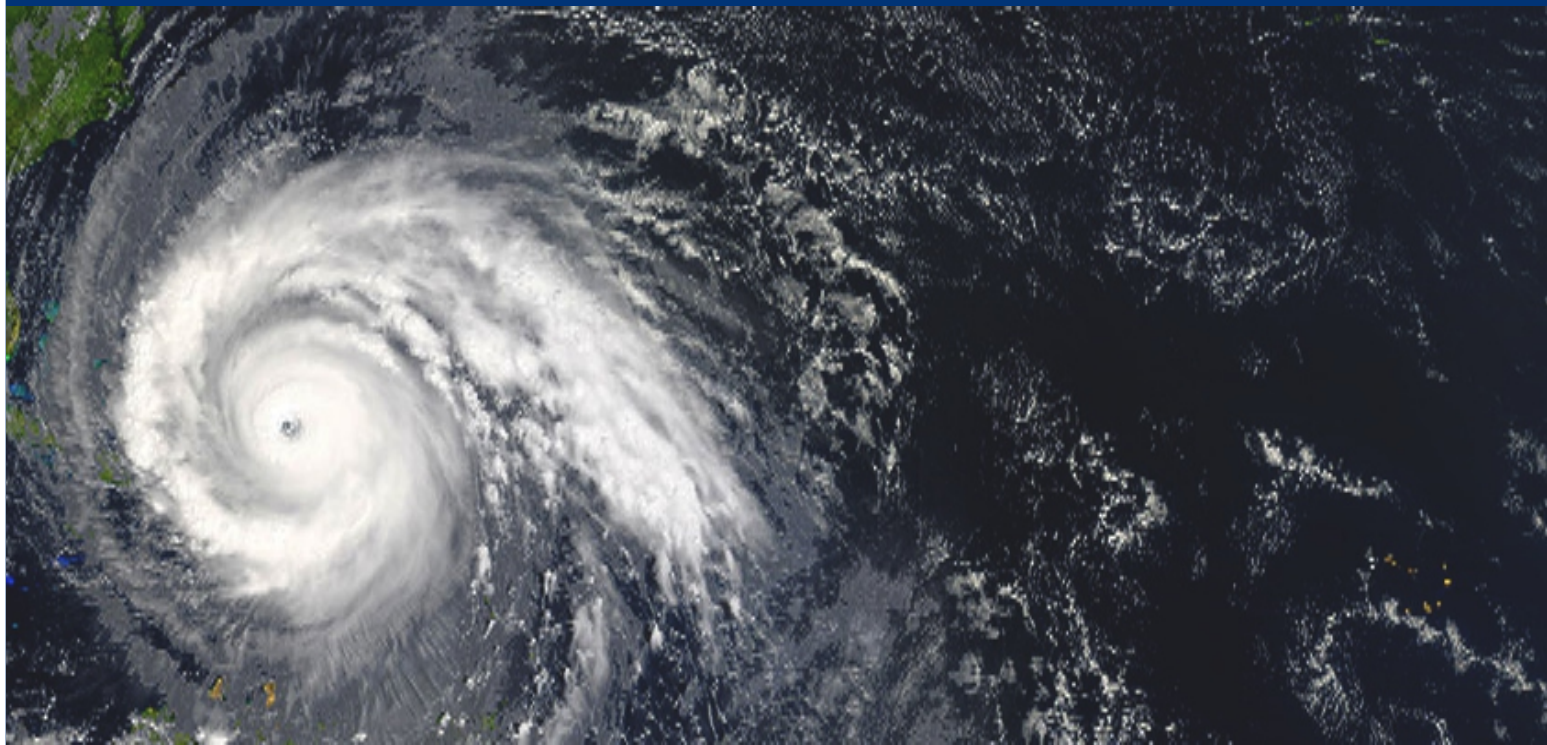


# DISASTER SCIENCE AND ENGINEERING



VOL: 7, NO:1, 2021

ISSN: 2149-7249

For more info, you may visit  
[www.disasterengineering.com](http://www.disasterengineering.com)



**DISASTER SCIENCE AND ENGINEERING**  
**EDITORIAL BOARD**  
**Volume: 7, Issue 1, May 2021**

**Editor-in-Chief**

---

İnan KESKİN, [inankeskin@karabuk.edu.tr](mailto:inankeskin@karabuk.edu.tr)

**Editors**

---

Emrah DOĞAN, [emrahd@sakarya.edu.tr](mailto:emrahd@sakarya.edu.tr)  
Tülay EKEMEN KESKİN, [tulayekemen@karabuk.edu.tr](mailto:tulayekemen@karabuk.edu.tr)  
Veysel Harun ŞAHİN, [vsahin@sakarya.edu.tr](mailto:vsahin@sakarya.edu.tr)  
Hüseyin GÖKÇEKUŞ, [huseyin.gokcekus@neu.edu.tr](mailto:huseyin.gokcekus@neu.edu.tr)  
Mehmet İnanç ONUR, [mionur@eskisehir.edu.tr](mailto:mionur@eskisehir.edu.tr)

**Editorial Board**

---

Abolfazl Nazari GİGLOU, [abolfazl@uidaho.edu](mailto:abolfazl@uidaho.edu)  
Adem AKPINAR, [ademakpinar@uludag.edu.tr](mailto:ademakpinar@uludag.edu.tr)  
Ali ATEŞ, [atesali2000@gmail.com](mailto:atesali2000@gmail.com)  
Ayşe ÇAĞLAYAN, [ayse.caglayan@csb.gov.tr](mailto:ayse.caglayan@csb.gov.tr)  
Bagya PACKİALAKSHMİ, [bagyaram@gmail.com](mailto:bagyaram@gmail.com)  
Beytullah EREN, [beren@sakarya.edu.tr](mailto:beren@sakarya.edu.tr)  
Cem KIRLANGIÇOĞLU, [kirlangicoglu@sakarya.edu.tr](mailto:kirlangicoglu@sakarya.edu.tr)  
Cüneyt BAYKAL, [cbaykal@metu.edu.tr](mailto:cbaykal@metu.edu.tr)  
Emrah DOĞAN, [emrahd@sakarya.edu.tr](mailto:emrahd@sakarya.edu.tr)  
Erkan ÇELEBİ, [ecelebi@sakarya.edu.tr](mailto:ecelebi@sakarya.edu.tr)  
Fatih GÖKTEPE, [fgoktepe@sakarya.edu.tr](mailto:fgoktepe@sakarya.edu.tr)  
Haluk AKGÜN, [hakgun@metu.edu.tr](mailto:hakgun@metu.edu.tr)  
Tülay EKEMEN KESKİN, [tulayekemen@karabuk.edu.tr](mailto:tulayekemen@karabuk.edu.tr)  
Isık YILMAZ, [iyilmaz@cumhuriyet.edu.tr](mailto:iyilmaz@cumhuriyet.edu.tr)  
İnan KESKİN, [inankeskin@karabuk.edu.tr](mailto:inankeskin@karabuk.edu.tr)  
İsmail Hakkı DEMİR, [idemir@sakarya.edu.tr](mailto:idemir@sakarya.edu.tr)  
Mehmet Fatih DÖKER, [fdoker@sakarya.edu.tr](mailto:fdoker@sakarya.edu.tr)  
Mehmet İnanç ONUR, [mionur@eskisehir.edu.tr](mailto:mionur@eskisehir.edu.tr)  
Murat UTKUCU, [mutkucu@sakarya.edu.tr](mailto:mutkucu@sakarya.edu.tr)  
Mustafa Kerem KOÇKAR, [mkoçkar@gazi.edu.tr](mailto:mkoçkar@gazi.edu.tr)  
Osman SÖNMEZ, [osonmez@sakarya.edu.tr](mailto:osonmez@sakarya.edu.tr)  
Ömer GİRAN, [ogiran@istanbul.edu.tr](mailto:ogiran@istanbul.edu.tr)  
Selim DOĞAN, [sdogan@selcuk.edu.tr](mailto:sdogan@selcuk.edu.tr)  
Shivam TRİPATHİ, [shiva@iitk.ac.in](mailto:shiva@iitk.ac.in)  
Soydan SERTTAŞ, [soydan.serttas@dpu.edu.tr](mailto:soydan.serttas@dpu.edu.tr)  
Tolga GÖRÜM, [tgorum@itu.edu.tr](mailto:tgorum@itu.edu.tr)  
Veysel Harun ŞAHİN, [vsahin@sakarya.edu.tr](mailto:vsahin@sakarya.edu.tr)



## Damming Rishiganga in Chamoli District on the aftermath of Flash Flood Disaster of February 7, 2021: Case Study

Sushil Khanduri<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Uttarakhand State Disaster Management Authority, Department of Disaster Management, Uttarakhand Secretariat, 4 Subhash road, Dehradun, Uttarakhand, India; [sushil.khanduri@gmail.com](mailto:sushil.khanduri@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-2787-8337>

### Abstract

Initial flash flood event of February 7, 2021 occurred in Raunthi Gadhera that originates from Nanda Ghunthi peak (6309 m) and flowing from South to North meeting with Rishiganga at an elevation of 2315 m asl at right angle. Flooded water in a huge amount flowed down through the same that damming at the confluence of Raunthi Gadhera with Rishiganga. Wherein back flowed of water saturated bouldary debris together with ice chunks along the Rishignaga upto 500 m. After breaching of temporary dam at confluence, this left behind a huge amount of sediments over Rishiganga upto at an elevation of 2389 m asl and blocked the course of the same resulting in an artificial lake is formed. Flooded water gushing down along the Rishiganga washing away a functional hydropower project of 13.2 Mw capacity on Rishiganga upstream of Rini and to the downstream severe damage under construction hydropower project of 520 Mw of National Thermal Power Corporation (NTPC) at Tapoban on Dhauliganga river. Apart from these washing away 5 pedestrian bridges over Dhauliganga river along with 1 RCC motorable bridge over Rishiganga. 204 people went missing, including 9 inhabitants and 2 Police personnel, of these body of 83 people could be recovered. The study highlights causes of lake formation and suggestions for mitigating future threat from the same in downstream.

**Keywords:** Flash flood, Narrow gorge, Paleo lake, Dhauliganga valley, Nanda Devi massif and Higher Himalaya

### 1. Introduction

The state of Indian subcontinent of Uttarakhand located in the center sector of the Himalaya has a long disastrous history before its creation because of hydrometeorology, fragile geology, adverse topography and high seismicity resulting in numbers of natural hazards occurred in the same region. Some of the major disastrous events which occurred over the past in this region wherein a numbers of fatalities had happened are Sher-Ka-Danga landslide of 1880 killing 151 people, Uttarkashi earthquake of 1991 killing 768 people, Okhimath landslide of 1998 killing 101 people, Malpa landslide of 1998 killing 221 people, Chamoli earthquake of 1999 killing 100 people (Atkinson, 1886; Kumar and Mahajan, 1994; Bist and Sah, 1999; Paul et al., 2000; Jain et al., 1999) Apart from, a number of streams like Kali, Bhagirathi, Alaknanda, Mandakini rivers and their tributaries have been blocked manifold due to rock fall, debris slide, debris flow, avalanche and moraine/glacier sediments in the region (Khanduri, 2021). Subsequent breaching caused enormous loss of life, property and infrastructure into downstream.

Landslides are however occurred due to inherent geology, multiple quakes together with steep slope, high relief, frost action and rainfall. Earlier, a number of hill slopes of Uttarakhand have witnessed massive landslides related incidences. These include (i) in year 1857, a massive landslide reportedly blocked the flow of the Mandakini river for three days in Rudraprayag; (ii) in 1868, a landslide triggered upstream of Chamoli blocked the course of Alaknanda river; (iii) in 1893, a massive rock fall triggered near Gohna which blocked the course of Birahiganga river, a tributary of Alaknanda river; (iv) in 1968, the Rishiganga blocked due to a landslide near Rini village; (v) in 1970, Patalganga,



a tributary of Alaknanda river blocked by landslide; (vi) in 1970, Alaknanda river blocked by a landslide near Hanuman Chatti; (vii) in 1978, the Kanauldia Gad blocked by a landslide in Uttarkashi; (viii) in 1998, Madhyamaheswar river, a tributary of Mandakini river blocked by a massive rock fall; (ix) in 1998, Malpa Gad, a tributary of Kali river blocked due to a massive rock fall in Kelash-Mansarovar pilgrimage route (Rautela and Pande, 2005; Pandey and Mishra 2015; Prakesh, 2015; Gulia, 2007; Thakur, 1996; Sah and Bist, 1998; Paul et al., 2000). Out of 9 landslide incidences, 5 reported incidences of river blockade are associated with the Alaknanda valley in Chamoli district.

Likewise, a huge amount of debris brought down by streams blocked at confluence of tributaries and narrow valley walls along the streams in the Uttarakhand region. These include (i) in 1893, Birahigang near its confluence with Alaknanda river blocked due to debris flows; (ii) in 1930, Alaknanda river blocked near Badrinath because debris flows; (iii) in 1970, Dhauliganga river blocked near Tapoban by the debris brought down by Dhak nala; (iv) in 1970, Alaknanda river blocked by the debris brought down by Karmanasa Nadi; (v) in 1979, Mandakini river blocked near Chandrapuri due to debris brought down by Kyunja Gad in Rudraprayag (Pandey and Mishra 2015; Prakesh, 2014; Gulia, 2007). Out of 5 incidences, 4 reported debris flow incidences of river blockade are associated with the Alaknanda valley in Garhwal region of Chamoli district.

Furthermore, some streams blocked because of moraines/glacial sediments and avalanches in the upper reaches of the Higher Himalayan region of Uttarakhand. These include (i) in 1957, Dhauliganga river blocked near Bhapkund by an avalanche coming from the Dronagiri river; (ii) in 1979, Alaknanda river blocked by avalanche near Bamni village in proximity of Badrinath; (iii) in 2002, Gandhwi river blocked by glacier sediments (Bisht et al., 2002; Bisht et al., 2011). All 3 reported avalanches and glacial sediments/moraines blockade incidences are associated with the Alaknanda valley in Chamoli district of Uttarakhand Himalaya.

Recently, a prolonged rock fall along with glacier avalanche took place in the upper reaches of the catchment of Raunthi Gadhera, a tributary of Rishiganga on February 7, 2021. Subsequent blockade and sudden breach of a huge volume of water saturated bouldary debris caused again blockade at confluence of the Raunthi Gadhera with Rishiganga. This caused reverse flowed of sediments laden water along the Rishiganga upto 500 m and deposited a huge amount of debris over its course and is formed an artificial lake. This lake is around 500 m in length along the Rishiganga and around 100 m width across the same with an assumed depth of around 20-40 m. In order to investigate the area to find out the causes and to overcome the threat form this lake in downstream.

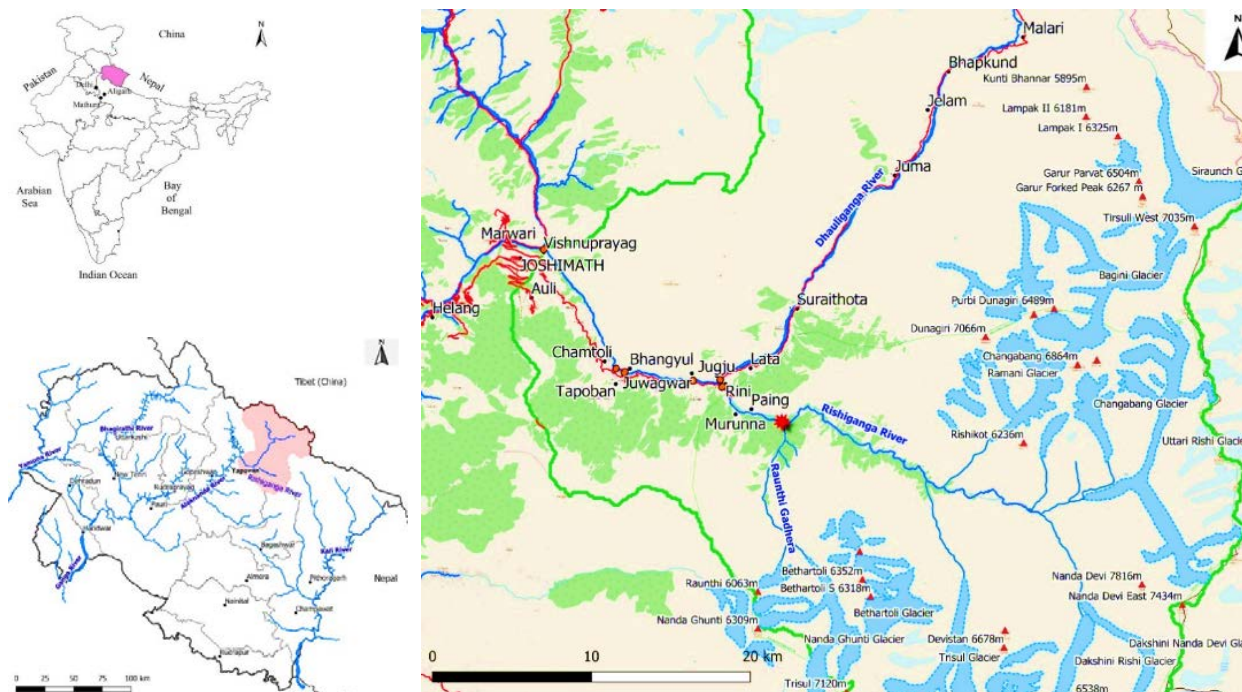


Figure 1. Map depicting the devastated area

## 2. The devastated area

Devastating flash flood of February 7, 2021 in Dhauliganga valley of Chamoli district in Indian subcontinent of Uttarakhand Himalaya however took place during the winter season. An artificial lake which formed over Rishiganga on the aftermath of initial flash flood incidence took place in the catchment of Raunthi Gadhera, a tributary of Rishiganga. The devastated area can be approached by Joshimath-Malari motor road till Rini village, at a distance of about 20 kilometers from Joshimath town and travel for around 10 kilometers to reach the confluence of Raunthi Gadhera with Rishiganga as well as damming site where at present exist lake over Rishiganga (Figure 1). Joshimath town is a famous tourist destination located in the Higher Himalaya and can be approached from Rishikesh by Rishikesh – Badrinath national highway (NH 58).

Meteorologically, it is observed that heavy concentrated precipitation events occur several places in this region every year not only during monsoon season, as pre monsoon also (Khanduri, 2020). This is mainly attributed to change in climate and rainfall pattern (Kumar et al., 2010; Praveen et al., 2020). Even though the region witnessed slight rainfall during the days preceding the incidence, winter rainfall in Uttarakhand had been below normal during 2020-21 (Table 1). However, the region experienced precipitation on February 4 and 5, 2021 and snow fall occurred in the high altitude region of Dauliganga valley. It is evident from the Tapoban and Auli which are located at an altitudes of 2000m asl and 2600m asl respectively. Between 6 and 7 February, 2021 Tapoban experienced 2.8°C and 5.4°C whereas Auli experienced 6.0°C and 9.6°C respectively in minimum and maximum temperature (Data Source: Uttarakhand State Disaster Management Authority).

**Table 1.** Average monthly rainfall in the area around the devastated region (Data source: Uttarakhand State Disaster Management Authority).

Place	Rainfall (in mm)				
	October 2020	November 2020	December 2020	January 2021	February 2021 (till 13th)
Tapoban	7.5	0	5	19.5	8.5
Auli	10	2	3.5	14	14.5



**Figure 2.** Washing away power house of Rishiganga hydropower project of 13.2 MW capacity upstream of Rini



Multipule intermittent damming and ensuing flash flood of Rishiganga and Dhauliganga river caused washed off a functional hydropower project of 13.2 Mw capacity on Rishiganga upstream of Rini (Figure 2) along with a RCC bridge of 60 m span over Rishiganga on Joshimath – Malari road at Rini in which disrupted connectivity for the people of 13 villages (Figure 3). To the downstream of this the floodwaters caused severe damage to another under construction hydropower project of 520 Mw of NTPC at Tapoban on Dhauliganga river (Figure 4). 204 people went missing, including 9 local people and 2 Police personnel, of these body of 83 persons could be recovered. Besides this heavy losses were incurred by public infrastructure and other properties.



**Figure 3.** Washed off motorable RCC bridge over Rishiganga on Joshimath – Malari State Highway at Rini



**Figure 4.** Severely damaged barrage of Tapoban-Vishnugad hydropower project with aggradation of river bed at Tapoban

### **3. Methodology**

With the help of Handset Global Positioning System (GPS), taking the coordinates in and around the lake site. During the course of the fieldwork in the area devastated by flash flood geological observations were taken all along the Rishiganga valley with specific focus on an artificial lake which formed over Rishiganga at an elevation of 2389 m asl that falls in Survey of India toposheet numbers 53 N/13, 53 N/14 and 53 N/15. These toposheets on the scale of 1:50000 have been used to prepare the location map of the area using Geographical Information System (GIS) software (Arc Info 9.3).

### **4. Geomorphological and Geological set up**

Initial flash flood incidence of February 7, 2021 occurred along the North flowing Raunthi Gadhera that originates from the glaciers of Nanda Ghunthi (6309 m asl). It has confluence with Rishiganga to the East of Paing and Murunna villages and maintains a tectonically controlled NW-SE course that originates from the glaciers of Nanda Devi massif (Figure 5). It meets with Southwest flowing Dhauliganga river at Rini village that originates in the proximity of Niti pass. From Rini to Tapoban Dhauliganga river maintains a tectonically controlled E-W course and thereafter flows from NW-SE to meet Alaknanda river at Vishnuprayag.



**Figure 5.** Panoramic view of Nanda Devi massif (camera looking East of Rini)

The Rishiganga valley exhibits characteristically distinct rugged mountainous topography of the Higher Himalayan terrain. The imprints of geological structures and lithology are observed in the area in the form of strike ridges and deeply incised valleys. The area is observed to be dissected by several ridges and the ground elevations vary from about 1960 m asl at Rini to 7817 m asl at Nanda Devi massif which is second highest peak of the India.

Exposures of Higher Himalaya are thrust over the rocks of Lesser Himalaya, along a Northerly dipping Main Central Thrust (MCT) passes across the Alaknanda river at Helang. Overlaying MCT, Helang, Joshimath, Surraithota and Bhapkund Formations which constitute medium to high grade metamorphic rocks. Helang Formation represents low to medium-grade rocks of greenschist facies while Joshimath, Surraithota and Bhapkund Formations constitute medium to high grade rocks of amphibolite facies are separated by Northeasterly dipping Vaikrita Thrust in this region, passing across the Dhauliganga river near Rini. (Heim and Gansser, 1939; Valdiya, 1980; Valdiya, 1989; Jain et. al., 2014).



At the confluence of Raunthi Gadhera with Rishiganga, mostly exposures of quartzites of Surraithota Formation are observed on the right bank of Raunthi Gadhera as well as both the banks of Rishiganga having with vertical cliff. These rocks are medium to coarse grained, greyish coloured, medium to thickly foliated and slightly to moderately weathered in nature. Rocks exposed in the area are generally observed to strike NW–SE with moderate dips towards NE. Other two prominent joints were observed to dip towards W and NW at steep angles ( $70^\circ / 270^\circ$  and  $70^\circ / 310^\circ$ ) along with a vertical joints was observed to strike NE–SW ( $90^\circ / 70^\circ$ ).

## **5. Cause of damming Rishiganga**

The flash flood incidence of February 7, 2021 was unexpected during winter season in which surprised everyone as also scientists of various domain across the worldwide. They made their sincere effort to reconstruct the sequence of this flash flood disaster. Based on the analysis of the satellite imageries, the huge rock mass sliding down from the long distance which generated energy that was held responsible for quickly melting snow and ice available in the area and fragmentation of detached landslide mass as well as glacial sediments initiating a debris flow that rushed downslope (Dave Petley, 2021; Shrestha et al., 2021; Shugar et al., 2021). Similarly, based on the field investigations carried out proximity of the affected area reveals that multiple intermittent damming added the discharge causing flash flood disaster situation occurred in downstream wherein massive damage and destruction have been taken place, particularly in Rini and Tapoban (Rautela et al., 2021; Khanduri, 2021).



**Figure 6.** Rishiganga lake curved out channel from the center of the lake through which water is continuously draining out

According to villagers, they had heard sound of boulders falling in the early morning 0200 hours on February 7, 2021. On the basis of same, a prolonged rock fall along with glacier avalanche triggered over Raunthi Gadhera, a tributary of Rishiganga in the area which blocked the course of the same at an elevation of 3600 m asl. Subsequent breach resulting in a huge volume of water saturated bouldary debris gushing downstream. Key blocking at the confluence of Raunthi Gadhera with Rishiganga at an elevation of 2315 m asl by the same resulting in reverse flow of water saturated debris along the Rishiganga up to 500 m. Increasing hydrostatic pressure, breaching of temporary dam at confluence where released of water saturated debris with great force into downstream.

This reverse flow of a huge volume of water saturated bouldary debris was deposited over Rishiganga and blocked the course of the same for 3 days between 9 and 11 February, 2021. This debris comprising of a mixture of ice blocks, rock fragments, morainic materials and boulders of quartzite, granitic gneiss and mica schist with silty-clayey matrix. The Rishiganga was curved out channel from the center of the lake through which water is continuously draining out on February 12, 2021 (Figure 6).



It is important to note that just upstream to confluence of Raunthi Gadhera and Rishiganga, occurrence of lacustrine deposits that consist a layers of sand and pebbles on the right bank of Raunthi Gadhera which was indicating evidence of paleo lake in the same region. These deposits has now been mostly eroded in the flash flood of Raunthi Gadhera (Figure 7).

## **6. Results and discussion**

Over the past decades, the Alankanda river and its tributaries like Dhauliganga, Rishiganga, Patalganga and Birahiganga had been blocked due to rock fall, debris slide, debris flow, avalanche and glacial sediments and subsequent breach caused devastation in downstream. These inflicted heavy loss of life and property together with other infrastructure and natural resources. Total of 12 reported incidences of blockade are associated with Alaknanda valley in Chamoli district of Uttarakhand. It is noteworthy that besides Patalganga and Birahiganga blockade in the Lesser Himalayan terrain, most of the damming of streams concentrated in Higher Himalayan terrain, particularly to the North of Main Central Thrust (MCT). This is however attributed to the geomorphology and geology. It was observed that most of the damming of streams because of (i) confluence of tributaries; (2) narrow valley; (iii) Thrust/Fault and folded strata; and (iv) physical and chemical weathering in rocks. It was observed that most of the dam breached during the monsoon season.



**Figure 7.** Evidence of paleo lake showing lacustrine sediments on the right bank of Raunthi Gadhera near its confluence with Rishiganga

Initial flash flood took place in Raunthi Gadhera, a tributary of Rishiganga on February 7, 2021 in the early morning at 1015 hours. Blockade of Raunthi Gadhera by prolonged rock fall and subsequent breaching caused a huge amount of water saturated bouldary debris gushing downstream. At the confluence of Raunthi Gadhera and Rishiganga, flooded water saturated bouldary debris of Raunthi Gadhera directly hit the valley wall and damming the same place for a while in which back flowed of sediments leaden discharge along the course of Rishiganga upto 500 m.

Continuously increasing hydrostatic pressure, temporary dam at confluence was breached, a huge debris mass along with boulders and ice was dumped over the course of the Rishiganga, left behind this sediments barrier water accumulated and formed an artificial lake. Between 9 and 11 February, 2021 the course of Rishiganga was permanently blocked by the debris brought down by the Raunthi Gadhera. The Rishiganga was curved out channel from the center of the lake through which water is continuously draining out on February 12, 2021. As directed to personnel of ITBP

and SDRF, physically widen the channel and cleared of obstructions of logs (Figure 8). The channel was thus widened upto 20 m between February 22 and March 2, 2021 to ensure proper draining out water from the lake.

The flooded water of Rishiganga resulted in swiping away of an operational hydropower project of 13.2 Mw capacity on Rishiganga upstream of Rini and severe damage to another under construction hydropower project of 520 Mw of NTPC at Tapoban on Dhauliganga river. As many as 204 persons went missing, of these 83 bodies could be recovered while 12 persons injured and 360 farm animals were lost in the flash flood incidence together with another property and infrastructures.

## **7. Conclusions**

Evolutionary history, geotectonic set up, geomorphology and hydrometeorological characteristic make the hilly region of Uttarakhand prone to a number of natural hazards like rock fall, debris flow, flash flood, flood, avalanche etc. Apart from these the region has witnessed earthquake several times because of the same region falls in earthquake zone IV and V according to earthquake zonation map of Uttarakhand (IS, 1893) where the devastated area lies in seismic Zone V. Change in rainfall pattern along with climatic variability because of global warming due to which concentrated heavy rainfall and cloudburst incidences are frequently occur in the area. This region has a long history of disasters due to which thousands of fatalities while tremendous property and infrastructure losses were occurred. The same region has also witnessed a number of natural dams formed by these natural hazards. Subsequent breach caused enormous loss of life, property, infrastructure in downstream.



**Figure 8.** Personnel of ITBP and SDRF widen the channel and cleared of obstructions of logs

Based on the investigations in the area around lake site, it is suggested that initial flash flood took place in Raunthi Gadhera on the aftermath of landslide dam breached. Another key damming of streams was observed at confluence of the Raunthi Gadhera with Rishiganga. Occurrence of lacustrine deposits that consist a layers of sand and pebbles on the right bank of Raunthi Gadhera just upstream of confluence point which was indicating evidence of paleo lake in the same region.

The lake formed over Rishiganga on the aftermath of initial flash flood in February 7, 2021 that is needs detailed geomorphological evaluation. Because of the muddy debris barrier as this is problematic during monsoon when Rishiganga will contribute significant discharge. This will create hydrostatic pressure and the possibility of breaching of the same cannot be ruled out. In view of vulnerability to flash flood again in the downstream by the same, estimating regular discharge and installing early warning system for flood forecast in downstream. Apart from regular monitoring of the lake should be done by state-of-art techniques.

## Acknowledgments

The Author acknowledge guidance, support and encouragement from Shri S.A. Murugesan, Secretary, Department of Disaster Management, Government of Uttarakhand. The Author is thankful to Dr. Piyoosh Rautela, Executive Director, Uttarakhand State Disaster Management Authority, Department of Disaster Management, Government of Uttarakhand for critically going through the manuscript and giving valuable suggestions. Thanks are due to Mrs. Surabhi Kundalia, GIS Expert, Department of Rural Development, Government of Uttarakhand for help in preparing location map. The Author also thank all the anonymous referees for their valuable comments to improve the manuscript significantly.

## References

- Atkinson, E.T., (1886) *The Himalayan districts of the North West Province of India* (forming volume XII of the Gazetteer NWP, Allahabad), Reprint 1996, The Himalayan Gazetteer, Natraj Publishers, Dehradun, India.
- Bisht, M.P.S., Mehta, M., Nautiyal, S.K. (2002) A report on geomorphic hazards around Badrinath Area (Uttaranchal) and innovative control measures proposed, NDBR project. Department of Geology, HNB Garhwal University, Uttarakhand.
- Bisht, M.P.S., Mehta, M., Nautiyal, S.K. (2011) Impact of depleting glaciers on the Himalayan biosphere reserve- a case study of Nanda Devi Biosphere Reserve, Uttarakhand Himalaya. In: *Mountain Resource Management: Application of Remote Sensing and GIS* (ed. by M. P. S. Bisht and D. Pal), 17-31. Transmedia Publication, Srinagar, Uttarakhand.
- Bist, K.S. and Sah M. P., (1999) The devastating landslide of August 1998 in Ukhimath area, Rudraprayag district, Garhwal Himalaya. *Current Science*, 76 (4), 481-484.
- IS 1893, Indian Standard (IS):1893, Part 1, (2002) Criteria for earthquake resistant design of structures, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- Jain A. K., Shreshtha M., Seth P., Kanyal L., Carosi R., Montomoli C., Iaccarino S., Mukherjee P. K. (2014) The Higher Himalayan Crystallines, Alaknanda – Dhauliganga Valleys, Garhwal Himalaya, India. In (Eds.) Chiara Montomoli, Rodolfo Carosi, Rick Law, Sandeep Singh and Santa Man Rai, *Geological field trips in the Himalaya, Karakoram and Tibet*, *Journal of the Virtual Explorer*, 47, 1- 38.
- Jain, S.K., Murty, C.V.R., Arlekar, J.N., Rajendran, C.P., Rajendran, K. and Sinha, R., (1999) Chamoli (Himalaya, India) Earthquake of 29 March 1999. EERI Special Earthquake Report, EERI Newsletter, 33 (7), 1-18.
- Khanduri, S., (2021) Flash Flood struck Dhauliganga valley on February 7, 2021: A Case study of Chamoli district of Uttarakhand Himalaya in India. *Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management*, 2 (1), 1-15.
- Khanduri, S., (2021) Formation and Failure of Natural Dams in Uttarakhand Himalaya: An Observation from Lwarkha, Chamba Tahsil of Tehri Garhwal District, India. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 3 (1), 12-22.
- Khanduri, S., (2020) Cloudbursts Over Indian Sub-continent of Uttarakhand Himalaya: A Traditional Habitation Input from Bansoli, District-Chamoli, India. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 2 (2), 48-63, 2020.
- Kumar, V., Jain, S.K. and Singh, Y., (2010) Analysis of long-term rainfall trends in India. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (4), 484–496.
- Kumar, S. and Mahajan, A.K., (1994) The Uttarkashi earthquake of 20 October 1991: field observations. *Terra Nova*, 6 (1), 95-99.
- Petley, D., (2021) The catastrophic landslide and flood in Chamoli in Uttarakhand: the sequence of events, *The Landslide Blog*, AGU Blogosphere, [blogs.agu.org/landslideblog/20](https://blogs.agu.org/landslideblog/20)
- Paul, S.K., Bartarya, S.K., Rautela, P., Mahajan, A.K. (2000) Catastrophic mass movement of 1998 monsoons at Malpa in Kali Valley, Kumaun Himalaya (India). *Geomorphology*, 35, 169-180. Pandey,



- V.K., Mishra A. (2015) Causes and Disaster Risk Reduction Measures for Hydrometeorological Disaster in Uttarakhand, India: An Overview. *International Journal of Current Research in Science and Technology* 1 (3), 61-80.
- Praveen, B., Talukdar, S., Shahfahad, Mahato, S., Mondal, J., Islam, A.R.M.T., and Rahman, A., (2020) Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. *Scientific Reports*, 10, 1-21.
- Prakesh, S. (2015) Some socio-economically landslides in Uttarakhand Himalaya: Events, Consequences and lessons learnt. *Mountain Hazards and Disaster Risk Reduction* (edited by Hari Krishna Nibanupudi, Rajib Shaw), Springer, 1-271.
- Prakesh, S. (2014) *Geo-environmental Characteristics, Natural Resources and Disasters in Uttarakhand State. Retrospect and Prospects of Natural Resource and Disaster Management in Uttarakhand Himalaya*, 51-99.
- Paul, S.K., Bartarya, S.K., Rautela P., and Mahajan, A.K., (2000) Catastrophic mass movement of 1998 monsoons at Malpa in Kali Valley, Kumaun Himalaya India. *Geomorphology*, 35, 169-180.
- Rautela, P., Khanduri, S., Kundalia, S., Joshi, G.C. and Jugran, R., (2021) Sequential Damming Induced Winter Season Flash Flood in Uttarakhand Province of India. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 2 (2), 61-71.
- Rautela, P., Pande, R.K. (2005) Traditional inputs in disaster management: the case of Amparav, North India. *International Journal of Environmental Studies*, 62 (5), 505-515.
- Shrestha, A.B., Steiner, J., Nepal, S., Maharjan, S.B., Jackson, M., Rasul, G., Bajracharya, B., (2021) Understanding the Chamoli flood: Cause, process, impacts, and context of rapid infrastructure development. *RIVER BASINS AND CRYOSPHERE, ICIMOD, Kathmandu, Nepal*.
- Shugar, D.H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Veries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning S. A., Frey, H., Gascoin, S., Haritashya, U. K., Hugtgel, C., Kaab, A., Kargel, J. S., Kavanaugh, J. L., Lacroix, P., Petley, D., Rupper, S., Azam, M. F., Cook, S. J., Dimri, A. P., Eriksson, M., Farinotti, D., Fiddes, J., Gnyawali, K. R., Harrison, S., Jha, M., Koppes, M., Kumar, A., Leinss, S., Majeed, U., Mal, S., Muhuri, A., Noetzi, J., Paul, F., Rashid, I., Sain, K., Steiner, J., Ugalde, F., Waston, C. S., Westoby, M. J., (2021) A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, pp. 1- 14.
- Gulia, K.S. (2007) *Discovering Himalaya: Tourism of Himalayan Region*. ISHA Books, Delhi.
- Heim, A. and Gansser, A., 1939. *Central Himalaya: geological observations of the Swiss expedition 1936*. *Memoir Society Helvetica Science Nature*, 73, 1–245.
- Sah, M.P., Bist, K.S. (1998) Catastrophic mass movement of August 1998 in Okhimath area, Garchival Himalaya. *Proc. Int. Workshop-cum-training programme on Landslide Hazard, Risk Assessment and Damage Control for Sustainable Development*, New Delhi, 259-270.
- Thakur, V.C. (1996) *Landslide Hazard Management and Control in India*. International Centre for Integrated Mountain Development Kathmandu, Nepal, 1-43.
- Valdiya, K.S. (2014) Damming rivers in the tectonically resurgent Uttarakhand Himalaya. *Current Science*, 106 (12), 1658-1668.
- Valdiya, K.S. (1989) Trans-Himadri intracrustal fault and basement upwarps south of Indus-Tsangpo Suture Zone. In *Tectonics of Western Himalaya* (eds. Malinconico, L.L. and Lillie, R.J.). Geological Society of America (Special Papers), 232, 153–168.
- Valdiya, K.S. (1980) *Geology of the Kumaun Lesser Himalaya*. Wadia Institute of Himalayan Geology, Dehra Dun, India, 1-249.



## Geoteknik Mühendisliğinde 2016-2021 Yılları Arası Sıvılaşma Çalışmaları

### Liquefaction Studies In Geotechnical Engineering Between 2016-2021

Eren Bayrakcı<sup>1</sup>, Eren Balaban<sup>2</sup>, Mehmet İnanç Onur<sup>3</sup>, Hasan Burak Özmen<sup>4</sup>, Emrah Pekkan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Sorumlu Yazar; Eskişehir Teknik Üniversitesi; erenbayrakci@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-8948-6590>; 0554 843 60 61

<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; erenb@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0001-9559-0127>

<sup>3</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; mionur@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-2421-4471>

<sup>4</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; hbozmen@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-5740-4618>

<sup>5</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi; epekk@eskisehir.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0002-9414-8887>

#### Özet

Deprem kaynaklı olarak gerçekleşen sıvılaşma olayı, geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Bu olay, depreme maruz kalan suya doymuş, gevşek, kohezyonsuz zeminlerin artan boşluk suyu basıncından dolayı ani kayma mukavemeti kaybı yaşaması olarak özetlenebilir. Devirsel kayma gerilmelerinin etkisi ile aşırı boşluk suyu basıncı oluşmakta, zemin taneleri arasındaki bağın kaybolması ile zemin sıvı gibi davranmakta ve taşıma gücü kaybı yaşanmaktadır. Yapılar için, temel altı zeminde taşıma gücü kaybı yaşanması ağır neticeler doğurmaktadır. İlk kez Arthur Casagrande tarafından ortaya konulan sıvılaşma olgusu ile alakalı günümüzde hala araştırmalar devam etmektedir. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin laboratuvar ve arazi testleri ile belirlenmesi, sıvılaşmaya karşı direncin artırılması ve 3D modelleme çalışmalarına sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada, geoteknik mühendisliği için büyük önem arz eden sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış olan deneysel çalışmaların ve yeni yöntemlerin tanıtılması amaçlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Sıvılaşma, Deprem, Laboratuvar Denepleri

#### Abstract

Earthquake-induced liquefaction is one of the most important issues in geotechnical engineering. This phenomenon can be summarized as the sudden loss of shear strength due to increase in pore water pressure of saturated, loose, cohesionless soils subjected to earthquakes. Due to the effect of cyclic shear stresses, excessive pore water pressure occurs, the bond between soil grains is lost and the soil behaves like a liquid and a loss of bearing capacity is existed. Loss of bearing capacity in the subsoil of the foundations has serious problems for buildings. Researches regarding the liquefaction phenomenon are still continuing today, which was first introduced by Arthur Casagrande. It is frequently encountered with studies to determine the liquefaction potential of soils by laboratory and field tests, to increase resistance against liquefaction and 3D modeling studies. In this study, it is aimed to introduce experimental studies conducted in the last five years (2016-2021) and new methods about liquefaction, which is of great importance for geotechnical engineering.

**Keywords:** Liquefaction, Earthquake, Laboratory Experiments

#### 1. Giriş

Sıvılaşma; kohezyonsuz, gevşek ve suya doymuş zeminlerde, drenajsız şartlarda deprem kaynaklı devirsel kayma gerilmelerinin oluşturduğu aşırı boşluk suyu basıncından dolayı efektif gerilmenin azalması olarak tanımlanabilir. Deprem anında yükleme çok ani gerçekleştiği için, yük altında sıkışma eğiliminde olan zemin, bu fırsatı bulamaz. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmede azalmaya neden olur. Bu azalma ciddi boyutlara

ulaştığında ise, zemin sıvı gibi davranmaya başlar ve sıvılaşma olayı meydana gelir. Sıvılaşma sırasında, kum kaynaması, şevlerde akma göçmesi, daha az eğimli yamaçlarda yanıl yayılmalar, istinat yapılarında yenilmeler, taşıma gücü kaybına bağlı yapı hasarları gibi birçok tehlikeli durum meydana gelmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuşcu, 2006, Kramer, 2003).

Jefferies ve Been (2016) tarafından “Calaveras barajının göçmesi hazen tarafından incelenmiş ve sıvılaşmadan dolayı göçmenin gerçekleştiği belirtilmiştir. (Hazen, 1918, 1920)”. 1936 yılına gelindiğinde ise zeminlerin sıvılaşabilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan kritik boşluk oranı Casagrande tarafından tanımlanmıştır (Casagrande, 1936). Aynı çalışmada Casagrande akma sıvılaşması ve çevrimsel yumuşamayı da tanımlamıştır (Ledesma vd, 2021 ve Ismael vd 2020).

1964 yılında peş peşe yaşanan Alaska, Good Friday ve Japonya, Niigata depremlerinde sıvılaşma kaynaklı hasarlar oldukça dikkat çekmiştir. Deprem sonrası yapılan araştırmalar neticesinde, sıvılaşma 1965 yılında ilk kez Arthur Casagrande tarafından ortaya konulmuştur. 1970’li yıllarda ise sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için ilk detaylı çalışmalar yapılmıştır (Mollamahmutoğlu ve Babuşcu, 2006).

Sıvılaşma analizi; zeminin sıvılaşmaya yatkınlığının belirlenmesi, ilave kayma gerilmelerinin zemin direncini geçip geçemeyeceğinin hesaplanması ve olası deformasyonların tahminini kapsamaktadır. Zeminlerin sıvılaşma yatkınlığının belirlenebilmesi için boşluk oranı, dane çapı, dane şekli ve gradasyonu gibi zemin özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Sıvılaşmanın tetiklenip tetiklenmeyeceğine karar verebilmek için ilave kayma gerilmeleri hesaplanır ve zeminin mukavemeti ile karşılaştırılır. Son olarak, sıvılaşma nedenli olası deformasyonlar tahmin edilerek gerekli önlemlerin belirlenmesi aşmasına geçilir.

Sıvılaşma üzerine çalışmalar, laboratuvar ve arazi deneyleri, büyük ölçekli model testleri ile nümerik analizler olarak sıralanabilir (Onur, 2018). Arazi testleri ile büyük hacimli zemin kütleleri test edilirken laboratuvar deneyleri maliyet ve hız yönünden avantajlıdır. Arazi testleri olarak; SPT, CPT başta olmak üzere sismik yansıma, kuyu yukarı, kuyu içi gibi testler kullanılmaktadır. Laboratuvar deneyleri ise dinamik üç eksenli başta olmak üzere rezonant kolon, bender eleman, dinamik kesme, burulmalı kesme deneyleri olarak sıralanabilir. Model testlerinde ise sarsma tablası ve santrifüj testleri başta olmak üzere araştırmacıların geliştirdiği ölçekli modellerde bulunmaktadır. Nümerik yöntemler ise günümüzde bilgisayar ve yazılım teknolojisinin gelişimi ile sonlu elemanlar, sonlu farklar, regresyon, yapay sinir ağı ve bulanık mantık gibi yöntemlerin veriler üzerinde uygulanmasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada, sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış laboratuvar deneyleri içeren çalışmalar özetlenmiştir. Konu ile alakalı geliştirilen yeni nesil metotların tanıtılması ve tartışılması amaçlanmıştır.

## 2. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi Çalışmaları

Abdallah vd. (2021) doyunluk derecesi ve rölatif yoğunluğun; Chlef kumunun sıvılaşma direncine etkisini araştırmışlardır. Drenajsız üç eksenli deneyleri, sırasıyla sıkı ve gevşek kuma karşılık gelen %12 ve %75’lik rölatif yoğunlukta ve %22, %45 ve %92’lik Skempton katsayıları için 100 kPa’lık bir çevresel basınç altında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin doyunluk derecesinin artmasıyla aşırı boşluk suyu basıncı logaritmik olarak artarken içsel sürtünme açısı logaritmik olarak azalmış, maksimum kesme mukavemeti lineer olarak azalmıştır. Her iki rölatif yoğunluk değerinde de oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sıvılaşmaya neden olacak kadar yüksek olmamıştır. Ayrıca Skempton katsayısının azalmasıyla numunelerin sıvılaşma direnci artmıştır.

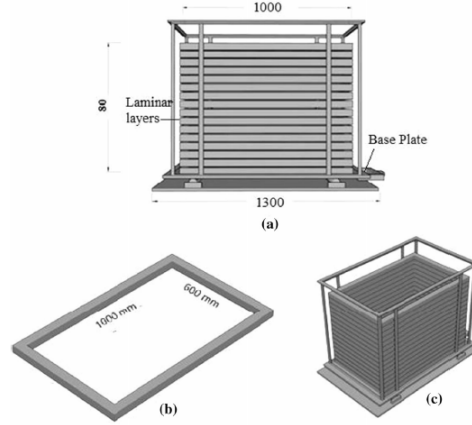
Zhu vd. (2021) yaptıkları çalışmada, çevrimsel üç eksenli testler yaparak kum zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerinde yüklem frekansının etkisini değerlendirmişlerdir. Suya doyun ve doyun olmayan kum numuneler üzerinde, farklı frekanslarda yüklemeler gerilme ve gerinim kontrollü olarak, yüklem yönleri de değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, kuru kumda yapılan gerilme kontrollü deneylerde frekans etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Doyun kumda ise gerilme kontrollü ve gerilme yönü değiştirilerek yapılan testlerde, aynı çevrim sayısında ölçülen aşırı boşluk suyu basıncının düşük frekansta daha fazla olduğu görülmüştür.

Zhu vd. (2021) Ayrık Eleman Metodu (Discrete Element Method – DEM) kullanarak gevşek kumların statik yükler altındaki gerilme tarihçesinin sıvılaşma davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Gerilme tarihçeleri drenajlı olarak çevrimsel ve saf kayma kuvvetleri olarak uygulanmış daha sonra drenajsız monotonik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, geçici sıvılaşma tüm numunelerde görülmüştür. Saf kesmeye maruz kalan numunelerde oluşan deviatör gerilmenin çevrimsel kaymaya maruz kalmış numunelere göre fazla olduğu belirlenmiştir.

Beena vd. (2021) Hindistan, Kerala’da bulunan kıyı kumlarının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için tabakalı bir kutu sistemi kullanılarak sarsma tablası ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Sarsma tablası testleri için katmanlı bir zemin kabı (Şekil 1) geliştirilerek içerisindeki kumda oluşan aşırı boşluk suyu basıncı tepkilerini sunmuşlardır. Çalışmada, zeminin değişen rölatif yoğunluklarda, sabit sallama frekansında (1Hz) oluşan aşırı boşluk suyu basıncı üzerinde zemin gradasyonunun ve temel sarsıntısı genliğinin etkisi araştırılmıştır. Taban sarsıntısının genliği arttıkça



ve zeminin rölatif yoğunluğu azaldıkça zemin sıvılaşma direncinin azaldığı, daha düşük yüzdede ince kum içeriğine ve daha büyük ortalama tane boyutuna sahip kumun sıvılaşmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir.



**Şekil 1.** Tabakalı kutu tasarımı (a) Önden görünüm, (b) Tabaka ölçüleri, (c) 3D görünüm

Umar vd. (2021) Toyoura kumunun sıvılaşma sonrası drenajsız mukavemetini ve deformasyonunu, yüksek birim deformasyonlu burulma kesme testi kullanılarak incelemiştir. Zeminin saha gerilme koşullarını uygulamak amacıyla içi boş silindirik bir numune üzerinde basit kesme deneyleri uygulanmıştır. Hava püskürtme (air-pluviation method) yöntemiyle hazırlanan numuneler, ilk olarak sabit genlikli bir drenajsız çevrimsel kesme uygulanarak sıvılaştırılmıştır. Testler, farklı birim deformasyon genliklerinde sonlandırılmış ve ardından gerilme-şekil değiştirme ve aşırı boşluk suyu oluşturma tepkilerini elde etmek için drenajsız koşullarda monotonik olarak yüklenmiştir. Sıvılaşma sonrası drenajsız kesme mukavemetinin, kalıntı şekil değiştirmeden önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir.

Güler vd. (2021) 1999 depreminin etkisi ile sıvılaşmanın görüldüğü Adapazarı bölgesinden alınan örneklerden farklı boşluk oranları ile hazırlanan siltli kum numunelerde dinamik üç eksenli test sistemi ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. Aynı şartlarda hazırlanan numunelerin geçirimsizlik deneyleri yapılarak, hidrolik iletkenlik ile sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişkiyi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çevrimsel direnç oranı ile boşluk oranı ve geçirimsizlik katsayıları arasında bağıntı önermişlerdir.

Literatürdeki araştırmalar, bir kumun sıvılaşma yaşaması durumunda, artçı şoklarda kumun yeniden sıvılaşma davranışını büyük ölçüde etkileyebilecek anizotropinin meydana geleceğini göstermiştir. Iwai vd. (2020) Toyoura kumu üzerinde ardışık drenajsız üç eksenli çevrimsel yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Önce tüm numuneler sıvılaşana kadar aynı drenajsız tekrarlı yüklemeye tabi tutmuş, ardından sıvılaştırılmış numuneler farklı kalıntı deformasyonda sabitlenerek konsolide edilmiştir. Konsolide edilen numuneler tekrar drenajsız koşulda çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Kalıntı şekil değiştirmenin kumun yeniden sıvılaşma davranışını büyük ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Wei vd. (2020) siltli kumların boşluk oranı sabit tutularak, tane boyutu değişimi ve ince tane miktarının sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini açıklayabilmek için çevrimsel üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çevrimsel direncin azalması ile ince tane oranı arasında doğrusal ilişkili bir ifade tanımlanmıştır. Kumun karakteristik boyutları ile ince taneler arasındaki oranın bu ifade ile doğru orantılı olduğu ancak kum boyutları ile belirli bir ilişkisinin olmadığı görülmüştür.

Du vd. (2020) yaptıkları çalışmada, sıvılaşma sırasında meydana gelen kum kaynamalarının deney süreçlerine dahil edilebilmesi için üç eksenli test sisteminde kontrollü drenajın sağlandığı bir deney düzeneği tasarlamıştır. Drenajsız şartlarda geleneksel kesme, kontrollü drenaj altında kesme ve sıvılaşmaya kadar drenajsız kesme ardından kontrollü drenaj altında sürekli kesme olmak üzere üç farklı gerilme kontrollü üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yüksek kesme genlikleri altında bile zeminin artık sıvılaşmaya duyarlı olmadığı kritik bir boşluk oranına dikkat çekilmiştir. Sönmez (2020) çalışmasında, deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü testleri dinamik basit kesme test cihazı kullanılarak yapmış, ince tane dağılımının kumların sıvılaşma dirençleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Farklı silt içeriklerine sahip iki farklı kumun sıvılaşma davranışları karşılaştırılmıştır. Gerilme ve deformasyon kontrollü testlerin sıvılaşma enerjisinde meydana gelen değişim farklı çıkarsa da kümülatif sıvılaşma enerjisi birbirine çok yakın değerler vermiştir. İnce tane içeriğindeki artışın testlerde sıvılaşma enerjisini azalttığı görülmüştür. Rölatif sıklık arttıkça taneler arasındaki temasın ve sıklığın artmasına bağlı olarak sıvılaşma enerjisini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Keishing vd. (2020) Ayrık Eleman Metodu (Discrete Element Method – DEM) ile drenajsız üç eksenli deneylerde boşluk oranı, başlangıç ortalama efektif gerilme, ortalama deviatör gerilme, deviatör gerilme büyüklüğü ve yönü, boşluk suyu basıncı gelişimi parametrelerinin sıvılaşma davranışına olan etkisini modellemiştir. Yapılan

simülasyonlarda sıvılaşmaya en çok etki eden parametrenin boşluk oranı olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, sıvılaşma için gerekli olan enerji miktarı ile ilgili yeni bir denklem önerilmiştir. Denklemde ortalama deviatör gerilmeye yer verilmesiyle birlikte elde edilen modelin etkinliğinin arttığı belirtilmiştir.

Morimoto vd. (2019) başlangıçta statik kayma gerilmesi altında bulunan numuneler üzerinde uygulanan dinamik yükün büyüklüğüne göre sıvılaşma davranışını incelemişlerdir. Deneyler yeni geliştirilen «stacked-ring apparatus» cihazıyla ardışık olarak yapılarak, gerilme tarihçesi etkisi ortaya konmuştur. Deneyler sonucunda, geçmişte uygulanan dinamik yükün büyük olması durumunda, sıvılaşmadan sonra numunenin rölatif sıklığının daha fazla arttığı belirlenmiştir. Yüksek anizotropiye sahip numunelerde sıvılaşma daha erken gerçekleşmiştir.

Mele vd. (2019) üç ince taneli malzemenin gevşek, doymuş ve doymamış numuneleri üzerinde çevrimsel drenajsız üç eksenli testler gerçekleştirmiştir. Doygunluk derecesi azaldıkça sıvılaşma direncinin keskin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Sıvılaşmanın başlangıcını ve bitişini tanımlayan viskozitenin karakteristik değerlerinin, zeminin tane dağılımına bağlı olduğu ve üniformluk katsayısı arttıkça arttığı gösterilmiştir.

Wu and Kiyota (2019) yaptıkları çalışmada, kayma dalgası hızı ile sıvılaşma direnci arasındaki ilişkiyi bulabilmek için farklı yük geçmişlerine sahip, farklı yoğunluklarda ve zemin yapısındaki Toyoura kumları üzerinde dinamik üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde drenajlı tekrarlı yüklerin kayma dalgası hızında artışa sebep olduğu, ilk sıvılaşma deneyinden sonra numunelerin rölatif yoğunluklarının arttığı ancak kayma dalgası hızının azaldığı belirlenmiştir. Sıvılaşma nedeniyle Toyoura kumunda meydana gelen deformasyonların kayma dalgası hızından ziyade yoğunluktan etkilendiği görülmüştür. Ye vd. (2019) akma sıvılaşması davranışını açıklayabilmek ve göçme öncesi son yükleme çevrimini belirleyebilmek için Toyoura kumu üzerinde dinamik üç eksenli testler gerçekleştirmiştir. Farklı rölatif yoğunluklarda nemli sıkıştırma metodu ile hazırlanmış numunelerin bir grubuna klasik gerilme kontrollü testler uygulanırken diğer grubuna iki aşamalı olarak önce belirlenen düzeye kadar gerilme kontrollü çevrimsel yükleme, daha sonra deformasyon kontrollü monotonik yükleme uygulanmıştır. Bu yükleme yöntemi ile akma sıvılaşması meydana geldiğinde numunelerin ani çökmesini önenebilir ve gevşek kumların akma sıvılaşma davranışlarının ayrıntılı bir incelemesinin yapılmasına yardımcı olabileceği belirtilmiştir.

Mase vd. (2019) Osaka'da bulunan çalışma alanından aldıkları Izumio kumunun sıvılaşma direnci ve çevrimsel davranışını üç eksenli deney yöntemini kullanarak incelemişlerdir. 12,5m kadar olan derinlikten standart penetrasyon testi ile deney numunelerini elde etmişler ve SC ve SM olarak iki farklı zemin sınıflandırmışlardır. Dinamik üç eksenli deneyinden elde ettikleri sıvılaşma direnci eğrileri SC ve SM zemin sınıfındaki her iki kumun da daha önceden sıvılaşmış kumların sıvılaşma eğrileri ile aynı eğilimi gösterdiğini belirlemişlerdir.

Licata vd. (2018) İtalya'nın Napoli bölgesinden elde edilen siltli kumun drenajsız çevrimsel davranışını, monoton ve çevrimsel üç eksenli testler ile örselenmemiş numuneler ve sıkıştırılmış zemin karışımları üzerinde analiz etmiştir. Zeminin doğal tane boyu dağılımı korunarak, plastik olmayan kül, plastik ince tane ile veya piroklastik kum, silisli malzeme ile değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Doku, tanelerin kırılması ve plastik olmayan ince tane içeriği gibi özel yapısal faktörlerin drenajsız çevrimsel davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla tüm testler aynı konsolidasyon oranına ve aynı sıklıktaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, plastik olmayan ince kül eklenmesinin, plastik ince tanelere göre çevrimsel direnci belirgin ölçüde arttırdığını, tanelerin kırılma miktarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Asadi vd. (2018) Yeni Zelanda'nın Kuzey Adası'ndaki Waikato Havzası'nda bulunan doğal pomzalı kumların drenajsız çevrimsel davranışı üzerine tane şekli ve ezilmenin etkisini araştırmışlardır. Doğal pomzalı kum ve farklı rölatif yoğunluklardaki Toyoura kumu üzerinde gerçekleştirilen drenajsız çevrimsel üç eksenli deneyler neticesinde, aynı rölatif yoğunlukta pomzalı kumların sıvılaşma direncinin Toyoura kumuna göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pomzalı kumlar, çevrimsel yükleme uygulaması altında başlangıçta büzülme davranışı göstermiş, ancak birkaç döngüden sonra bu, çok güçlü bir genleşme davranışına dönüşmüştür. Pomzalı numunelerin içinde kararlı bir zemin iskeleti oluşması nedeniyle, duraysızlık gözlenmemiştir.

Yang ve Pan (2018) izotropik ve farklı oranlarda anizotropik olarak konsolide edilmiş numunelere dinamik üç eksenli deney yaparak, farklı konsolidasyon oranları ile birlikte farklı büyüklüklerdeki çevrimsel yüklerin boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde, farklı rölatif yoğunlukların ve yükleme koşullarının numuneler üzerinde üç farklı göçme moduna (Akma sıvılaşması, Çevrimsel hareketlilik ve Kalıntı deformasyon göçmesi) yol açtığı görülmüştür. Bir numunenin çevrimsel yükler altında yenilmesi için gerekli olan enerji miktarının çevrimsel gerilme büyüklüğüne bağlı olduğu belirtilerek, literatürdeki bazı verilerle de çeliştiği ifade edilmiştir.

Zhuang vd. (2018) Yangtze Nehri vadisi boyunca yoğun bir şekilde biriken şistli Nanjing kumunun farklı yükleme durumları altında sıvılaşma sonrası kayma modülü azalmasını araştırmak için çevrimsel burulmalı kesme testi gerçekleştirmişlerdir. Karşılaştırma amacıyla Toyoura kumu ile deneyler tekrar edilmiştir. Ayrıca, membranın numunenin mukavemeti üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Kayma birim deformasyon seviyesi %20'den büyük olduğunda membran etkisinin ihmal edilemeyeceği görülmüştür. Sıvılaştırılmış haldeki Toyoura ve Nanjing

kumlarının kayma modülü eğrilerinin benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Noorzad ve Shakeri (2017) yapmış oldukları çalışmada, genellikle temiz kum gibi davrandığı düşünülen siltli kumun sıvılaşma sonrası davranışlarını incelemek ve silt içeriğinin kumlarda çevrimsel yüklemeye ile elde edilen mukavemeti nasıl değiştireceğini belirlemek için monotonik üç eksenli testler gerçekleştirmişlerdir. %15 siltli kumda dayanım azalırken %30 siltli kumda dayanımın arttığını, temiz kumda veya %5 siltli kumda ise dayanımdaki değişimin ihmal edilebilir derecede olduğunu gözlemlemişlerdir.

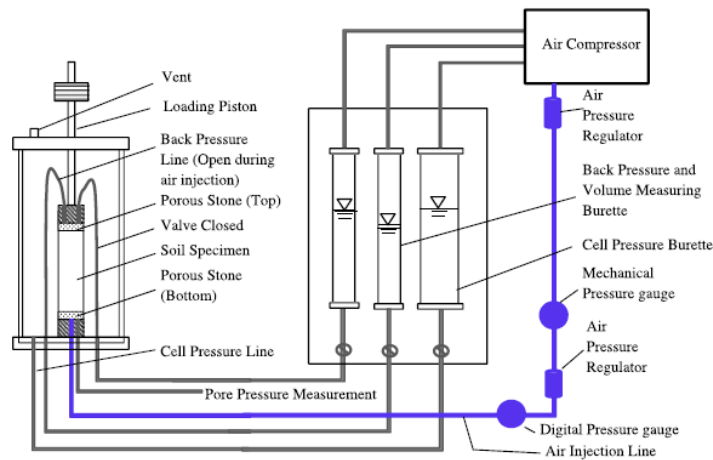
Azeiteiro vd. (2017) yaptıkları çalışmada, dinamik üç eksenli deneyinde numuneler üzerine uygulanan yüklerin düzensiz olmaları durumunda numunelerin sıvılaşma davranışına olan etkilerini incelemiştir. Ünlü yüklemeye ve büyük genlikli tek bir pik yüklemeye döngüsü içeren drenajsız çevrimsel üç eksenli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Tek bir yüksek genlikli gerilme uygulanmasının numunede gerçekleşen deformasyonu hızla arttırdığı, benzer şekilde boşluk suyu basıncında ani artış meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca, böyle bir yüklemenin daha erken uygulanmasının numunenin sıvılaşması için gerekli çevrim sayısını azalttığı belirlenmiştir.

Chang vd. (2017) plastik olmayan siltli kumun sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme davranışını araştırmak için Tayvan'daki Hsinhwa bölgesini araştırma alanı olarak seçmişlerdir. Laboratuvar testleri için yüksek kaliteli örselenmemiş zemin numuneleri elde edilmiş, boşluk oranı, ince tane içeriği ve örselenme derecesinin plastik olmayan siltli kumun sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyonuna etkisi araştırılmıştır. Boşluk oranı, ince tane içeriği ve örselenme derecesinin yükselmesi, sıvılaşma sonrası daha yüksek hacimsel deformasyon olacağını göstermektedir. %20~35 ince tane içeriğinin bir geçiş bölgesi olduğu ve dinamik davranışın değiştiğini gösteren çalışmalar ile uyumlu davranış gözlemlenmiştir.

Arab vd. (2016) doygunluk derecesinin kumun sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisini belirlemek için drenajlı, drenajsız monotonik ve çevrimsel üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Testler farklı rölatif yoğunluklarda Hostun RF kumu (Fransa) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, Skempton katsayısı B'nin azalmasıyla sıvılaşma direncinin arttığını göstermektedir. Sıvılaşma direncini Skempton B katsayısı ile ilişkilendirmek için basit bir matematiksel ilişki önerilmiştir.

### 3. Sıvılaşmanın Önlenmesine Yönelik Çalışmalar

Amanta ve Dasaka (2021) yaptıkları çalışmada, suya doygun granüler zeminin çevrimsel üç eksenli cihaz ile sıvılaşmasına karşı hava enjeksiyon yönteminin etkinliğini araştırmışlardır. Değişken olarak gerinim genliği, çevresel basınç ve hava enjeksiyon basınçları dikkate alınarak Hint standart kumu üzerinde gerinim kontrollü çevrimsel üç eksenli testler gerçekleştirilmiştir. Desatürasyon işlemi gerçekleştirebilmek ve hava enjeksiyon işlemi kolaylaştırmak için, Şekil 2'de gösterildiği gibi üç eksenli deney cihazı modifiye edilmiştir. Görsele mavi renkle vurgulanan hat ile numune tabanına hava kompresörü bağlanmıştır. Konsolide edilmiş suya doygun zemin numunelerine hava enjekte edilmiştir. Tamamen suya doygun ve hava enjeksiyonu uygulanmış zeminlerin dinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Zeminin hava enjeksiyon yöntemiyle desatürasyonunun zeminin sıvılaşma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Farklı çevresel basınçların ulaşılabilecek nihai desatürasyon seviyesinde çok etkili olmadığı, hava enjeksiyonu durdurulduktan 30 gün sonra bile zemin içerisindeki havanın sistemi terk etmediği çalışmanın diğer bulguları arasındadır.



Şekil 2. Hava enjeksiyonu için modifiye edilmiş üç eksenli deney cihazı



Geoteknik mühendisliği alanında zeminlerin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için biyopolimerlerin kullanımı son yıllarda popüler bir araştırma konusu olmuştur. Smitha ve Rangaswamy (2020) yaptıkları çalışmada Kalpetta, Kerala, Hindistan'dan elde edilen agar biyopolimeri ile farklı kütleme sürelerinde işlenmiş doğal siltli kum üzerinde gerinim kontrollü dinamik üç eksenli bir dizi konsolidasyonlu drenajsız test gerçekleştirilmiştir. 7 gün kürlenmiş, %2 agar biyopolimer uygulanmış zeminin kayma modülünün 50. yükleme döngüsünde işlenmemiş zemin örneklerinden %317 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sıvılaşmadan kaynaklı zemin hasarlarının hafifletilmesi için biyopolimerlerin çevre dostu bir alternatif olarak kullanılma potansiyeli olduğu tespit edilmiştir.

He vd. (2020) sıvılaşmaya karşı zemini iyileştirmek için kullanılan biyosementasyon uygulamasında, doğrudan canlı bakteri kullanmak yerine üreolitik bakterilerin parçalanmasından elde edilen ham üreaz kullanarak yeni bir metod geliştirmişlerdir. Ultrasonik hücre parçalama yöntemi kullanılarak bakterilerden ham üreazın başarıyla elde edilebileceği bulunmuştur. Üreaz ile muamele edilen siltli kum numunelerinin canlı bakteri ile muamele edilen numunelere göre daha yüksek kesme mukavemetlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Zhang ve Russell (2020) ayrık aglomera Loksand liflerini kumla karıştırarak zeminin sıvılaşmaya karşı direncini arttırmak üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Karışımlara drenajlı ve drenajsız üç eksenli basınç testleri uygulayarak yüklerin kum iskeleti, lifler ve boşluk suyu boyunca dağıtıldığı ve paylaşıldığı mekanizmaları göstermişlerdir. Liflerin kum iskeletinin maruz kaldığı yük yollarını nasıl değiştirdiği gösterilmiştir. Liflerin sıvılaşmayı nasıl önlediği ve geleneksel olarak tanımlanan boşluk suyu basıncı oranının yanlış bir şekilde aksini belirtebileceği tespit edilmiştir.

Ciardi vd. (2020) koloidal silika jelinin zemin sıvılaşmasına, hidrolik geçirgenliğine ve oturmasına olan etkilerini incelemiştir. Dinamik üç eksenli deneyleri, farklı çevrimsel gerilim oranları (CSR-cyclic stress ratio) ve koloidal silika jeli yüzdeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde kesme kutusu deneyi ve ödometre testi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar zeminin sıkışabilirliğinin azaldığını ve %2 koloidal silika oranının zeminin sıvılaşma direncini iyileştirmede katkı sağladığını göstermiştir.

Bai vd. (2019) yaptıkları çalışmada polipropilen fiberlerin temiz kum zeminlerin sıvılaşma davranışına olan etkilerini halka kesme testi (ring shear test) ile incelemiştir. Deney programı kapsamında 2 farklı yoğunlukta ve 3 farklı yüzdesel içerikte polipropilen kum karışımları test edilmiştir. Deneyler sırasında normal gerilme, kesme gerilmesi, aşırı boşluk suyu basıncı, kayma gerinimi ve düşey deplasman sürekli olarak ölçülmüştür. Polipropilen fiberlerin etkisinin daha yoğun numunelerde daha belirgin olduğu, sıvılaşma direncinin arttığı ve kumun sıvılaşma sonrasındaki yayılım davranışını engellediği belirlenmiştir.

Keramatikerman vd. (2018) yaptıkları çalışmada, uçucu külün kum-bentonit karışımının sıvılaşma davranışına etkisini bir dizi drenajsız monotonik üç eksenli testler uygulayarak araştırmışlardır. Uçucu kül ilavesinin daha büyük bir deviatorik gerilmeye ve akızsız bir davranış oluşumuna neden olduğunu gösterilmiştir. Uçucu kül ile muamele edilmiş numunelerde, rölatif yoğunluk arttıkça maksimum deviatorik gerilmenin de arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, kum-bentonit numunelerinin uçucu kül uygulanmış numunelere göre daha düşük sıvılaşma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir.

Simatupang vd. (2018) enzimatik olarak indüklenmiş, kalsit çökeltme işlemi görmüş kumun drenajsız çevrimsel davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamak için kapsamlı deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Keisha ve Toyoura kumu kullanılarak tanecik boyutu, çevre basıncı, kalsit içeriği ve çökeltme sırasındaki doyma derecesinin sıvılaşma direnci üzerinde etkisi incelenmiştir. Kalsitin kum tanelerini bağlayarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesine doğrudan katkıda bulunduğu görülmüştür.

Mikrobiyal kaynaklı kalsit çökeltme, dinamik yüklemeye maruz kalan kumların davranışını iyileştiren yeni bir zemin iyileştirme tekniğidir. Feng ve Montoya (2017) kayma dalgası hızının yalnızca kalsitin külesinden etkilenmediğini, aynı zamanda parçacık temaslarında kalsit çökeltisinin dağılımından da etkilendiğini göstermeyi amaçlamıştır. Mikrobiyal kaynaklı kalsit çökeltme ile aynı kalsit değerinde ancak farklı kayma dalgası hızlarına sahip olacak şekilde numuneler hazırlanmış ve ardından çevrimsel olarak yüklenmiştir. Daha yüksek kayma dalgası hızına sahip numunenin daha büyük sıvılaşma direncine sahip olduğu gösterilmiştir. Davranışın sadece kalsit külesinden değil, aynı zamanda kalsit dağılım modelinden de etkilendiği belirtilmiştir.

Li vd. (2016) kum zeminlerin sıvılaşmaya karşı performansının iyileştirilmesinde geri dönüştürülmüş kauçuk kırıntılarının potansiyel kullanımını değerlendirmek için, kauçuk-kum karışımlarının dinamik davranışını rezonant kolon ve çevrimsel üç eksenli testleri uygulanarak incelenmiştir. Kauçuk-kum karışımlarının sonuçları literatürden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karışım oranının, dinamik kesme modülünü ve sıvılaşma duyarlılığını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir.

#### 4. Yorumlar

Sıvılaşma önlem alınmadığında büyük deformasyonlara neden olmaktadır. Sıvılaşmaya karşı önlem alınabilmesi için sıvılaşma mekanizmasının tam olarak ortaya konulması gerekmektedir. Sıvılaşma davranışının belirlenebilmesi için çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Özellikle sıvılaşma davranışını etkileyen parametrelerin belirlenmesi ile sıvılaşma sonrası tekrar yüklemeye maruz kalan zeminlerin davranışının test edilmesine yönelik deneysel çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmada sıvılaşma konusu ile ilgili son beş yılda (2016-2021) yapılmış olan deneysel çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmalardan deprem tehlikesi bulunan ve sıvılaşma potansiyeli olan zeminler için sıvılaşma analizlerinde laboratuvar deneylerinin halen kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca sıvılaşma davranışı için genel mekanizmalar benzer olsa da her zemin numunesi için deneysel analizlerin gerekli olduğu ve sıvılaşma direncinin birçok farklı parametreye bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

#### Referanslar

- Abdallah K., Abdelkader B., Ahmed A., Eddine B.D., Marwan S. (2021) A laboratory study of shear strength of partially saturated sandy soil. *Geomechanics and Geoenvironmental Engineering*, <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1864034>.
- Amanta A.S., Dasaka S.M. (2021) Air injection method as a liquefaction countermeasure for saturated granular soils. *Transportation Geotechnics*, 30, 100622, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100622>.
- Arab A., Belkhatir M., Sadek M. (2016) Saturation Effect on Behaviour of Sandy Soil Under Monotonic and Cyclic Loading: A Laboratory Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34: 347-358, <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9949-6>.
- Asadi M.S., Asadi M. B., Orense R. P., Pender M. J. (2018) Undrained Cyclic Behavior of Reconstituted Natural Pumiceous Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001912](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001912).
- Azeiteiro J.N.R., Coelho P. A. L. F., Taborda D. M.G., Grazina J. C.D. (2017) Energy-based evaluation of liquefaction potential under non-uniform cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 650-665, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.005>.
- Bai Y., Liu J., Song Z., Bu F., Qi C., Qian W. (2019) Effects of Polypropylene Fiber on the Liquefaction Resistance of Saturated Sand in Ring Shear Tests. *Applied Sciences*, 9(19):4078, <https://doi.org/10.3390/app9194078>.
- Beena K.S., Jayakrishnan V., Alex A., Bindu C.S. (2021) Analysis of Liquefaction Potential of Coastal Sands Using Lamina Box System. *Indian Geotech J* 51, 1209–1224, <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00503-0>.
- Casagrande A. (1936) Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Earth Fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 257-276.
- Chang M.H. Chen J.W., Lee W.F. (2017) Post-liquefaction volumetric strain behavior of non-plastic silty sand - A case study of Hsin-Hwa liquefaction. *Journal of Applied Science and Engineering*, 20(1), 63-72, <https://doi.org/10.6180/jase.2017.20.1.08>.
- Ciardi G., Bardotti R., Vannucchi G. and Madiati C. (2020) Effects of high-diluted colloidal silica grouting on the behaviour of liquefiable sand. *Geotechnical Research* 7(4): 193–208, <https://doi.org/10.1680/jgere.20.00010>.
- Du S., Chian C. S., Qin C. (2019) Post-liquefaction Pore Pressure Dissipation in Sand under Cyclic Stress Triaxial Testing. *Géotechnique*, 70(2), 1-42, <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.p.205>.
- Feng K. and Montoya B.M. (2017) Quantifying Level of Microbial-Induced Cementation for Cyclically Loaded Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001682).
- Güler E., Savaş H., Afacan K.B. (2021). Effect of permeability on liquefaction potential of silty sands. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:1410, 2-9, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07822-9>.
- Hazen, A. (1918) A study of the slip in the Claveras Dam. *Engineering News Record*, 81(26), 1158-1164.

- Hazen, A. (1920) Hydraulic fill dams. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 83, 1713-1745
- He J., Gao Y., Gu Z., Chu J., Wang L. (2020) Characterization of Crude Bacterial Urease for CaCO<sub>3</sub> Precipitation and Cementation of Silty Sand. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003100).
- Ismael B., Lombardi D., Bhattacharya S., Ahmad S.A. (2020) Use of Instability Curves for the Assessment of Post Liquefaction Stability and Deformation of Sloping Grounds. Engineering Geology 265
- Iwai H., Ni X., Ye B., Nishimura N., Zhang F. (2020) A new evaluation index for reliquefaction resistance of Toyoura sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 136: 106206, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106206>.
- Jefferies M., and Been K. (2016) Soil Liquefaction A Critical State Approach Second Edition CRC Press, ISBN 9780367873400
- Keishing J., Huang X., Hanley K. (2020) Energy dissipation in soil samples during cyclic triaxial simulations. Computers and Geotechnics, 121: 103481, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103481>.
- Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H., Sabbar A.S. (2018) Effect of flyash on liquefaction behaviour of sand-bentonite mixture. Soils and Foundations, 58(5), 1288-1296, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.004>.
- Kramer S.L. (2003). Geoteknik Deprem Mühendisliği. (Çev. K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitapevi. (Orijinal yayın tarihi, 1996)
- Ledesma O., Manzanal D., and Sfriso A. (2021) Formulation and Numerical Implementation of a State Parameter-Based Generalized Plasticity Model for Mine Tailings. Computers and Geotechnics, 135.
- Li B., Huang M. and Zeng X. (2016) Dynamic Behavior and Liquefaction Analysis of Recycled-Rubber Sand Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(11), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001629).
- Licata V., D'Onofrio A., Silvestri F. (2018) Microstructural factors affecting the static and the cyclic resistance of a pyroclastic silty sand. Géotechnique, 68(5), 434-441, <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.319>.
- Mase L. Z., Likitlersuang S., Tobita T. (2019) Cyclic behaviour and liquefaction resistance of Izumio sands in Osaka, Japan. Marine Georesources & Geotechnology, 37(7), 765-774, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1485793>.
- Mele L., Tian J.T., Lirer S., Flora A., Koseki J. (2018) Liquefaction resistance of unsaturated sands: Experimental evidence and theoretical interpretation. Géotechnique, 69. 1-44, <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.042>.
- Mollamahmutoğlu M. ve Babuşcu F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri. Ankara: Gazi Kitapevi.
- Morimoto T., Aoyagi Y., Koseki J. (2019) Effects of small and large shear histories on multiple liquefaction properties of sand with initial static shear. Soils and Foundations, 59,2024-2035, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.001>.
- Noorzad R., Shakeri M. (2017) Effect of silt on post - cyclic shear strength of sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 97, 133-142, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.013>.
- Onur M. (2018) Eskişehir Kohezyonlu Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi. 2ND International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management 04-06 May 2018. Sakarya, Turkey.
- Simatupang M., Okamura M., Hayashi K., Yasuhara H. (2018) Small-strain shear modulus and liquefaction resistance of sand with carbonate precipitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 115, 710-718, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.027>.

- Smitha S. and Rangaswamy K. (2020) Effect of Biopolymer Treatment on Pore Pressure Response and Dynamic Properties of Silty Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003285).
- Sönmezer, Y. B. (2020) Siltli Kumlarda Gerilme Kontrollü ve Deformasyon Kontrollü Sıvılaşma Testlerinin Karşılaştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 322-337, <https://doi.org/10.31202/ecjse.621605>.
- Umar M., Kiyota T., Chiaro G., Duttine A. (2021) Post-liquefaction deformation and strength characteristics of sand in torsional shear tests. *Soils and Foundations*, 61:5, 1207-1222, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.009>.
- Wei X., Yang J., Zhou Y. G., Chen Y. (2020) Influence of particle-size disparity on cyclic liquefaction resistance of silty sands. *Géotechnique Letters*, 10(2), 155-161, <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00076>.
- Wu C., Kiyota T. (2019) Effects of specimen density and initial cyclic loading history on correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance of Toyoura sand. *Soils and Foundations*, 59, 2324-2330 <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.018>.
- Yang Z. X., Pan K. (2018) Energy-Based Approach to Quantify Cyclic Resistance and Pore Pressure Generation in Anisotropically Consolidated Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002419).
- Ye B., Ni X., Ye G., Huang Y., Lu P. (2019) Prediction of the initial point of the last cycle in undrained cyclic triaxial tests on flow liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 12-22, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.028>.
- Zhang X. and Russell A.R. (2020) Assessing Liquefaction Resistance of Fiber-Reinforced Sand Using a New Pore Pressure Ratio. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002197).
- Zhu M., Gong G., Xia J., Liu L., Wilkinson S. (2021) Effects of deviator strain histories on liquefaction of loose sand using DEM. *Computers and Geotechnics*, 136: 104213, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104213>.
- Zhu Z., Zhang F., Peng Q., Dupla J.C., Canou J., Cumunel G., Foerster E. (2021) Effect of the loading frequency on the sand liquefaction behaviour in cyclic triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147:106779, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106779>.
- Zhuang H., Wang R., Chen G., Miao Y., Zhao K. (2018) Shear modulus reduction of saturated sand under large liquefaction - induced deformation in cyclic torsional shear tests. *Engineering Geology*, 240, 110-122, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.018>.