



## Taşkın Modelleme Yöntemlerinin Gözden Geçirilmesi ve Karşılaştırılması

Vahdettin Demir<sup>1</sup>, Neslihan Beden<sup>2</sup>, Aslı Ülke Keskin<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-6590-5658), [vahdettin.demir@karatay.edu.tr](mailto:vahdettin.demir@karatay.edu.tr)

<sup>2</sup> Samsun Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-5573-8016), [neslihan.beden@samsun.edu.tr](mailto:neslihan.beden@samsun.edu.tr)

<sup>3</sup> Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-9676-8377), [asli.ulke@omu.edu.tr](mailto:asli.ulke@omu.edu.tr)

(1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2021, November 1-3, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1010220)

**ATIF/REFERENCE:** Demir, V., Beden, N. & Keskin, A. Ü. (2021). Taşkın Modelleme Yöntemlerinin Gözden Geçirilmesi ve Karşılaştırılması. *European Journal of Science and Technology*, (28), 1013-1021.

### Öz

Bu çalışmada, global anlamda en büyük felaketlerden biri olan taşkınların analiz edilmesinde kullanılan son teknoloji deneysel, hidrodinamik ve basit kavramsal modeller karşılaştırılmaktadır. Çalışmada taşkın modellemesinde yaşanan en son gelişmeler vurgulanarak, mevcut modellerin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmaktadır. Modelleme konusundaki belirsizliklerin analiz edilmesinde kullanılabilir çeşitli yaklaşımlar ve ele alınış biçimleri irdelenmiştir. Çalışmanın amacı, bu konu üzerine yapılacak çalışmalar için su kaynaklarının yönetimi üzerine çalışan bilim insanlarına, acil durum müdahale kuruluşlarına, sigorta şirketlerine ve diğer karar vericilere konu ile ilgili en son bilgileri vermek ve taşkınlarla ilgili pratik sorunların çözümü için en uygun yöntemin ya da modelin seçilmesinde rehberlik etmektir. Çalışma ile modelleme amacına ve modelleme sonucunda elde edilmek istenen spesifik çıktılara göre, ihtiyaç duyulacak veriler ve analiz yöntemleri anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Taşkınlar, Doğal afetler, Hidrodinamik modelleme, Uzaktan algılama.

## Review and Comparison of Flood Modeling Methods

### Abstract

In this study, the latest technology experimental, hydrodynamic and simple conceptual models used to analyze floods, one of the greatest disasters globally, are compared. In this study, the latest developments in flood modeling are emphasized and the advantages and disadvantages of the existing models are presented. Various approaches and ways of analyzing the uncertainties about modeling are discussed. The aim of the study is to give the latest information on the subject to the scientists, emergency response organizations, insurance companies and other decision makers working on water resource management for the studies on this subject and to guide the selection of the most appropriate method or model for solving practical problems related to floods. it is to. According to the aim of modeling and modeling, the data and analysis methods will be needed.

**Keywords:** Floods, Natural disasters, Hydrodynamic modeling, Remote sensing.

<sup>1</sup> Sorumlu Yazar: [vahdettin.demir@karatay.edu.tr](mailto:vahdettin.demir@karatay.edu.tr)

## 1. Giriş

Taşkın, meydana geldiği her bölgede önemli oranda can ve mal kaybına neden küresel bir olgudur. İnsan toplulukları için en yıkıcı, en yaygın ve en sık görülen doğal afettir. Öte yandan, taşkınlar gerçekte doğal su döngüsünün bir parçası olduğundan sonuçları her zaman olumsuz değildir. Özellikle uzun süreli kuraklıklara maruz olan bölgelerde meydana gelen taşkınlar büyük çevresel ve sosyal faydalara sahip olabilir. Diğer yandan periyodik taşkınlar çoğu nehir ve kıyı sulak alanlarındaki ekosistemler için hayati önem taşımaktadır (René et al., 2015). İnsanlık tarihi boyunca, taşkınları ve etkilerini anlamak, değerlendirmek ve tahmin etmek için pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir ve bu amaca yönelik olarak taşkın modelleri geliştirilmiştir. Can kaybına neden olma açısından taşkınlar; kuraklık, deprem ve fırtınalardan sonra dördüncü sırada yer almakta ve dünya çapında yaklaşık 180 milyon insanı etkilemektedir (Shamaoma, 2005; Mogollon vd, 2016).

Taşkın modelleri; yaygın olarak taşkın risk haritalarının üretilmesinde (Apel, Thielen, Merz, & Blöschl, 2006; Dutta, Herath, & Musiak, 2006), taşkın hasar değerlendirmesinde (Bhuiyan & Dutta, 2012; B. Merz, Kreibich, Schwarze, & Thielen, 2010; Mokhtari, Soltani, & Mousavi, 2017; Vojtek & Vojteková, 2016), gerçek zamanlı taşkın tahmini çalışmalarında (Arduino, Reggiani, & Todini, 2005; René et al., 2015), taşkınlar ile ilgili mühendislik çalışmalarında (Gallegos, Schubert, & Sanders, 2009), su kaynaklarının planlanmasında (Dutta et al., 2013), akarsularda şev erozyonu ve sediment taşınımı çalışmalarında (Marriott, 1992; Pizzuto, 1987), nehir hidrolojisi (Dutta et al., 2013) ve havza hidrolojisinde (Abbott, Bathurst, Cunge, O'Connell, & Rasmussen, 1986; Beven, 1989), taşkın ovası ekolojisi ve kirlilik çalışmalarında (Karim et al., 2015) kullanılmaktadır. Genel olarak, herhangi bir modellemeyi uygularken, zamansal ve mekansal ölçekte, model çıktılarının içeriğinin beklenen ve gereken doğruluk seviyesine sahip olması ve hesap süresi verimliliği açısından talepleri karşılaması amaçlanır. Burada modelin hangi amaç için kurulduğu önemlidir. Gerçek zamanlı taşkın tahmin çalışmalarında, modellerin gerçek zamanlı verileri benzeştirerek kısa sürede sonuç vermesine ihtiyaç vardır. Kentsel alanlardaki taşkın riski değerlendirmelerinde, kritik üstü (sel) akımı doğru biçimde hesaplayabilecek akışkanlar dinamiğini benzeştiren sayısal bir model gerekmektedir. Akım hızlarının; baraj inşaatı, taşkın hasar değerlendirmesi veya erozyon çalışmaları için dikkatle modellenmesi ve raporlanması gerekirken, tehlike haritalarının üretimi ve su kaynaklarının planlaması için maksimum taşkın yayılım alanı ile maksimum su derinliği yeterlidir. Tüm bu değerlendirmelere göre kullanıcıların, model karmaşıklığı ve veri gereksinimleri karşısında taleplerini dengeleyecek bir modeli seçmeleri gerekmektedir. İklim modelleri, hidrolojik modeller ve hidrolik modelleri birleştirilen ve bu sistemlerle uyumlu çalışan taşkın modeli uygulamaları, iklim adaptasyonu ve risk azaltma stratejilerini formüle etmeyi amaçlamaktadır. Taşkın modelleri ile taşkın yayılım karakteristiklerinin güvenilir ve gerçekçi bir şekilde benzeşimi, su kaynaklarının sürdürülebilir biçimde planlanmasına ve çevre sağlığının korunmasına olanak sağlamaktadır. Günümüz hidrolik çözümleri için gereken matematiksel denklemler Saint-Venant (1871) tarafından formüle edilmiştir. Gelişmiş hesap makinelerinin ya da bilgisayarların üretilip yaygınlaşmasına kadar bu denklemlerin çözümü ve mühendislik problemlerine pratik olarak uygulanabilmesi mümkün olmamıştır (Stelling & Verwey, 2005). Modern taşkın modellemesinin tarihi, ellili ve

altmışlı yıllara dayanmaktadır (Cunge, Holly, & Verwey, 1980; Cunge & Wegner, 1964; Isaacson, Stoker, & Troesch, 1958; Katopodes & Strelkoff, 1978; Mahmood, Yevjevich, & Miller, 1975; Martin & DeFazio, 1969; Martin & Zovne, 1971). Sayısal kodların yaygınlaşması ve gelişimi ise seksenli yıllarda başlamıştır (Alcrudo, 2004). Özellikle yetmişli yıllardan bu yana bilimsel araştırmacıların sistematik çabası neticesinde taşkın modellemesindeki becerilerin oldukça geliştiği görülmektedir. Son yıllarda bilgisayar bilimi alanındaki gelişmeler; doğru, hesaplanabilir ve yüksek çözünürlüklü taşkın modellerinin üretilmesini ve uygulanmasını sağlamıştır. Bu sayede günümüzde, taşkın risk analizi, gerçek zamanlı taşkın tahmini veya taşkın yönetimi gibi büyük ölçekli problemlerin çözülmesine olanak veren; ani taşkınlar, baraj yıkılmaları gibi spesifik olayların analizi için kullanılabilecek çeşitli tipte modelleme araçları bulunmaktadır.

Birbirinden farklı özelliklere sahip olan modelleme hedefleri çoğunlukla özel modelleme teknikleri ve prosedürleri gerektirmektedir. Bu nedenle herhangi bir taşkın probleminin analizinde problemin içeriğine ve çözüm hedeflerine uyan bir taşkın modelleme aracının kullanılması gerekmektedir. O halde, taşkın modelinin seçimi; problemin türü ve karmaşıklığı, sonuçların gerekli kurum ve kuruluşlara teslim edilmesi için gereken danışmanlık süresi, hesaplama hızı, simülasyon süresi, doğruluk seviyesi, veri gereksinimleri ve yazılımın kullanım kolaylığı gibi faktörlerin sayısına bağlıdır (Stelling & Verwey, 2005). Taşkın modelinin seçimi, modelleme sorununun niteliğinin yanı sıra model kullanıcısının kişisel tercihlerine de bağlıdır.

Taşkın modelleri, model boyutu veya farklı boyutları birleştirme yeteneklerine göre genellikle kategorize edilmektedir. Geçtiğimiz yüzyılda, taşkınlar için iki yaklaşım grubu en fazla ilgiyi çekmiştir; bunlardan ilki deneme ve yanılma ile elde edilen ampirik yöntemler (Schumann, Bates, Horritt, Matgen, & Pappenberger, 2009; Smith, 1997) ikincisi ise hidrodinamik modelleme yöntemidir. İkinci grup; bir boyutlu (1B) (Brunner, 2016; DHI, 2016a), iki boyutlu (2B) (DHI, 2016b; Moulinec et al., 2011), bir boyutlu-iki boyutlu (1B-2B) modeller ile su seviyelerini ve üç boyutlu hız alanlarını tahmin etmek için kullanılabilecek üç boyutlu (3B) sayısal modellerden oluşmaktadır (Prakash, Rothauge, & Cleary, 2014; Vacondio, Rogers, Stansby, & Mignosa, 2012; Zhang et al., 2019) Ancak üç boyutlu taşkın modelleme yöntemi büyük boyutlarda veri, depolama birimi gibi yüksek maliyetleri nedeniyle pek pratik değildir (Fotovatikhah et al., 2018; Kalinina et al., 2020). Bütün metodlar fizik kanunlarını karmaşık yapıya sahip olan su hareketlerine uygulayarak, akışkan hareketini simüle ederler. Son yıllarda, ulusal ölçekli taşkın risk değerlendirmelerinde olduğu gibi çok büyük taşkın alanlarının ve kısıtlı veriye sahip bölgelerin modellenmesi üçüncü bir yaklaşım grubu olarak yaygınlaşmaktadır. Bu modeller basitleştirilmiş kavramsal modeller olarak tanımlanabilir. Daha basit ve kaba fiziksel uygulamalara dayanan bu modellerin çalışma süreleri hidrodinamik modellerden daha kısadır. Özellikle geniş kapsamlı çalışma alanları ve/veya olasılıksal taşkın riski değerlendirmesinde stokastik modelleme için uygundur. Bu konuda yapılan tüm araştırmalara rağmen, hidrolojik ve hidrolik çalışmalarda yüksek mekansal-zamansal çözünürlüklerin kullanımında zorluklar devam etmektedir. Bu durum taşkın olayının karmaşık ve kaotik doğasından kaynaklanmaktadır (Bruno Merz & Thielen, 2005; Stephens, Bates, Freer, & Mason, 2012). Literatürde pek çok model ve algoritmayı tanıtan ve kıyaslayan birçok teknik ve felsefi tartışmada taşkın modellemesi

üzerine etkili rehberlik sağlamadaki ve en iyi uygulamayı bulmadaki zorluklar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu çalışmada, en son teknolojiyi kullananlar için modelleme yaklaşımlarını tanıtarak, modellerin avantajlarını ve sınırlamalarını analiz edilmiş ve konu üzerine en son gelişmeler vurgulanarak gelecekte meydana gelebilecek yönelimler tartışılmıştır. Bu sayede taşkın modellemesi konusunda çalışmaya başlayacak araştırmacıları bu konuda bilgilendirirken, su kaynaklarının planlanması ve yönetilmesi üzerine çalışmalar yürüten; acil müdahale kurumlarına, sigorta şirketlerine ve diğer karar vericilere pratik problemleri çözmek için en uygun yöntemi/modeli seçmek üzere rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte, yayınlanmış tüm çalışmaları ve mevcut tüm modelleri kapsamak mümkün değildir. Bunun yerine, taşkın modellemesinde yeni kavramları veya gerçek gelişmeleri ele alan ve farklı modelleme yaklaşımlarını karşılaştıran çalışmalara odaklanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Ampirik Metotlar

İnsan oğlu var olduğundan bu yana taşkınlardan etkilenmiştir. Taşkınlar sonucu meydana gelen zararlar ve faydalar toplumsal yapıya etki ederek insanlığın gelişiminde belirgin bir rol oynamıştır. Pleistosen döneminin (buzul çağı) sonlarına doğru Rusya'nın Altay bölgesinde bulunan Kuray nehrinde buzul yıkılması ile meydana gelen taşkında 18 milyon m<sup>3</sup>/s debi geçtiği araştırmacılar tarafından belirlenmiştir (Baker, Addams, & Davis, 2005). Bu tür çalışmalardan ilham alan jeologlar, hidrologlar ve tarihçiler taşkınların insanlık ve dünya ekosistemi üzerindeki rolünü araştırmış ve taşkınların dünyamızı şekillendirmedeki önemini ortaya koymuştur (O'Connor & Baker, 1992). Geçmişten bugüne insan toplulukları taşkınlar ile alakalı verileri toplamak, işlemek ve analiz etmek amacıyla basitten gelişmiş pek çok yöntem ortaya koymuştur. Bu yöntemlerden en önemlisi ve ilki taşkın gözlemlerinin veri olarak kaydedilmesidir. Geçmiş verileri dikkate alan modellerin genellikle doğru sonuç verdiği kabul edilir. Gözlem verileri uzaktan algılama ile taşkın derecesinin belirlenmesi, hidrodinamik modelleme ve model kalibrasyonu gibi diğer yöntemler için de bir girdi konumundadır (Beden, 2019; Demir & Ülke Keskin, 2020; Smith, 1997).

### 2.2. Hidrodinamik Modeller

Hidrodinamik modeller, akışkan hareketini benzeştirmeye çalışan ve genelde bilgisayar ortamında çözüm gerektiren sayısal modellerdir. Bu modeller fizik yasalarını uygulayarak formüle edilmiş denklemleri çözerek su hareketini benzeştirirler. Taşkın yatağında meydana gelen akımın uzamsal gösterimlerine bağlı olarak, bu modeller boyutsal olarak 1B, 2B ve 3B modeller şeklinde gruplandırılabilir. Tablo 1'de, taşkın modellemesinde kullanılan bazı modeller ve model geliştiricileri verilmiştir.

#### 2.2.1. 1B Modeller

1B modeller kullanıcının akımı kanalının merkezi boyunca membadan mansaba doğru tek yönlü olarak ele aldığı en basit modellerdir. Akım için başka boyutlarda bilgilerin gerekli olmadığı sınırları belirli bir kanal ya da cebri boru akımları gibi belirgin 1B akımlar çok fazla ayrıntı gerektirmezler ve bu akımlarda 1B modeller kullanılmaktadır. Ayrıca 1B modeller, açık kanallarda taşkın yatağı akımını modellemek için

kullanılabilir; bu durumda taşkın yatağı akımının bir boyutlu kanal akımının bir parçası olduğu ve akımın yönünün ana kanala paralel olduğu varsayılır. Taşkın yatağında meydana gelecek akım hızlarını temsil etmek üzere talveg boyunca alınan enine kesitlerde ortalama hız kullanılır. 1B modellerin çözümünde; aralarında  $\Delta x$  mesafesi bulunan iki kesit arasında momentum ve kütle korunumuna dayanan Saint-Venant denklemleri kullanılır.  $Q$ ; ortalama kesitsel hızla göre hesaplanan debi,  $t$ ; zaman,  $h$ ; su derinliği,  $g$ ; yerçekimi ivmesi,  $S_f$ ; sürtünme eğimi,  $S_0$ ; yatak eğimi,  $A$ ; akım alanı olmak üzere, momentumun korunumu denklemi (1)'de, kütle korunumu denklemi (2)'de verilmiştir (Teng et al., 2017).

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q^2}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

1B Saint-Venant denklemleri, yine Saint-Venant denklemleri olarak bilinen 2B sığ su denklemlerinin basitleştirilmiş halidir. (1) ve (2) numaralı denklemlerin analitik çözümü yoktur, bu denklemlerin çözümünde her hesap süresi için  $Q$  ve  $h$  tahminleri yapan numerik metotlar kullanılmaktadır.

Basit ve pratik olmasına rağmen, 1B modeller sadece tek yönlü bir hesaplama yapar, bu da kesitler arasında boşluklara neden olur. Bu nedenle, 1B modeller, karmaşık akışa sahip sistemler ile engebeli arazilerin modellenmesinde yetersiz kalmaktadır (Huthoff, Remo, & Pinter, 2015). 1B modeller, sürekli akım analizi için daha uygundur ve modelleme öncesi ve sonrası düzenlemeler yapılarak çoğunlukla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile uyumlu hale getirilmektedir (Bates & De Roo, 2000; Cesur, 2007; Zerger & Wealands, 2004).

#### 2.2.2. 2B Modeller

2B modeller, üçüncü boyut olan su derinliğinin diğer iki boyuta kıyasla oldukça sığ olduğu varsayımıyla taşkın yatağında meydana gelen akımı iki boyutlu bir alan olarak kabul ederler (Roberts, Nielsen, Gray, & Sexton, 2015). Çoğu yaklaşım, bir düzlemde kütle ve momentum korunumunu temsil eden ve Navier-Stokes denklemlerinin derinlik ortalaması alınarak elde edilebilen iki boyutlu sığ su denklemlerini çözer. Denklemler (3), (4) ve (5)'te verilmiştir.

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

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = 0 \quad (5)$$

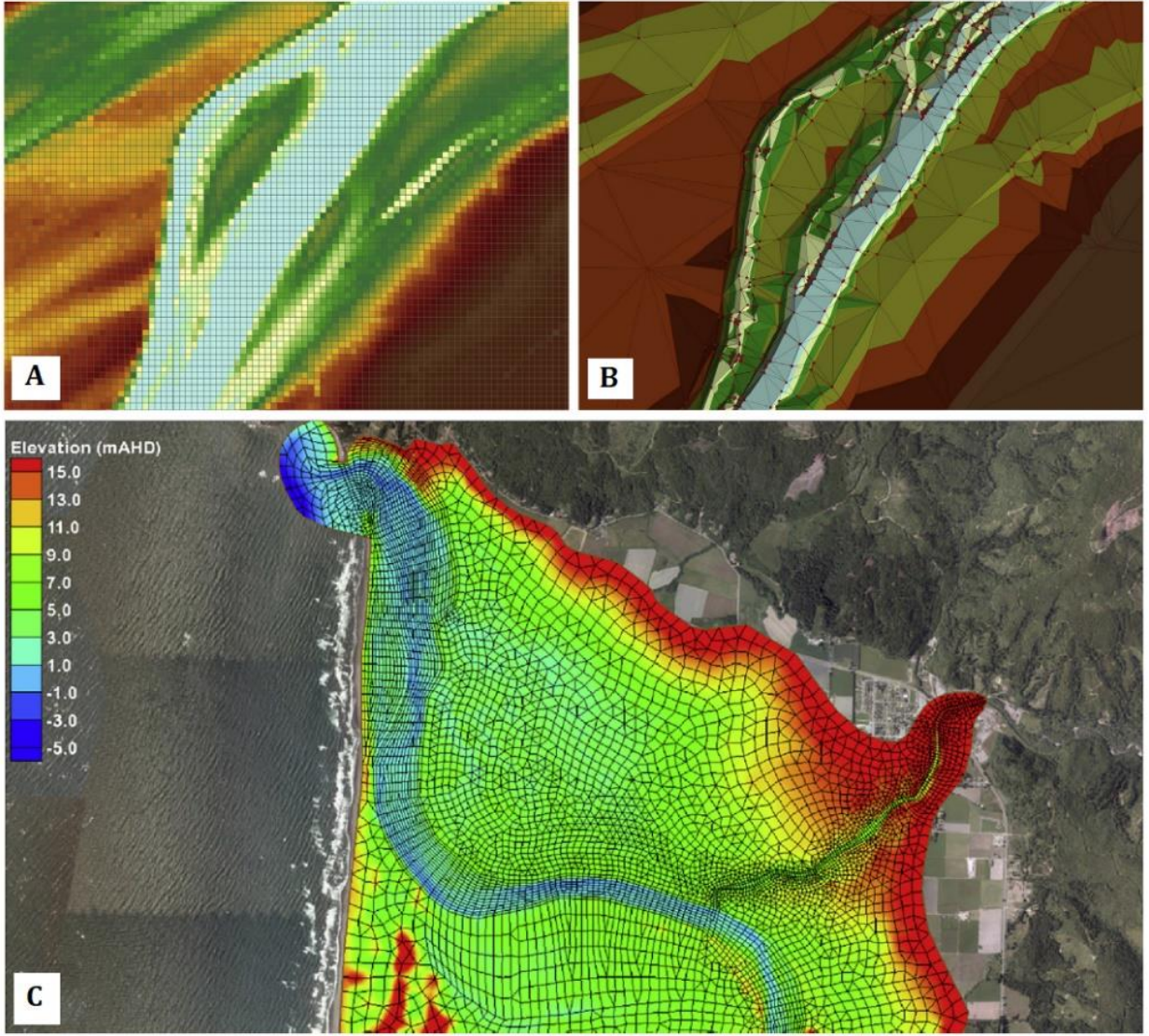
Denklemlerde  $x$  ve  $y$  iki uzamsal boyutu, 2B vektörü ( $u$ ,  $v$ ) ise ortalama yatay hızı göstermektedir. 1B Saint-Venant denklemlerinde olduğu gibi, 2B sığ su denklemlerinin de analitik çözümleri yoktur. Denklemlerin çözümünde kullanılmak üzere çeşitli cebirsel şemaları baz alan modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sayısal ayrıklaştırma yaklaşımlarına bağlı olarak sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacim yöntemleri olarak

sınıflandırılabilir. Zamana göre ayrıklaştırma yapan modeller kapalı (implicit) ve açık (explicit) modellerdir. Mekansal gösterim açısından bu modeller yapılandırılmış ağ (dikdörtgen örgü), yapılandırılmamış ağlar (üçgen ağlar) ve en son, Şekil 1'de

gösterildiği gibi esnek ağlar kullanabilmektedir. 2B hidrodinamik modeller, taşkın yayılım haritalarının oluşturulmasında ve taşkın risklerinin tahmininde en yaygın kullanılan modellerdir (Teng et al., 2017).

Tablo 1. Taşkın modellemesinde kullanılan bazı modeller ve model geliştiricileri

Geliştirici	1B	2B	1B-2B	3B	Bilgiler
Ambiental	-	Flowroute-i	-	-	Ticari
ANSYS	-	-	-	CFX, Fluent	Ticari
Avustralya Ulusal Üniversitesi ve Avusturya Yer Bilimleri	-	ANUGA Hydro	-	-	Açık erişimli
BMT WBM	TUFLOW Classic 1D	TUFLOW Classic, 2D TUFLOW GPU, TUFLOW FV	TUFLOW Classic	TUFLOW FV	Ticari
Bristol Üniversitesi	-	LISFLOOD-FP	LISFLOOD-FP	-	Araştırma amaçlı
California Üniversitesi	-	BreZo	-	-	Araştırma amaçlı
Cardiff Üniversitesi	FASTER	DIVAST DIVAST-TVD	-	-	Araştırma amaçlı
CH2M Hill	Flood Modeller Pro 1D solvers	Flood Modeller Pro 2D Solvers	Flood Modeller Pro	-	Ticari
CSIRO	-	-	SPM	-	Araştırma amaçlı Ticari
DELTARES	SOBEK Suite	SOBEK Suite, DELFT3D	SOBEK Suite	DELFT3D	(DELFT3D açık erişimli)
DHI	MIKE 11, MIKE HYDRO River	MIKE 21	MIKE FLOOD	MIKE 3	Ticari
Electricite De France	MASCARET	TELEMAC 2D	-	TELEMAC 3D	Açık erişimli
Exeter Üniversitesi	SIPSON	UIM	UIM - SIPSON	-	Araştırma amaçlı
FLO-2D Software, Inc.	-	FLO-2D	-	-	Ticari
Innovyze	InfoWorks RS	InfoWorks 2D	InfoWorks ICM	-	Ticari
JBA	-	JFLOW	-	-	Ticari
Kyushu Üniversitesi	-	-	-	Flip3D	Açık erişim
Maxon	-	-	-	Cinema 4D	Ticari
Münih Teknik Üniversitesi ve ETH Zürih	-	-	-	MantafLOW	Açık erişim
Next Limit	-	-	-	Real Flow	Ticari
Nottingham Üniversitesi	-	TRENT	TRENT	-	Araştırma amaçlı
Red Giant	-	-	-	Psunami	Ticari
Scientific Software Group	-	AquaDyn	-	-	Ticari
Svasek Hydraulics	-	Finel 2D CaMa-Flood	-	Finel 3D	Ticari
Tokyo Üniversitesi	-	(Global Ölçekli)	-	-	Araştırma amaçlı
US Army Corps of Engineers	HEC-RAS	HEC-RAS 2D	-	-	Ücretsiz
XP Solutions	-	XP 2D	XPSWMM, XPSTORM	-	Ticari



Şekil 1. 2B modellerde kullanılan farklı örgü yapıları; A) Yapılandırılmış örgü, B) Yapılandırılmamış örgü, C) Esnek örgü (Teng et al., 2017).

### 2.2.3. 3B Modeller

Taşkın modellemesinde çoğu taşkın yatağının mekansal ölçeğinin 1B ya da 2B çözümü yapılmasına olanak vermesi bununla beraber sığ su yaklaşımının özellikle modelin üretilmesi ve doğrulanması aşamalarında mevcut olan veri türü ve kalitesi göz önüne alındığında yeterli olması nedeniyle nehir akımının 3B olarak çözülmesi gereksiz bulunmuştur (Alcrudo, 2004). Bununla birlikte baraj yıkılmaları, hidrolik yapıların üzerinde meydana gelen akımlar ve tsunamiler nedeniyle meydana gelen taşkınlarda dikey türbülans, vortisite hesabı önemlidir. Bu nedenle, dikey akım özelliklerinin gösterilmesine olanak sağlamak için 3B modeller geliştirilmiştir (Monaghan, 1994; Ye & McCorquodale, 1998). Bu modellerin bazıları yatay akımı 2B sığ su denklemleriyle çözer ve dikey katmanlardaki hızı modellemek için yarı-3B bir arayüz içerir (Casulli & Stelling, 1998). 3B modeller, denklemler boyutlu Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiştir (Denklem 6-7).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \Delta u + \frac{1}{\rho} \nabla p = g + \mu \nabla \cdot \nabla u \quad (6)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (7)$$

Denklemlerde,  $u$ ; hız,  $\rho$ ; sıvı yoğunluğu,  $p$ ; basınç,  $g$ ; yerçekimi ivmesi,  $\mu$ ; kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Denklem (6)'da, Newton'un ikinci hareket yasası olan  $F=m \cdot a$  denklemi akışkan hareketine uygulanmaktadır. Denklem (7) ise akışkan yoğunluğunun sabit olduğu varsayımına dayanmaktadır.

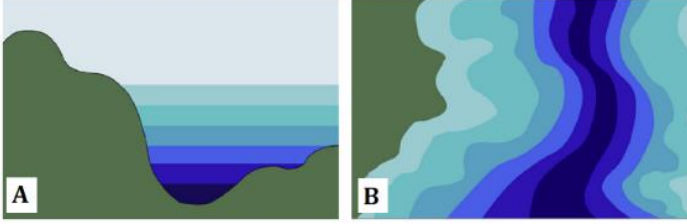
### 2.3. Fiziki Temeli Olmayan Basitleştirilmiş Modeller

Taşkın tahmininde kullanılabilen ancak hidrodinamik model tanımına uymayan bazı çalışmalarda da 0B olarak tanımlanan taşkın modelleri de bulunmaktadır (Pender, 2006).

Bu modellerden bir tanesi "Hızlı Taşkın Yayılım Yöntemi (Rapid Flood Spreading Method-RFSM)"dir. Bu yöntem ile taşkın ön değerlendirmesi gerçekleştirilir, bu bağlamda çalışılan taşkın yatağı, topoğrafyadaki çukur bölgeleri ifade edecek biçimde elemanter parçalara ayrılır ve öncelikle çukur alanlar dolacak biçimde taşkın hacmi araziye yayılır (Lhomme, Sayers, Gouldby,

Wills, & Mulet-Marti, 2008). Kıyaslama çalışmaları (Néelz, S. & Pender, 2013), bu tip bir modelin hidrodinamik modellere kıyasla hesaplama maliyeti açısından net faydalar sağlayarak, nihai su altı dağıtımlarının yaklaşık tahminlerini üretebileceğini göstermektedir.

Basitleştirilmiş bir başka model, “düzlemsel yöntem” veya “küvet yöntemi” dir. Bu yöntem yüksek çözünürlüklü bir SYM ile sık aralıklarla oluşturulan bir dizi düzlemin kesiştirilmesiyle taşkın büyüklüğünü türetir ve su seviyesini/hacmini Şekil 2'de gösterildiği gibi taşkın büyüklüğüyle anında ilişkilendirir (Teng, Vaze, Dutta, & Marvanek, 2015).



Şekil 2. A) Taşkın büyüklüğünün profilde gösterimi, B) Taşkın büyüklüğünün planda gösterimi (Teng et al., 2017).

Dinamik etkilerin göz önüne alınmadığı bu yöntemler 1B hatta 2B modellere göre daha hızlı sonuç üretirler. Bu nedenle sadece maksimum taşkın kotunun gerekli olduğu büyük ölçekli uygulamalarda kullanılması uygundur.

### 3. Bulgular

Akım gözlem istasyonlarında ölçülen su seviyeleri veya akım değerleri taşkın tahminlerinde kullanılan temel bilgilerdir. Bu nedenle ampirik metotların kullanımı; istasyonların zamanla kapatılması yada ölçümlerde birebir insan gücüne ihtiyaç duyulması gibi sebeplerle giderek azalırken, yerini taşkınları havadan veya uzaydan gözlemlenebildiği diğer yöntemlere bırakmaktadır. Bu yöntemlerin tercih edilebilirliğini artıran temel olarak uzaktan algılama teknolojisindeki gelişmelerdir. Son on yılda radarlar ile uzaktan algılama, taşkın modellemesini desteklemek ve geliştirmek için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Kolay erişilebilen SWOT, ALOS, RADARSAT-2, Terra-SAR-X, COSMO-SkyMed ve Sentinel-1 gibi yeni uydular hızlı görüntü elde etme ve görüntüyü işleme, daha yüksek kalite ve daha iyi çözünürlükle sonuçlar vermektedirler. Verilerden daha doğru ve büyük miktarda bilgi çıkarmak için çeşitli algoritmalar ile veri madenciliği gibi teknikler geliştirilmiştir.

İki uzaktan algılama ürünü olan SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ve LiDAR (Laser Imaging Detection ve Ranging) sayısal yükseklik modelleri (SYM) hem hidrodinamik modeller hem de geniş kullanılabilirlikleri ve yüksek kaliteleri sayesinde basitleştirilmiş kavramsal modeller için topografik girdi olarak rutin olarak kullanılmaktadır (Bates, Horritt, Smith, & Mason, 1997; Martinis, Twele, & Voigt, 2009; Matgen et al., 2011; Mure-Ravaud et al., 2016; Pulvirenti, Chini, Pierdicca, Guerriero, & Ferrazzoli, 2011; Sanyal & Lu, 2004; G. Schumann, Bates, Horritt, Matgen, & Pappenberger, 2009; Smith, 1997; Ticehurst, Dutta, Karim, Petheram, & Guerschman, 2015). Bununla birlikte, uzaktan algılama ile taşkın yayılımı ve su seviyelerini belirlemede belirsizlikler bulunmaktadır ve bu belirsizliğin ölçülmesi son yıllarda uzaktan algılama araştırmalarının önemli bir unsuru haline gelmiştir (Stephens et al., 2012).

### 4. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Taşkın nehir yatağında bulunan su miktarının çeşitli nedenlerle akarsu yatak kesitine sığamayarak, canlılara ve çevresindeki arazilere, zarar veren doğal bir afettir. Dünyada ve ülkemizde can ve mal kayıpları açısından tüm afetler arasında ikinci, meteorolojik afetler arasında ise ilk sırada yer almaktadır. Yaşamımızı etkileyen taşkınların maddi ve manevi zararlarını azaltmak için taşkın afet haline getiren mekanizmasının iyi bilinmesi ve taşkın meydana gelmeden önce yapılacak modellemelerle önlemler alınması gerekmektedir (Demir & Ülke Keskin, 2021).

Deneme ve yanılma ile elde edilmiş teorik yöntemler taşkın izleme ve afet sonrası değerlendirme için oldukça yeterli olsa da, baraj yıkılması, tsunamiler veya ani taşkınların etkilerini araştırmak için ayrıntılı akış dinamiklerini temsil etmek için hidrodinamik modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Basitleştirilmiş kavramsal modeller, iyi tanımlanmış kanallara sahip büyük bir taşkın yatağında olasılıklı taşkın riski değerlendirmesi ve çoklu senaryo modellemesi için daha çok tercih edilmektedirler. Taşkınların çevre ve insanlar üzerindeki etkisini anlamak, değerlendirmek ve tahmin etmek için taşkın modellerini geliştirmek, birleştirmek ve uygulamak en etkili yol olarak görülmektedir. Taşkın modelleyicileri, kendi modellerine aşırı uyumlu olmanın bağlayıcılığından kaçınmalı ve tamamen farklı bir alandan bile gelebilecek yeni fikirlere, yeni teknolojilere ve yeni fırsatlara her zaman entegre olma cesaretine ve bilgeliğine sahip olmaları gerekmektedir (Teng et al., 2017).

Sonuç olarak, geçen yüzyılda ve özellikle 1970'lerden bu yana, taşkın modellemesinde itici bir güçle önemli gelişmeler olmuştur. Çağın teknolojisi olan uydu görüntüleri, görüntü işleme teknikleri ve çok boyutlu modellerle taşkın modellemesinde gelişmeler artarak devam etmektedir. Taşkın modellemesinde en doğru ve gerçekçi model ise kullanıcının talebinin, hesaplama tekniğinin ve veri kalitesinin dengesi aranarak ancak gerçekleştirilebilir (Jakeman, Letcher, & Norton, 2006).

Bu çalışmada, taşkınların analiz edilmesinde kullanılan son teknoloji deneysel, hidrodinamik ve basit kavramsal modeller incelenmiş ve karşılaştırılmaktadır. Çalışmada taşkın modellemesinde yaşanan en son gelişmeler vurgulanarak, mevcut modellerin avantajları ve dezavantajları ortaya konmuştur.

### Kaynakça

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1–2), 61–77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90115-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90115-0)
- Alcrudo, F. (2004). *A State of the Art Review on Mathematical Modelling of Flood Propagation, IMPACT Project*.
- Apel, H., Thielen, A. H., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*, 38(1–2), 79–100. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7>
- Arduino, G., Reggiani, P., & Todini, E. (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4), 280–284. <https://doi.org/10.5194/hess-9-280-2005>
- Baker, W. H., Addams, H. L., & Davis, B. (2005). Critical Factors for Enhancing Municipal Public Hearings. *Public*

- Administration Review*, 65(4), 490–499. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2005.00474.x>
- Bates, P. ., & De Roo, A. P. . (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1–2), 54–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X)
- Bates, P. D., Horritt, M. S., Smith, C. N., & Mason, D. (1997). Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling. *Hydrological Processes*, 11(14), 1777–1795. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199711\)11:14<1777::AID-HYP543>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199711)11:14<1777::AID-HYP543>3.0.CO;2-E)
- Beden, N. (2019). *Cevizdere havzasının sayısal modelleme sistemlerine dayalı taşkın analizi ve taşkın zararlarının değerlendirilmesi*. O.M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105(1–2), 157–172. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90101-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7)
- Bhuiyan, M. J. A. N., & Dutta, D. (2012). Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. *Natural Hazards*, 61(2), 729–743. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0059-3>
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0, (CPD-68A), 1–171. Retrieved from [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)
- Casulli, V., & Stelling, G. S. (1998). Numerical Simulation of 3D Quasi-Hydrostatic, Free-Surface Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(7), 678–686. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:7\(678\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:7(678))
- Cesur, D. (2007). GIS as an information technology framework for water modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 9(2), 123–134. <https://doi.org/10.2166/hydro.2007.008>
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Boston: Pitman Advanced Publishing.
- Cunge, J. A., & Wegner, M. (1964). Intégration numérique des équations d'écoulement de barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies. *La Houille Blanche*, 50(1), 33–39. <https://doi.org/10.1051/lhb/1964002>
- de Saint-Venant, B. Saint-Venant, A.J.C. SAINT-VENANT, DE BARRÉ, AJC Saint-Venant, D. Barre, J. Saint-Cyr, Venant de Saint, A.J.C. SAINT-VENANT, J. S.-C. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction de marées dans leurs lits.
- Demir, V., & Ülke Keskin, A. (2020). Obtaining the Manning Roughness with Terrestrial-Remote Sensing Technique and Flood Modeling using FLO-2D, a case study Samsun from Turkey. *Geofizika*. <https://doi.org/doi.org/10.15233/gfz.2020.37.9>
- Demir, Vahdettin, & Ülke Keskin, A. (2021). Yeterince akım ölçümü olmayan nehirlerde taşkın debisinin hesaplanması ve taşkın modellemesi (Samsun, Mert Irmağı örneği). *Geomatik*, 7(2), 149–162. <https://doi.org/10.29128/geomatik.918502>
- DHI. (2016a). *DHI (Danish Hydraulic Institute) MIKE11 a modelling system for rivers and channels Reference manual*.
- DHI. (2016b). *DHI (Danish Hydraulic Institute) MIKE21 flow model FM User Guide*.
- Dutta, D., Herath, S., & Musiak, K. (2006). An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrological Processes*, 20(6), 1365–1384. <https://doi.org/10.1002/hyp.6092>
- 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. *Journal of Hydrology*, 504, 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.033>
- Fotovatikhah, F., Herrera, M., Shamshirband, S., Chau, K., Faizollahzadeh Ardabili, S., & Piran, M. J. (2018). Survey of computational intelligence as basis to big flood management: challenges, research directions and future work. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 411–437. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1448896>
- 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. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1323–1335. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.05.008>
- Huthoff, F., Remo, J. W. F., & Pinter, N. (2015). Improving flood preparedness using hydrodynamic levee-breach and inundation modelling: Middle Mississippi River, USA. *Journal of Flood Risk Management*, 8(1), 2–18. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12066>
- Isaacson, E., Stoker, J. J., & Troesch, A. (1958). Numerical Solution of Flow Problems in Rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 84(5), 1–18. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000220>
- Jakeman, A. J., Letcher, R. A., & Norton, J. P. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 21(5), 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.004>
- Kalinina, A., Spada, M., Vetsch, D. F., Marelli, S., Whealton, C., Burgherr, P., & Sudret, B. (2020). Metamodeling for Uncertainty Quantification of a Flood Wave Model for Concrete Dam Breaks. *Energies*, 13(14), 3685. <https://doi.org/10.3390/en13143685>
- Karim, F., Dutta, D., Marvanek, S., Petheram, C., Ticehurst, C., Lerat, J., ... Yang, A. (2015). Assessing the impacts of climate change and dams on floodplain inundation and wetland connectivity in the wet-dry tropics of northern Australia. *Journal of Hydrology*, 522, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.005>
- Katopodes, N. D., & Strelkoff, T. (1978). Computing Two-Dimensional Dam-Break Flood Waves. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(9), 1269–1288. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005062>
- Lhomme, J., Sayers, P., Gouldby, B., Wills, M., & Mulet-Marti, J. (2008). Recent development and application of a rapid flood spreading method. *Flood Risk Management: Research and Practice*, (October), 15–24. <https://doi.org/10.1201/9780203883020.ch2>
- Mahmood, K., Yevjevich, V. M., & Miller, W. A. (1975). *Unsteady flow in open channels*. Fort Collins, Colo. : Water Resources Publications, 1975. [https://doi.org/https://www.vgls.vic.gov.au/client/en\\_AU/VGLS-public/search/detailnonmodal?qu=Channels+%28Hydraulic+engineering%29&d=ent%3A%2F%2FSD\\_ILS%2F0%2FSD\\_ILS%3A82999%7EILS%7E0&ic=true&ps=300](https://doi.org/https://www.vgls.vic.gov.au/client/en_AU/VGLS-public/search/detailnonmodal?qu=Channels+%28Hydraulic+engineering%29&d=ent%3A%2F%2FSD_ILS%2F0%2FSD_ILS%3A82999%7EILS%7E0&ic=true&ps=300)
- Marriott, S. (1992). Textural analysis and modelling of a flood deposit: River severn, U.K. *Earth Surface Processes and*

- Landforms*, 17(7), 687–697.  
<https://doi.org/10.1002/esp.3290170705>
- Martin, C. S., & DeFazio, F. G. (1969). Open-Channel Surge Simulation By Digital Computer. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), 2049–2070.  
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002204>
- Martin, C. S., & Zovne, J. J. (1971). Finite-Difference Simulation of Bore Propagation. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(7), 993–1010.  
<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003043>
- Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2009). Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 303–314. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-303-2009>
- Matgen, P., Hostache, R., Schumann, G., Pfister, L., Hoffmann, L., & Savenije, H. H. G. (2011). Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7–8), 241–252. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2010.12.009>
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. (2010). Review article “assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(8), 1697–1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Merz, Bruno, & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1–4), 114–132.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.015>
- Mokhtari, F., Soltani, S., & Mousavi, S. A. (2017). Assessment of Flood Damage on Humans, Infrastructure, and Agriculture in the Ghamsar Watershed Using HEC-FIA Software. *Natural Hazards Review*, 18(3), 04017006.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)nh.1527-6996.0000248](https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000248)
- Monaghan, J. J. (1994). Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110(2), 399–406.  
<https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1034>
- Moulinec, C., Denis, C., Pham, C.-T., Rougé, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., ... Gu, X.-J. (2011). TELEMACH: An efficient hydrodynamics suite for massively parallel architectures. *Computers & Fluids*, 51(1), 30–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.003>
- Mure-Ravaud, M., Binet, G., Bracq, M., Perarnaud, J. J., Fradin, A., & Litrico, X. (2016). A web based tool for operational real-time flood forecasting using data assimilation to update hydraulic states. *Environmental Modelling and Software*, 84, 35–49.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2016.06.002>
- Néelz, S., & Pender, G. (2013). *Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages*.
- O’CONNOR, J. E., & BAKER, V. R. (1992). Magnitudes and implications of peak discharges from glacial Lake Missoula. *Geological Society of America Bulletin*, 104(3), 267–279.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<0267:MAIOPD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<0267:MAIOPD>2.3.CO;2)
- Pender, G. (2006). Briefing: Introducing the Flood Risk Management Research Consortium. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 159(1), 3–8. <https://doi.org/10.1680/wama.2006.159.1.3>
- PIZZUTO, J. E. (1987). Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, 34(2), 301–317.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00779.x>
- Prakash, M., Rothauge, K., & Cleary, P. W. (2014). Modelling the impact of dam failure scenarios on flood inundation using SPH. *Applied Mathematical Modelling*, 38(23), 5515–5534. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.011>
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N., Guerriero, L., & Ferrazzoli, P. (2011). Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 990–1002.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.002>
- René, J.-R., Djordjević, S., Butler, D., Mark, O., Henonin, J., Eisum, N., & Madsen, H. (2015). A real-time pluvial flood forecasting system for Castries, St. Lucia. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S269–S283.  
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12205>
- Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., & Sexton, J. (2015). ANUGA User Manual, (May), jg.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12401.99686>
- Sanyal, J., & Lu, X. X. (2004). Application of Remote Sensing in Flood Management with Special Reference to Monsoon Asia: A Review. *Natural Hazards* 33:2, 33(2), 283–301.  
<https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037035.65105.95>
- Schumann, G., Bates, P. D., Horritt, M. S., Matgen, P., & Pappenberger, F. (2009). Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Reviews of Geophysics*, 47(4).  
<https://doi.org/10.1029/2008RG000274>
- Schumann, G. J.-P., Bates, P. D., Horritt, M. S., Matgen, P., & Pappenberger, F. (2009). Progress in integration of remote sensing derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Reviews of Geophysics*, 47.
- Smith, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11(10), 1427–1439.  
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199708\)11:10<1427::aid-hyp473>3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199708)11:10<1427::aid-hyp473>3.0.co;2-s)
- Stelling, G. S., & Verwey, A. (2005). Numerical Flood Simulation. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa025a>
- Stephens, E. M., Bates, P. D., Freer, J. E., & Mason, D. C. (2012). The impact of uncertainty in satellite data on the assessment of flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 414–415, 162–173.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.10.040>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 90, 201–216.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Teng, J., Vaze, J., Dutta, D., & Marvanek, S. (2015). Rapid Inundation Modelling in Large Floodplains Using LiDAR DEM. *Water Resources Management*, 29(8), 2619–2636.  
<https://doi.org/10.1007/S11269-015-0960-8>
- Ticehurst, C., Dutta, D., Karim, F., Petheram, C., & Guerschman, J. P. (2015). Improving the accuracy of daily MODIS OWL flood inundation mapping using hydrodynamic modelling. *Natural Hazards*, 78(2), 803–820.  
<https://doi.org/10.1007/S11069-015-1743-5>
- Vacondio, R., Rogers, B. D., Stansby, P. K., & Mignosa, P. (2012). SPH Modeling of Shallow Flow with Open Boundaries for Practical Flood Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6), 530–541.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000543](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000543)



- 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. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1166874>
- Ye, J., & McCorquodale, J. (1998). Simulation of Curved Open Channel Flows by 3D Hydrodynamic Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 687–698.
- Zerger, A., & Wealands, S. (2004). Beyond Modelling: Linking Models with GIS for Flood Risk Management. *Natural Hazards*, 33(2), 191–208. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037040.72866.92>
- Zhang, N., Song, D., Zhang, J., Liao, W., Miao, K., Zhong, S., ... Huang, C. (2019). The impact of the 2016 flood event in Anhui Province, China on infectious diarrhea disease: An interrupted time-series study. *Environment International*, 127, 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.063>