15 MART 2023 TARİHİNDE ŞANLIURFA'DA MEYDANA GELEN SEL AFETİNİN HİDROLOJİK VE HİDROLİK MODELLEME İLE İNCELENMESİ

Doğukan Kesim[1], Yasin Akın[2],Hüsnü Burak Yütük[3],Abdülbaki Hacı [4], İsmail Bilal Peker[5], Sezar Gülbaz[6]

[1]İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, dogukan.kesim@ogr.iuc.edu.tr

[2]İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, yasin.akin@ogr.iuc.edu.tr

[3]İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, husnuburak.yutuk@ogr.iuc.edu.tr

[4]İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Avcılar, İstanbul, abdulbakihaci0@gmail.com

[5]İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, pekerbilal@iuc.edu.tr

[6]İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, sezarg@iuc.edu.tr

ÖZET

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli deprem afetinden kısa bir süre sonra, 15 Mart 2023 tarihinde Şanlıurfa İlinde sel afeti meydana gelmiştir. Meydana gelen sel afeti 17 kişinin hayatını kaybetmesine ve büyük oranda maddi hasara neden olmuştur. İki afetin 37 gün gibi kısa sürede arka arkaya meydana gelmesi bölgede selin etkisinin çok daha şiddetli hissedilmesine neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında, sel afetinin nedenlerinin veya afetin boyutunun artmasına neden olan durumların incelenmesi ve bu hususta menfez ve köprülerde ve dere kesitlerinin genişletilmesine yönelik çözüm önerilerinin sunulması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Şanlıurfa ilindeki sel afetinin incelenmesinde Watershed Modeling System (WMS), Hydrologic Engineering Center–Hydrological Modeling System (HEC–HMS) ve Hydrologic Engineering Center–River Analysis System (HEC–RAS) programları kullanılarak hidrolojik ve hidrolik modelleme gerçekleştirilmiştir. Bölgede taşkından etkilenen ve bu çalışma kapsamında incelenen 6 bölge belirlenmiştir. Seçilen 6 bölge için 6 alt havza oluşturulmuştur. Daha sonra, ilk olarak WMS ile havzaların karakteristik özellikleri elde edilmiş, ikinci olarak HEC–HMS ile hidrolojik model oluşturulmuş ve son olarak HEC-RAS ile 2 boyutlu hidrolik modelleme yapılarak taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller ile taşkın afetinin nedenleri sayısal olarak ortaya konulmuş ve etkileri analiz edilmiştir. Özellikle kanal kesitlerinin yetersiz olması, kanal giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen demir parmaklıklar, dere kret kotunun altında kalan yapıların bodrum katları, köprü ve menfezlerin yetersiz tasarımı, nehir yatağına yapılan yerleşimler ve nehir yataklarının değiştirilmesi gibi faktörlerin sel afetinin boyutunun artmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında her bölge için yapısal çözüm önerisi geliştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Doğal Afetler, Taşkın, Şanlıurfa, WMS, HEC-HMS, HEC-RAS, Hidrolojik/Hidrolik Model, Taşkın Yayılım Haritası

GİRİŞ

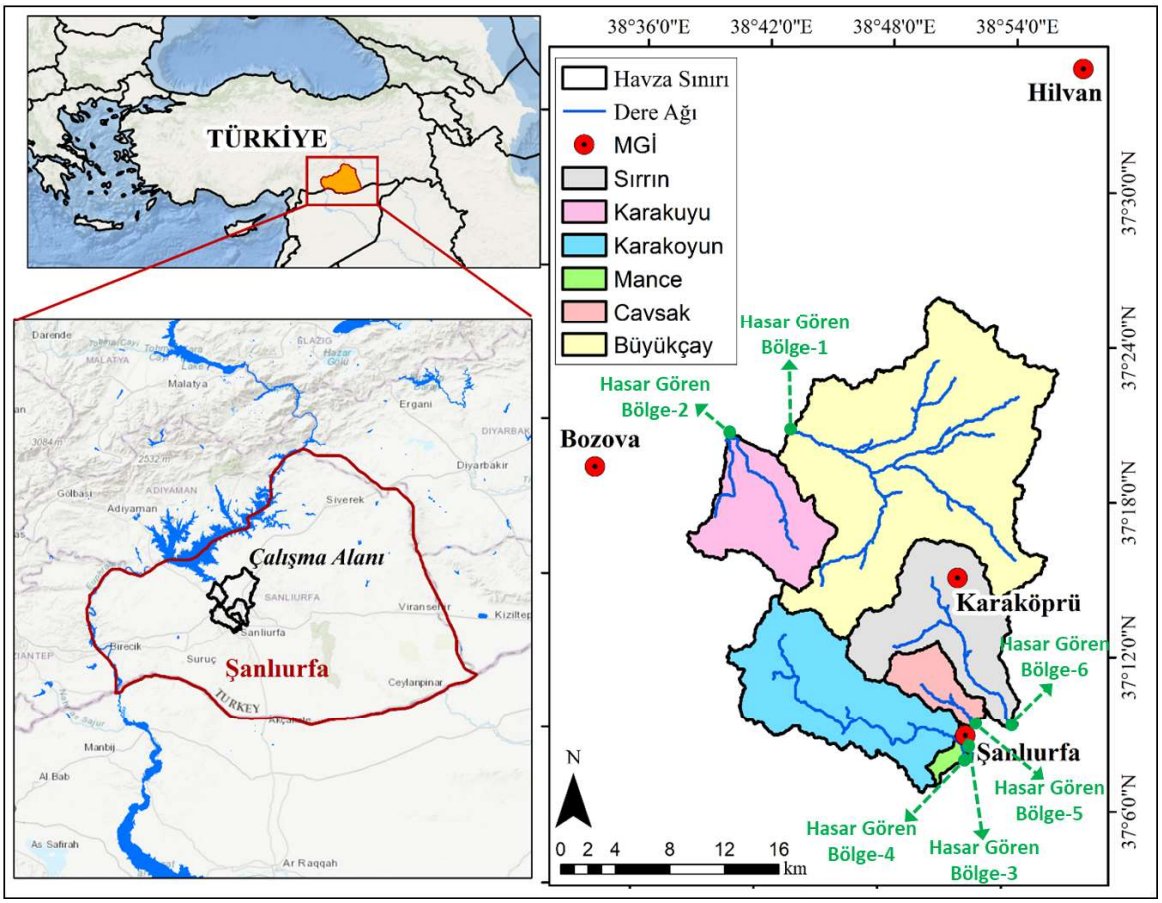
Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle birçok doğal afetle karşı karşıya kalmaktadır. Afetler, insan faaliyetleri veya doğa olayları ile ortaya çıkan, maddi ve manevi kayıplara yol açan, çevresel yardıma ihtiyaç duyulan ve yaşama uyumda zorluk gibi durumları içeren olaylar olarak tanımlanmaktadır (Singh, 2020). Sel felaketleri genellikle en ölümcül doğal afetler olarak kabul edilir (Jonkman & Kelman, 2005). Özellikle kentsel bölgelerde yaşanan taşkınlar, insanlar ve mülkler üzerinde daha yüksek bir risk oluşturduğundan, ekonomik, sosyal ve insan yaşamının birçok yönü açısından kritiktir. Bu tür afetler, sadece maddi kayıplara neden olmakla kalmaz, aynı zamanda toplulukları yerinden edebilir, altyapıyı ciddi şekilde hasara uğratabilir ve genel yaşam kalitesini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, sel riskinin azaltılması ve afetle başa çıkma stratejilerinin geliştirilmesi, kentsel planlama ve toplumsal hazırlık açısından kritik bir öneme sahiptir (Bellos vd., 2015). Bu noktada, taşkın yayılım haritalarının oluşturulması öngörü sağlaması açısından önemli bir rol oynamaktadır (Gülbaz, 2019). Modellemeler ile yapılacak iyileştirmeler ve alınacak önlemler, ilgili bölgede taşkın risklerinin azaltılmasında ve muhtemel hasarların en aza indirilmesinde fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada, Şanlıurfa ilinde yaşanan sel afetini incelemek için hidrolojik ve hidrolik modelleme yöntemleri kullanılmış ve çözüm önerileri geliştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

15 Mart 2023'te Şanlıurfa ilinde meydana gelen ve ölümlere yol açan sel afeti, maddi zararların ve can kayıplarının meydana geldiği alanlar esas alınarak incelenmiştir. Bu kapsamda, sel afetinde hasar gören 6 bölge bu çalışmada incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen 6 bölge Şekil 1 üzerinde görülmektedir. Afet olayının meydana geldiği taşkın alanlarında yer alan dereler üzerinde, afetin meydana geldiği noktalar işaretlenmiştir. Bu noktalar modellerde havza çıkış noktası olarak seçilmiş ve havza alanları belirlenmiştir. Daha sonra, afetin meydana geldiği bu noktalarda meydan gelen taşkın debisi model ile hesaplanmıştır. Bu kapsamda, incelenen 6 bölge için havzalar sırası ile Büyükçay Deresi Havzası, Karakuyu Deresi Havzası, Karakoyun Deresi Havzası, Mance Deresi Havzası, Cavsak Deresi Havzası ve Sırrın Deresi Havzasıdır (Şekil 1). Sel afetinde hasar gören ve çalışma kapsamında incelenen 6 adet bölgeye ait hasar bilgileri ve koordinatlar Tablo 1'de verilmiştir.

Bu havzalara ait hidrolojik ve hidrolik modelleme çalışmaları WMS [URL 1], HEC–HMS (Scharffenberg & Fleming, 2006) ve HEC–RAS (Brunner vd., 2016) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. WMS ile her havza için havza sınırı, alanı ve dere ağı belirlenmiştir. Ayrıca, toprak tipi ve arazi kullanımı haritaları kullanılarak her havza için eşdeğer eğri numarası (CN) değeri hesaplanmıştır. Daha sonra, elde edilen havza karakteristikleri hidrolojik modelin kurulumu için HEC–HMS'e aktarılmıştır. HEC-HMS ile her havza için ayrı ayrı hidrolojik model oluşturulmuştur. HEC-HMS modeli ilk olarak MGM'den temin edilen Bozova (17944), Hilvan (17914), Karaköprü (19341) ve Şanlıurfa (17270) Meteoroloji Gözlem İstasyonlarından alınan (MGİ) 14-16 Mart 2023 de meydana gelen yağış verileri ile çalıştırılmıştır. Bölgede yer alan Meteoroloji gözlem istasyonları arasından seçilen 4 adet istasyona Thiessen Poligon Metodu kullanılarak istasyonların havzalardaki etki alanları dikkate alınarak karar verilmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Daha sonra, yine aynı istasyonlardan alınan 500 Yıllık Tekerrür aralığına sahip Yağış Verisi ile hidrolojik model her havza için çalıştırılmıştır. Hidrolojik modellerden elde edilen hidrograflar, HEC–RAS'a girdi olarak tanımlanarak taşkın yayılım haritaları iki boyutlu olarak elde edilmiştir. Son olarak, HEC-RAS ile 6 bölge için ayrı ayrı hidrolik model oluşturulmuştur. Hidrolik modelleme aşamasında Karakoyun ve Mance Deresi Havzaları yakın olmaları ve kesiştikleri alanda hasar verdikleri yerlerin ortak olması nedeni ile birlikte modellenmiştir.

Dolayısıyla, 5 ayrı HEC-RAS modeli elde edilmiştir. Hasar gören ve çalışmamız kapsamında incelenen Karakuyu Deresi üzerindeki bölge, sel anında meydana gelen tır devrilmesi olayı yaşanması açısından önemlidir. Ayrıca, Sırrın Deresi boyunca birçok yerleşim alanı hasar görmüştür. Büyükçay Deresi'nde Menfez Köprüsü yıkılmıştır. Cavsak Deresi'nin taşması sonucunda Abide Köprülü Kavşağı sel suları altında kalmış ve çok sayıda can kaybı yaşanmıştır. Sel afetine bağlı her bir münferit olayın detaylı incelenebilmesi için sel afetinin yaşandığı alanlar beş ayrı hidrolik modelleme ile incelenmiştir.



Şekil 1. *15 Mart 2023 tarihinde Şanlıurfa'da meydana gelen sel afetinde hasar gören ve çalışma kapsamında incelenen bölgeler.*

Tablo 1. *Sel afetinde hasar gören* ve çalışma kapsamında incelenen *bölgelere ait bilgiler.*

Hasar Gören Bölge-No	Sel Hasarı (Meydana geldiği dere ve havzası)	Koordinatlar
1	Menfez Köprüsü'nün Yıkılması (Büyükçay Deresi Havzası)	37°22'26.9"N 38°40'38.2"E
2	Karayolu Altında Bulunan Menfezin Tıkanması Sonucu Tırın Sürüklenmesi ve Yol Hasarı (Karakuyu Deresi Havzası)	37°22'16.5"N 38°37'55.1"E
3	Justinian Bendi ve Çevresindeki Yerleşim Alanlarında Meydana Gelen Hasarlar (Karakoyun Deresi Havzası)	37°09'32.3"N 38°46'44.6"E

4	Mance Vadisi'nde Yerleşim Alanlarında ve Balıklıgöl ve Hasan Padişah Camii'nde Meydana Gelen Hasarlar (Mance Deresi Havzası)	37°09'02.0"N 38°46'50.7"E
5	Abide Köprülü Kavşağı'nda Meydana Gelen Hasarlar (Cavsak Deresi Havzası)	37°10'03.6"N 38°47'42.7"E
6	Sırrın Deresi Çevresindeki Yerleşim Alanlarında Meydana Gelen Hasarlar (Sırrın Deresi Havzası)	37°09'46.6"N 38°49'40.2"E

Tablo 2. Yağış İstasyonlarının havzadaki alansal dağılımları (temsil oranları)

Havza No	Havza Adı	Yağış İstasyonu Adı	Yağış İstasyonunun havza üzerindeki alansal dağılımları (temsil oranları)
1	Büyükçay	Karaköprü	0.982009
		Bozova	0.01709145
		Hilvan	0.00089955
2	Karakuyu	Bozova	0.61675824
		Karaköprü	0.38324176
5	Karakoyun	Şanlıurfa	0.74900398
		Karaköprü	0.24701195
		Bozova	0.00398406
4	Mance	Şanlıurfa	1.0
5	Cavsak	Şanlıurfa	0.87012987
		Karaköprü	0.12987013
6	Sırrın	Karaköprü	0.78952569
		Şanlıurfa	0.21047431

BULGULAR

Hidrolojik Modellerden Elde edilen Bulgular

MGM'den temin edilen Bozova (17944), Hilvan (17914), Karaköprü (19341) ve Şanlıurfa (17270) Meteoroloji Gözlem İstasyonları (MGİ) verileri incelenmiştir. Bu veriler, Standart Sürelerde Gözlenen En Büyük Yağışlar (SZGEBY) ve 14–16 Mart 2023 tarihli afet olayına ait yağış değerlerini içermektedir. MGİ'lerde ölçülen yağış değerlerinin şiddetli yağış oldukları ve genel olarak 100 yıllık tekerrür aralığına yakın yağış şiddetine sahip oldukları görülmüştür. 14–16 Mart 2023 tarihleri arasında ölçülen yağış değerleri ve 500 yıllık tekerrür aralığına sahip yağış verileri HEC–HMS modeline tanımlanarak model simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Hidrolojik modellerden sel afetinin yaşandığı bölgelerde (noktalarda) 14–16 Mart 2023 tarihlerinde meydana gelen yağış ile 500 yıllık tekerrür aralığına sahip yağış için oluşan debi değerleri elde edilmiştir. Elde edilen hidrograflar hidrolik modele tanımlanmıştır. Ayrıca, Tablo 3'de elde edilen hidrograflara ait maksimum debi değerleri (pik debiler) ve saha incelemesi sırasında sel afetinin yaşandığı bölgeye (noktaya) ait dere, menfez veya köprülere ait kesitler ve kesit alanı verilmiştir.

Tablo 3. HEC-HMS modeli ile havza çıkış noktalarında (hasar gören noktalarda) hesaplana maksimum (pik) debiler.

Hasar Gören Bölge-No	Havza Adı	Kesitler (m)	Kesit Alanı (m^2)	HEC-HMS kullanılarak hesaplanan debi (m^3/s)	
				14-16 Mart 2023 Yağış Verisi ile	500 Yıllık Tekerrür aralığına sahip Yağış Verisi ile
1	Büyükçay Deresi Havzası	Köprü Kesiti: Genişlik=11.65 Yükseklik=5.5	64	261	757
2	Karakuyu Deresi Havzası	Menfez Kesiti: Genişlik=6 Yükseklik=5	30	75	271
3	Karakoyun Deresi Havzası	Dere Kesiti (Kutu Kesit): Genişlik= 12 m Derinlik= 3.5	42	172	327
4	Mance Deresi Havzası	Dere ve Menfez Yok	-	26	77
5	Cavsak Deresi Havzası	Menfez Kesiti: 2x Genişlik=2.5 Yükseklik=3	15	65	153
6	Sırrın Deresi Havzası	Dere Kesiti (Kutu Kesit): Genişlik=10 m Derinlik= 3.4	34	110	353

Hidrolik Modellerden Elde edilen Bulgular

Çalışma kapsamında, Şekil 2a'da Karakoyun–Mance, Şekil 2b'de Karakuyu, Şekil 2c'de Sırrın, Şekil 2d'de Büyükçay ve Şekil 2e'de Cavsak Havzası olmak üzere beş farklı hidrolik modelleme gerçekleştirilmiştir. HEC–RAS ile oluşturulan hidrolik modelde elde edilen taşkın yayılım alanları ile sahada gözlemlenen taşkın alanlarındaki su izleri görsel olarak karşılaştırılarak hidrolik modelin doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen bulgular sırası ile aşağıda değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, Karakoyun Deresi'nde meydana gelen taşkının nedenleri arasında dere yatağında yaşanan tarihsel değişim göze çarpmaktadır. Karakoyun Deresi'nin güzergahının Bizans İmparatoru Jüstinyen zamanında değiştirildiği görülmüştür. Jüstinyen Bendi, yaklaşık 1500 yıl önce Bizans İmparatorluğu tarafından inşa edilmiş olup, dere yatağı eski yerleşim yerlerinden uzaklaştırılmıştır. Dolayısıyla, Jüstinyen Bendi inşa edilerek doğal dere yatağına müdahale edilmiştir (Kürkçüoğlu vd., 2013; Yenigün vd., 2013). 15 Mart 2023 tarihinde meydana gelen sel suyu Jüstinyen Bendi'nden değil Karakoyun Deresi'nin yaklaşık 1500 yıl önce var olan doğal dere yatağını takip ederek ilerlemiştir. Bu durumun temel sebebinin, D400 karayolu altından geçen menfezdeki ve dere kesitindeki yetersizliklerin olduğu düşünülmektedir. Oluşturulan hidrolik modelde D400 karayolunun altında yer alan menfez köprüsünün olduğu yerde taşkın suyu derinliğinin 11 m civarına ulaştığı görülmüştür. Bu bölgede, hem dere kesitinin hem de menfez kesitinin yetersiz olması nedeniyle Karakoyun Deresi taşarak çevreye zarar vermiş ve şiddetli yağış afete dönüşmüştür.

Mance Deresi, geçmişte doğal bir dere olarak varlığını sürdürmüş, günümüzde ise üzerine yerleşim yerleri kurularak dere yatağı kaybolmuştur. Yapılaşmanın artması ve dere yatağının kaybolması bölgedeki sel ve taşkın riskini artırmıştır. Dere yatağı olmaması ve ayrıca bölgedeki altyapının yetersiz

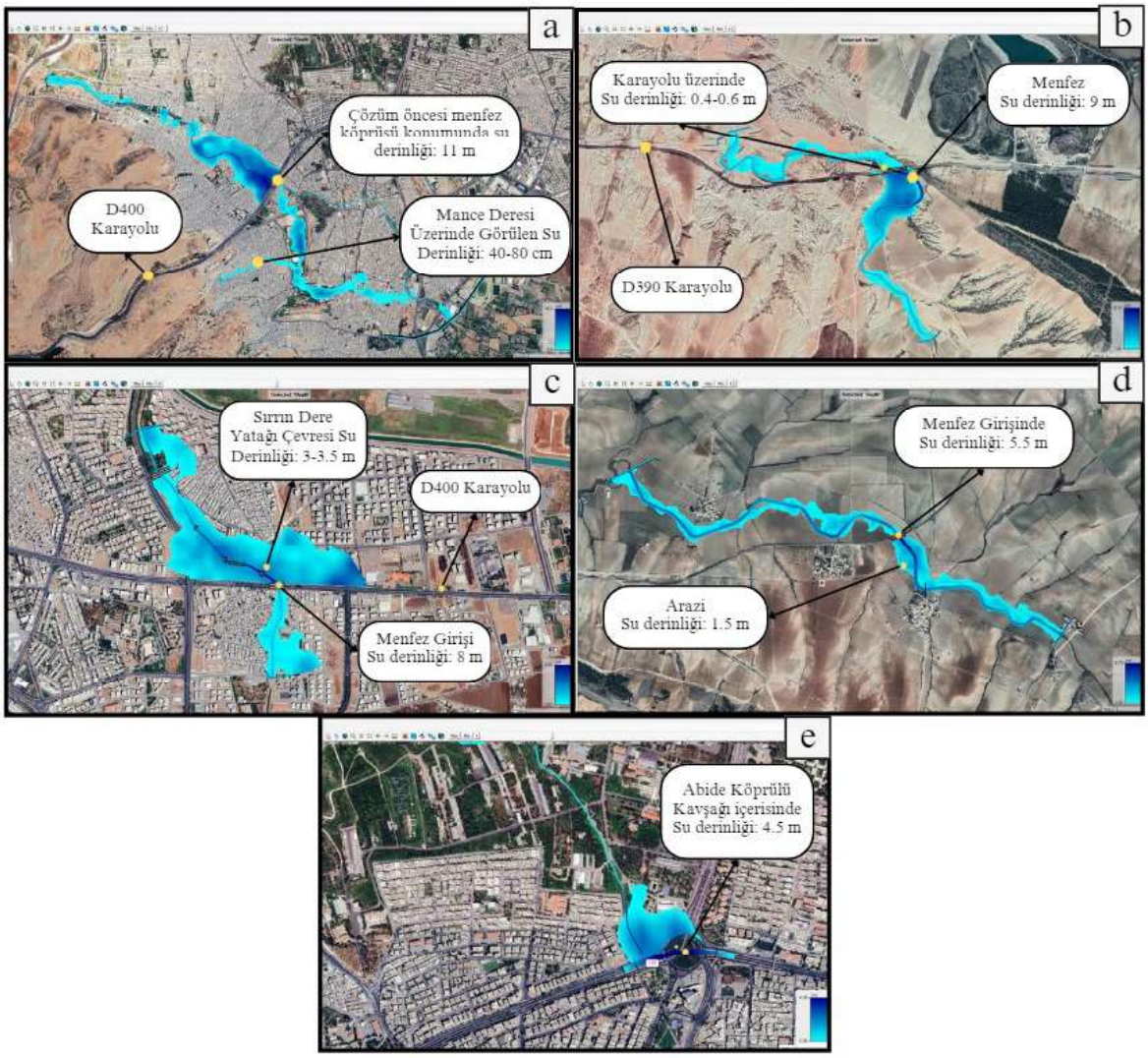
olması, şiddetli yağışın sonucunda taşkının etkisini artırmıştır. Dere yatağı kaybolan Mance Deresi'nin normalde olması gereken güzergahı üzerinde görülen su derinliği hidrolik modelde yaklaşık olarak 40-80 cm civarında ölçülmüştür. Burada meydana gelen hasar dere yatağının yok edilmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Karakuyu Deresi üzerinde Bozova ve Hilvan ilçelerini birbirine bağlayan D–390 Hilvan–Bozova karayolunun 8. kilometresinde yer alan menfezin tıkanması sonucu taşkın meydana gelmiştir. Menfez kesitinin yetersiz kalması sebebiyle karayolu baraj gövdesi gibi davranmış ve sel sularının yaklaşık 10–15 metre yükselerek suyun karayolu seviyesinin üzerinden akmasına neden olmuştur. Karayolu üzerinden akan sular modelde yaklaşık olarak 40-60 cm civarında ölçülmüştür. D390 karayolu üzerinden aşan taşkın suları bu esnada yoldan geçen bir tırı sürüklemesi sebebiyle can kaybına neden olmuştur.

Sırrın Deresi üzerinde çok sayıda sanat yapısı bulunmaktadır. Dere kesitleri ile sanat yapılarının kesitleri taşkın anında yetersiz kalmıştır. D–400 karayolu menfezinin rüsubat nedeniyle tıkanması taşkınların etkisini artırmıştır.

Büyükçay Deresi Havzası'nın hidrolik modellemesi sonucunda, mevcut Menfez Köprüsü'nün yüksek akış hızı, derinliği ve akış miktarı nedeniyle köprü ayaklarının temelinin oyulduğu ve Menfez Köprüsü'nün yıkıldığı tespit edilmiştir. Menfez girişinde taşkın suyu derinliği 5.5 m olarak modelde ölçülmüştür.

Son olarak, Cavsak Deresi üzerinde yer alan bir menfez önündeki demir parmaklıkların sel suları ile taşınan kaba malzeme ve rüsubat ile tıkanması sonucu dere taşmış ve dere yatağından taşan sel suları Abide Köprülü Kavşağı'nın içerisine dolmuştur. Bu olay sonucu sekiz can kaybı yaşanmıştır. Yapılan modellerde Abide Köprülü Kavşağı'nda 4,5 metre, kavşak çıkışında ise 3 metre su derinliği gözlenmiştir.



Şekil 2. *a) Karakoyun–Mance Deresi, b) Karakuyu Deresi, c) Sırrın Deresi, d) Büyükçay Deresi, e) Cavsak Deresi için Hidrolik Model sonuçları ve taşkın yayılım alanları.*

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, 14–16 Mart 2023 tarihleri arasında Şanlıurfa'da meydana gelen şiddetli yağışlar sonucunda oluşan sel afeti incelenerek çözüm önerileri sunulmuştur. Bu kapsamda, hidrolojik ve hidrolik modelleme yöntemleri ile 15 Mart 2023 gününe ait sel anı modellenerek taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir. Model sonucunda elde edilen taşkın yayılım haritaları, taşkın sonrası bölgede yapılan incelemelerin yanında taşkına ait görseller ve videolar ile karşılaştırılmıştır. Model ile elde edilen taşkın yayılım alanları ile sahada gözlemlenen taşkın alanlarındaki su izleri görsel olarak karşılaştırılarak hidrolik modelin doğrulaması yapılmıştır. 15 Mart 2023 tarihinde meydana gelen taşkının ana nedeninin il genelinde etkili olan aşırı yağışların olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat, taşkının afete dönüşmesinin ise çeşitli yapısal nedenlerinin olduğu değerlendirilmiş ve her bir havza özelinde detaylıca incelenmiştir. Bu incelemelerin sonucunda, bölgede yaşanan taşkın olayının afete dönüşmesinin yapısal nedenleri;

sanat yapılarının ve dere kesitlerinin yetersiz olması, güvenlik amacıyla menfez önüne konulan demir parmaklıklar, yeni yönetmeliklere uygun olmayan tasarımlar, dere mutlak koruma bandında bulunan yapılaşma, mutlak koruma bandında yer alan ve dere kret ve hatta talveg kotu altında kalan yapılar ve taşınan rüsubat ve kaba malzemeler sonucu köprü ve menfezlerin tıkanması olarak sıralanmıştır. Ayrıca, 500 yıllık tekerrür zaman aralığındaki yağışlar hidrolojik modellerde kullanılmış, elde edilen hidrograflar hidrolik modele girilmiş ve her bir dere için menfez ve köprülerde ve dere kesitlerinin genişletilmesine yönelik çözüm önerileri sunulmuştur. Modeller kullanılarak sanat yapılarında ve derelerde yapılan genişletme çalışmalarının sonucunda bölgede taşkınının etkisinin azaltılabileceği veya önlenebileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Çalışmada kullanılan yağış verilerinin teminini sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

Bellos, V. & Tsakiris, G. (2015), Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas, Water Resources Management, 29, 379-397.

Brunner G.W., Warner J.C., Wolfe B.C., Piper S.S. & Marston P. (2016), HEC River Analysis System (HEC–RAS), HEC–RAS: river analysis system. Hydraulic Reference Manual Version 5.0 user's manual. Report number CPD–70, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016.

Gülbaz S. (2019), Sayısal modeller ile taşkın yayılım haritasının oluşturulması ve risk altında olan alanların belirlenmesi: Türkköse deresi örneği, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5(2), 335-349.

Kürkçüoğlu, A.C., Yenigün, K., Yazgan, M.S. (2013), The Justinian system: one of the oldest flood control facilities in the world, Water Science and Technology: Water Supply, 13(3), 683-691.

Jonkman, S.N. & Kelman, I. (2005), An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths, Disasters, 29(1), 75-97.

Singh, Z. (2020), Disaster: Implications, Mitigation And Preparedness, Indian Journal of Public Health, 64(1), 1-3.

Scharffenberg, W.A. & Fleming, M.J. (2006), Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

URL-1: Aquaveo. WMS – The All–in–one Watershed Solution. https://www.aquaveo.com/software/wms-watershed-modeling-system-introduction. Erişim tarihi: Temmuz 25, 2024.

Yenigün, K., Kürkçüoğlu, A.C., Yazgan, M.S., Gerger, R., Ülgen, U. (2013), From ancient times to the present: development of the drinking water supply system of Şanliurfa in south-eastern Turkey, Water Science and Technology: Water Supply, 13(3), 646-655.