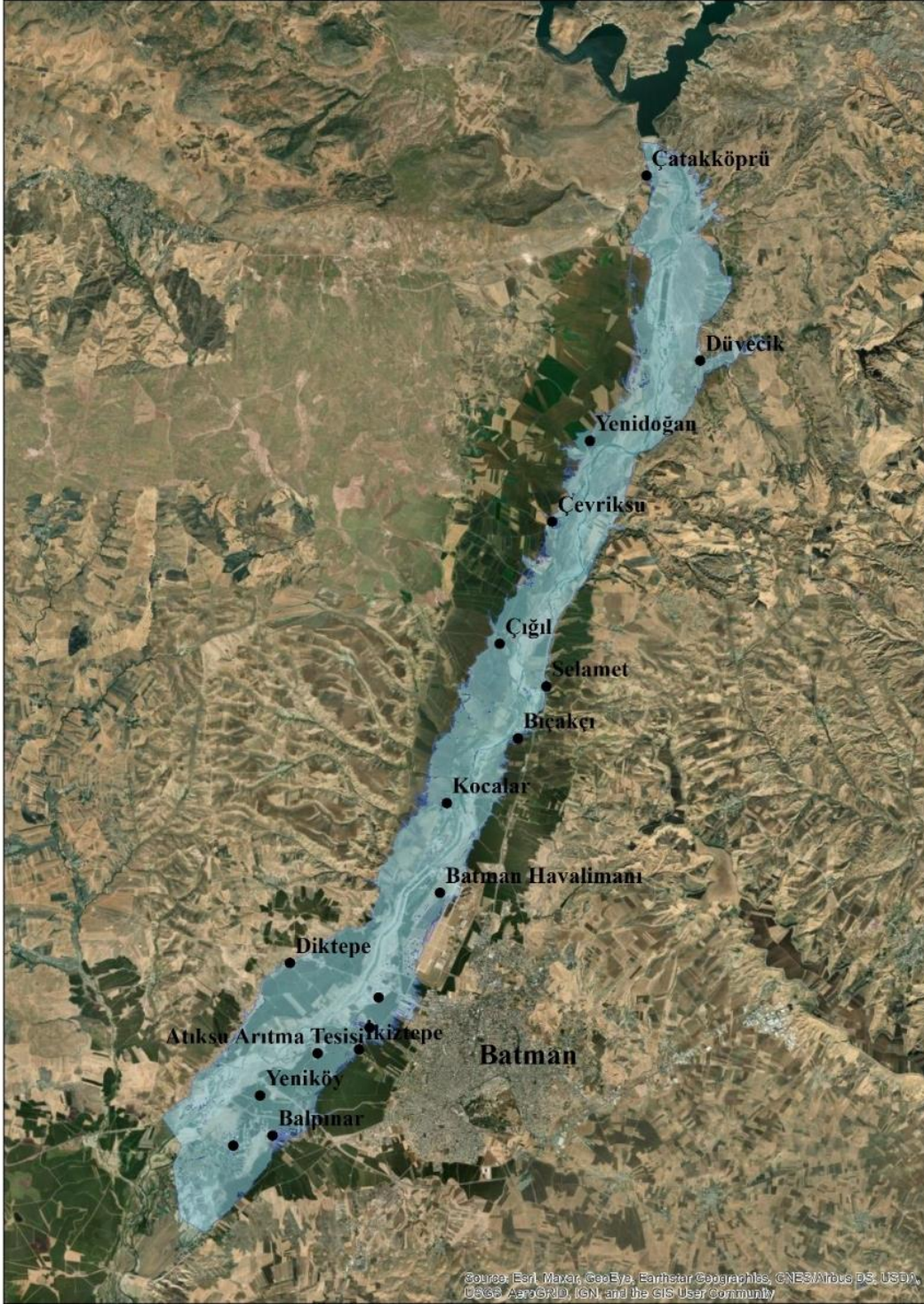


Şekil 12: Baraj yıkılma senaryosu sonucu nehir boyunca su yüzü profilleri (dk: dakika)

Tablo 7: Batman Barajı'nın yıkılması durumunda mansap bölgesinde etkilenen yerleşim yerleri, nüfusları ve ölçüm tarihleri

Yerleşim yeri	Çatakköprü	Düvecik	Yenidoğan	Çevriksu	Çığıl	Selamet
Nüfus*	1581	146	487	541	252	500
Yıl	2021	2021	2021	2021	2021	2020
Yerleşim yeri	Bıçakçı	Kocalar	Diktepe	İkiztepe	Yeniköy	Balpınar
Nüfus*	772	1014	776	994	910	3012
Yıl	2021	2021	2021	2020	2021	2020

* Nüfus bilgisi ilgili referans yıl bazında TÜİK'den alınmıştır.



Şekil 13: Batman Barajı'nın yıkılması durumunda etkilenecek yerleşim yerleri ve taşkın kaplı alanın gösterimi

4. Sonuç ve Öneriler

Baraj yıkılmasına bağlı taşkın çalışmaları afete hazırlık kapsamında önem kazanmaktadır. Bu çalışmada çok amaçlı işletilen kil çekirdekli kaya dolgulu ve mansabında kırsal yerleşim yerleri ile Batman ili bulunan Batman Baraj'ının olası yıkılma durumunun mansaptaki etkileri incelenmiştir. Baraj yıkılma senaryosu hazinenin maksimum seviyede olduğu durumda 500 yıl tekerrürlü taşkın debisinin gelmesi ve üzerinden aşarak trapez gediklenme durumu ile yıkılması şeklinde kurgulanmıştır. Sonrasında Batman Nehri boyunca taşkın debisi ötelenerek iki boyutlu taşkın yayılım modeli oluşturulmuştur. Hem baraj yıkılması hem de hidrodinamik taşkın analizi HEC-RAS 2B yazılımı ile elde edilmiştir.

Kararsız akım taşkın simülasyon sonuçlarının incelenmesi ve taşkın haritalarının hazırlanması da HEC-RAS Mapper modülü ile ArcMap yazılımlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma 2B taşkın analizi için en önemli girdi olan arazi verisini hem uydu verisinden SYM olarak hem de HGM'den SAM olarak temin ederek modellemiş ve sonuçlarını Bölüm 3'te detaylı analizler ile sunmuştur. Manning pürüzlülük değerleri 10 m mekânsal çözünürlüklü güncel ESA WorldCover arazi kullanım haritası ile elde edilmiştir. Elde edilen model sonuçları ise ayrıca HGM'den temin edilen yüksek çözünürlüklü (5 m) SAM tabanlı referans model sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu gibi geniş bir bölgede uydu ürünü SYM'ler ile 2B hidrodinamik modelleme bütünleştirilerek Batman Barajı'na ait yıkılma senaryosu analizi uygun bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Farklı çözünürlüklü ürünlere ait model sonuçları kıyaslandığında 30 m mekânsal çözünürlüklü SRTM ve 12,5 m mekânsal çözünürlüklü ALOS-PALSAR uydu ürünü tabanlı SYM'ler yaklaşık sonuçlar vermektedir. Referans alınan yüksek çözünürlüklü HGM tabanlı model çıktısına göre karşılaştırıldığında da hata değerlerinin düşük olduğu hesaplanmıştır. Kaba ölçek çözünürlüğe sahip SRTM tabanlı model sonuçlarının orta ölçek çözünürlüklü ALOS-PALSAR modeline göre nispeten daha az hata verdiği söylenebilir. Baraj yıkılması neticesinde Batman şehir merkezi için risk teşkil etmemekle birlikte kırsal yerleşim yerleri ve atıksu arıtma tesisi ile Batman Havaalanının bir kısmı taşkın riski altındadır. Elde edilen derinlik ve hız değerleri göz önünde bulundurulursa önlem alınmaması durumunda yüksek mal ve can kaybına yol açabileceği söylenebilir.

Öte yandan çalışmanın gelişmeye açık yönleri ve ileri çalışmalar için ortaya çıkan öneriler ise aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- 2B modeller 1B modellere kıyasla tüm arazi verisini hesaba katmakta ve özellikle geniş ve düz nehir yataklarında suyun hareketini iki yönde de modelleyerek daha gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Bu nedenle gelişen teknoloji paralelinde büyük alanların modellenmesinde çalışmada sunulan yöntemler gözetilerek çalışma yöntemi farklı bölgelerde de tekrar edilebilir.
- Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde uydu SYM verilerinin yanı sıra SAM verilerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla HGM verileri yanı sıra Tapu Kadastro ve Google Earth gibi uydu verilerinin birleştirilmesi fayda sağlayabilir (Taş 2022).
- HGM tabanlı SAM verileri bu gibi çalışmalarda referans olarak fayda sağlamaktadır. Daha küçük nehir kollarında (örneğin LIDAR tabanlı) daha yüksek çözünürlüklü veriye ihtiyaç duyulabilir.
- Batman Barajı mansap bölgelerinde taşkın varış süreleri gözetilerek erken uyarı sisteminin can kayıplarını azaltacağı düşünülmektedir.
- Taşkın modellerinin doğrulanması ancak taşkın kaplı alan bilgisi (gözlenmiş taşkın verisi) ya da taşkın seviye verisi ile gerçekleştirilebilmektedir. Baraj yıkılma modellerinde ise deneysel çalışmalarla karşılaştırma yapmak katkı sağlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi 22ADP050 numaralı 102-Araştırma Destek Projesi (ADP) kapsamında desteklenmiştir. Veri paylaşımı için Devlet Su İşleri (DSİ) ve Harita Genel Müdürlüğüne (HGM) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Arnell N. W., Goslin, S. N., (2016), *The impacts of climate change on river flood risk at the global scale*. Climatic Change, 134(3), 387-401.
- Azizian A., Brocca L., (2020), *Determining the best remotely sensed DEM for flood inundation mapping in data sparse regions*, International Journal of Remote Sensing, 41(5), 1884-1906.
- Bates P. D., De Roo A. P. J., (2000), *A simple raster-based model for flood inundation Simulation*, Journal of Hydrology, 236(1-2), 54-77.
- Cook A., Merwade V., (2009), *Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping*, Journal of Hydrology, 377(1-2), 131-142.
- Çeliker M., Koçer N. N., Yıldız O., (2020), *Bingöl il merkezinde taşkın yayılım alanlarının coğrafi bilgi sistemleri ve HEC-RAS ile belirlenmesi*, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(2), 354-365.
- de Moel H., van Alphen J., Aerts J., (2009), *Flood maps in Europe-methods, availability and use*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(2), 289-301.
- DSİ, (2016), *Türkiye'nin hidroelektrik santralleri*, Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu Milli Kongresi, ss.136.
- Duvan A., Yıldız O., (2020), *Kapulukaya barajı olası yıkılma sonrası taşkın etkilerinin araştırılması*, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 2(2), 1-10.
- Efe H., Önen F., (2015), *Batman Çayı'nın taşkın analizinin HEC-RAS programıyla yapılması*, Mühendislik Dergisi, 6(2), 83-92.
- Elçi Ş., Tayfur G., Haltaş İ., Kocaman B., (2017), *Baraj yıkılması sonrası iki boyutlu taşkın yayılımının yerleşim bölgeleri için modellenmesi*, Teknik Dergi, 28(3), 7955-7975.
- Ercanoğlu P. D., (2016), *Yenice ve Karabük arasındaki alanın taşkın ve heyelan potansiyelinin değerlendirilmesi ve bölgesel tehlike haritalarının üretilmesi*, Final Raporu, TÜBİTAK 1001, Proje No: 113Y455, Ankara
- Froehlich, D. C., (2008), *Embankment dam breach parameters and their uncertainties*, Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721.
- Güney M. S., Tayfur G., Bombar G., Elci S., (2014), *Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area*, Journal of Hydraulic Engineering, 140(11), 05014006. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000926.

- Haltas I., Tayfur G., Elci S., (2016a), *Two-dimensional numerical modeling of flood wave propagation in an urban area due to Ürkmez dam-break, İzmir, Turkey*, Natural Hazards, 81(3), 2103-2119.
- Haltas I., Elçi S., Tayfur G., (2016b), *Numerical simulation of flood wave propagation in two-dimensions in densely populated urban areas due to dam break*, Water Resources Management, 30(15), 5699-5721.
- Karim I. R., Hassan Z. F., Abdullah H. H., Alwan I. A., (2021), *2D-HEC-RAS modeling of flood wave propagation in a Semi-Arid Area due to dam overtopping failure*, Civil Engineering Journal, 7(9), 1501-1514.
- Kim D. E., Liang S. Y., Gourbesville P., Andres L., Liu J., (2020), *Simple-yet-effective SRTM DEM improvement scheme for dense urban cities using ANN and remote sensing data: application to flood modeling*. Water, 12(3), 816. doi: 10.3390/w12030816.
- Khojeh S., Ataie-Ashtiani B., Hosseini S. M., (2022), *Effect of DEM resolution in flood modeling: a case study of Gorganrood River, Northeastern Iran*, Natural Hazards, 2022(112), 2673-2693.
- Liu Z., Merwade V., Jafarzadegan K., (2019), *Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one-and two-dimensional hydraulic models*, Journal of Flood Risk Management, 12(1), doi: 10.1111/jfr3.12347.
- Mukolwe M. M., Yan K., Di Baldassarre G., Solomatine D. P., (2016), *Testing new sources of topographic data for flood propagation modelling under structural, parameter and observation uncertainty*, Hydrological Sciences Journal, 61(9), 1707-1715.
- Muthusamy M., Casado M. R., Butler D., Leinster P., (2021), *Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling*, Journal of Hydrology, 596, 126088. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126088.
- Oğuz K., Oğuz E., Coşkun M., (2016), *Coğrafi bilgi sistemleri ile taşkın risk alanlarının belirlenmesi: Artvin ili örneği*, 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, Rize, ss.1-24.
- Özgenç-Aksoy A., (2019), *Baraj yıkılması durumunda mansap bölgesi bitki örtüsünden kaynaklı pürüzlülüğün taşkın dalgası yayılımı üzerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması*, Final Raporu TÜBİTAK 1001, Proje No: 116M217, İzmir.
- Patro S., Chatterjee C., Mohanty S., Singh R., Raghuvanshi N. S., (2009), *Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data*, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37(1), 107-118.
- Papaioannou G., Efstratiadis A., Vasiliades L., Loukas A., Papalexioiu S. M., Koukouvinos A., Tsoukalas, I., Kossieris P., (2018), *An operational method for flood directive implementation in ungauged urban areas*, Hydrology, 5(2), 24. doi: 10.3390/hydrology5020024.
- Psomiadis E., Tomanis L., Kavvadias A., Soulis K. X., Charizopoulos N., Michas S., (2021), *Potential dam breach analysis and flood wave risk assessment using HEC-RAS and remote sensing data: A multicriteria approach*, Water, 13(3), 364. doi: 10.3390/w13030364.
- Qi H., Altınakar M. S., (2012), *GIS-based decision support system for dam break flood management under uncertainty with two-dimensional numerical simulations*, Journal of Water Resources Planning and Management, 138(4), 334-341.
- Quirogaa V. M., Kurea S., Udoak K., Manoa A., (2016), *Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5*, Ribagua, 3(1), 25-33.
- Spence A., Poortinga W., Butler C., Pidgeon N. F., (2011), *Perceptions of climate change and willingness to save energy related to flood experience*, Nature Climate Change, 1(1), 46-49.
- Şensoy A., Uysal G., Şorman A. A., (2018), *Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models*, Journal of Flood Risk Management, 11, 866-883.
- Tayfur G., (2013), *Baraj Yıkılması sonucu oluşan taşkınların deneysel ve nümerik metodlar ile araştırılması-gerçek barajlara CBS ortamında uygulanması*, Final Raporu, TÜBİTAK 1001, Proje No: 110M240, İzmir.
- Tayefi V., Lane S. N., Hardy R. J., Yu D., (2007), *A comparison of one-and two-dimensional approaches to modelling flood inundation over complex upland floodplains*, Hydrological Processes: An International Journal, 21(23), 3190-3202.
- Taş E., (2022), *Coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama yardımıyla hidrolojik ve taşkın modellemesi karar destek sistemi*, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Tedla M. G., Cho Y., Jun K., (2021), *Flood mapping from dam break due to peak inflow: a coupled rainfall-runoff and hydraulic models approach*, Hydrology, 8(2), 89. doi: 10.3390/hydrology8020089.
- URL-1, (2021), *Türkiye'nin iklim değişikliği uyum stratejisi ve eylem planı*, T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/file/eylem%20planlari/uyum_stratejisi_eylem_plani_TR.pdf, [Erişim 16 Mayıs 2021].
- URL-2, (2021), *Google Earth*, <https://earth.google.com/web/@38.1080977,41.21042536,587.67602142a,3938.96032624d,35y,-2.00463976h,74.08192465t,0r/data=CjwaOhI0CiUweDQwMGI0ZmMwZDdlZmRmZTU6MHg2MDU1ODFIZmQ5ODM2ZjU4KgtCxlHDP2Frw6fEsRgBIAE>, [Erişim 20 Ekim 2021].
- URL-3, (2021), *Yükseklik verileri (GRID)*, T. C. Milli Savunma Bakanlığı, Harita Genel Müdürlüğü, <https://www.harita.gov.tr/urun/sayisal-yuzey-modeli-sym-5-m/1>, [Erişim 20 Ekim 2021].
- URL-4, (2021), *NASA Earth Data*, ASF data search. <https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=5.463¢er=35.490,36.970>, [Erişim 20 Ekim 2021].
- URL-5, (2021), *USGS Earth Explorer*, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, [Erişim 20 Ekim 2021].
- URL-6, (2021), *ESA. ESA world cover project 2021*. https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/?language=en&bbox=39.774614472282515,37.44782692969076,42.00440783770242,38.66990010042235&overlay=false&bgLayer=MapBox_Satellite&date=20220418&layer=WORLDCOVER_2020_MAP, [Erişim 2 Ekim 2021].
- USACE, (2014), *Using HEC-RAS for Dam-Break studies*, Report No: TD-39, USACE, pp. 1-74. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>, [Erişim 16 Mayıs 2021].
- USACE HEC, (2021), *HEC-RAS River Analysis System User's Manual, Version 6.0*, <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/6.0>, [Erişim 16 Mayıs 2021].
- Wilby R. L., Beven K. J., and Reynard N., (2008), *Climate change and fluvial flood risk in the UK: more of the same?*, Hydrological Processes, 22(14), 2511-2523. doi:10.1002/hyp.v22:14.
- Zhang L. M., Xu Y., Jia J. S., (2009), *Analysis of earth dam failures: A database approach*, Georisk, 3(3), 184-189.