J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 55, No. 12 (2022), pp. 1031-1039
doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.12.1031
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

An analysis of land displacements in terms of hydrologic aspect: satellite-based precipitation and groundwater levels

Oh, Seungcheol[a] · Kim, Wanyub[b] · Kang, Minsun[c] · Yoon, Hongsic[d] · Yang, Jungsuk[e] · Choi, Minha[d,f]*

[a]Ph.D. Course Student, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[b]Master Student, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[c]Master Student, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[d]Professor, School of Civil, Architecture Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
[e]Professor, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea
[f]Professor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 22-091
Received: 6 October 2022; Revised: 9 November 2022; Accepted: 12 November 2022

Abstract

As one of the hydrological factors closely related to landslides, precipitation indirectly affects slope stability by generating external forces. Groundwater level fluctuations have attracted more attention lately as factors that directly affect slope stability have become more prominent. Therefore, this study attempted to analyze the relationship between variables through changes in precipitation, groundwater levels, and land displacement. A time series-based analysis was conducted using satellite-based precipitation and point-based groundwater levels in conjunction with the PSInSAR technique to simulate land displacement in urban and mountainous areas. There was a sharp rise in groundwater levels in both urban and mountain areas during heavy rainfall, and a continuous decrease in urban areas when rainfall was low. 6 mm of displacements was observed in the mountainous area as a results of soil outflow from the topsoil layer, which was accompanied by an increased groundwater level. Meanwhile, different results were found in urban area. In response to the rise in groundwater level, the land displacement increases due to the expansion of soil skeletons, while the decrease seems to be attributed to anthropogenic influences. Overall, there was no consistent relationship between groundwater levels and land displacement, which appears to be caused by factors other than hydrological factors. Additional consideration of environmental factors could contribute to a deeper understanding of the relationship between the two factors.

Keywords: Precipitation, Groundwater level, Land subsidence, Synthetic aperture radar, Interferometry

수문학적 관점에서의 지반 변위 분석: 인공위성 강우데이터와 지하수위 연계

오승철[a] · 김완엽[b] · 강민선[c] · 윤홍식[d] · 양정석[e] · 최민하[d,f]*

[a]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 석박통합과정, [b]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 석사과정,
[c]성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 석사과정, [d]성균관대학교 건설환경공학부 교수, [e]국민대학교 건설시스템공학과 교수,
[f]성균관대학교 수자원학과 교수

요 지

강우는 산사태와 밀접한 연관성을 지니는 수문 인자 중 하나로, 외력을 발생시켜 지반 안정성에 간접적으로 관여한다. 최근에는 지반 안정성에 직접적인 영향을 미치는 인자인 지하수위의 변동에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 강우, 지하수위와 지반 변위의 변동을 통해 변수 간 관계성을 분석하고자 하였다. PSInSAR 기법을 사용하여 도심과 산지에서의 지반 변위 모의 결과를 도출하였고, 위성 기반 강우와 지점 기반 지하수위 자료와 연계하여 시계열 기반 분석을 실시하였다. 고강도 강우에 대해 도심과 산지에서 모두 급격한 지하수위의 상승이 나타났으며, 무강우 및 저강우 기간에 대해 도심에서는 지속적인 감소 경향이 나타났다. 지하수위의 증가에 대해 산지에서는 6 mm 수준의 지반 침하가 관측되었으며, 이는 표토층의 토사 유출로 인한 결과로 보인다. 한편 도심에서는 다양한 결과가 나타났는데 지하수위 상승에 대한 지반 변위의 증가와 토양 뼈대의 확장으로 인한 결과로 볼 수 있으나, 지반 변위의 감소는 인위적 영향에서 기인된 결과로 보인다. 전반적으로 지하수위와 지반 변위 간 관계성이 일관되게 나타나지 않았는데, 이는 수문인자 외의 다른 영향인자로 인한 결과로 보인다. 두 인자 간 관계성에 영향을 미치는 환경 인자들이 추가로 고려된다면 관계성을 보다 면밀히 파악하는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

핵심용어: 강우, 지하수위, 지반침하, 합성개구레이더, 간섭계

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-290-7539
E-mail: mhchoi@skku.edu (Choi, Minha)

© 2022 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

지구온난화로 인한 수문 순환(hydrological cycle)의 가속화는 세계적인 강수량의 증가를 야기하였다(Zhang *et al*., 2021). 강우는 지반 침하와 밀접한 연관성을 지닌 수문 인자 중 하나로, 침투(infiltration)를 통해 지면으로 흡수되어 토양 포화도를 증가(공극수압을 상승)시키고 침루(percolation)를 통해 지하수면(water table)의 상승을 야기한다(Yin *et al*., 2022; Kim *et al*., 2017). 일정 강도 이상의 강우는 시간이 지남에 따라 토양 강도의 감소로 이어지며, 이 과정에서 지역의 지형학적(topographical), 형태학적(morphological), 그리고 수문지질학적(hydrogeological) 특성에 영향을 받는다. 따라서 지반 변위의 변화에 대한 이해도를 높이기 위해서는 강우와 같은 외적 요인(external force)뿐 아니라 지반 내부의 변화에 대한 선제적인 파악이 요구된다.

강우는 지반 안정성 분석과 산사태 개시조건(initiation condition) 파악에 있어 빈번히 활용된 수문 인자이자 외적 요인 중 하나로(Guzzetti *et al*., 2007; Segoni *et al*., 2018), 국내에서는 타 인자에 비해 인프라 구축 수준이 높아 자료 획득이 용이하다. 최근에는 토양수분, 토성 등 지반 안정성에 보다 직접적인 영향을 끼치는 인자들이 주목받는 추세이다(Kitutu *et al*., 2009; Wicki *et al*., 2020). 그 중 지하수(groundwater)는 강우, 토양수분, 유출 등 수문 순환을 구성하는 여러 인자 중 하나로, 공극수압(pore water pressure)의 변화에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히 지하수 과잉 양수(over-exploitation)은 지하수면의 급격한 하강으로 이어져 공극수압의 감소와 토양 압밀(compaction)을 야기하며, 이러한 압밀이 비가역적(irreversible)일 경우 지하수면은 양수 이전 수준을 회복할 수 없다(Pacheco-Martínez *et al*., 2013). 즉 지하수면의 변동은 토양 뼈대(soil skeleton)의 비가역적 변화로 이어질 수 있어 토양의 전단강도(shear strength)에 대한 직접적인 영향력을 지니므로, 지반 안정성의 변동성 파악에 있어 필수적이다(Prokešová *et al*., 2013).

이로 인해 지하수면 변동과 지반 변위 간 인과 관계를 규명하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다(Galloway and Hoffmann, 2007; Zamanirad *et al*., 2020; Ahmad *et al*., 2019). Mahmoodinasab and Mohseni (2021)은 지반 변위와 지하수면 변동을 시·공간적으로 분석하였으며, 양수정(pumping well)에 대한 거리에 따른 지반 침하속도 변동 결과를 토대로 두 인자의 관계성을 증명하였다. Han *et al*. (2021)은 지역적 특성에 따른 time lag을 토대로 지반 변위에 대한 수문 인자의 복합적인 효과를 나타내었고, Van Ty *et al*. (2021)은 지하수 과유출에 따른 지하수면의 변동과 지반침하를 연계해 인자의 유기적 관계성을 입증하였다. Ahmad *et al*. (2017)은 파키스탄 Quetta Valley 인근 지역의 지하수 개발에 따른 지반침하의 관계성과 토지피복별 지반침하의 유의미한 상관성을 입증한 바 있다.

이 같은 연구는 한반도에서도 수행된 바 있으나, 구조물 건설 및 시공을 위한 설계의 관점에서 이뤄진 연구가 대부분이다(Kim *et al*., 2015; Yoo and Kim, 2007). 즉 수문학적 관점에서 지반 변위와 지하수면 간 연관성을 파악하기 위한 연구나 타 수문 인자(강우, 토양수분 등)와의 융·복합적 활용을 통해 산사태를 예측 및 분석을 위한 연구는 현저히 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 연구지역의 환경적 특성을 반영해 지반 변위와 수문인자 간의 관계성을 규명하고자 하였다. 각 인자의 변동성이 지반 변위에 어떤 영향을 미치는지 파악하고, 환경적 특성에 따른 차이를 규명하고자 하였다.

2. 연구 지역 및 데이터

2.1 연구지역

본 연구에서는 총 2개의 연구지역을 사용하였다(Fig. 1). 도심지에서의 관계성 분석을 위해서는 서울특별시 강서구 마곡동에 위치한 서울-마곡(Seoul-Magok, SM) 지하수 관측소와 서울특별시 성북구 장위동에 위치한 서울-장위(Seoul-Jangwi, SJ) 지하수 관측소 자료를 활용하였으며, 산지에서의 분석을 위해서는 충청북도 괴산군 청천면 도원리에 위치한 괴산-청천(Goesan-Chungchun, GC) 지하수 관측소를 활용하였다. 서울시는 한반도 대표 도심 중 하나로, 비교적 고도가 낮고 평평한 지역으로 이루어져 있다. SM관측소가 위치한 강서구의 평균 기온은 약 14℃이며, 연간 약 900~1040 mm의 강수량을 동반한다. SJ 관측소가 위치한 성북구의 평균 기온은 약 13℃이며, 연간 약 1120~1250 mm의 강수량을 동반한다. 한편 괴산군은 소백산맥에 위치해 주변으로 다량의 식생이 분포해 있으며, 서울시에 비해 고도가 높고 편차가 존재함을 알 수 있다(Fig. 1). 평균 기온은 약 11.2~12.1℃ 로 서울에 비해 낮은 편이며, 연간 약 1106~1221 mm의 강우를 동반한다.

Table 1. Station information (http://www.gims.go.kr/)

Site name	Station No.	Groundwater elevation (EL.m)	Site location	
			Lat (°)	Lon (°)
Goesan-Chungchun	622075	160.66	36.67888	127.77805
Seoul-Jangwi	95502	22.33	37.61922	127.05410
Seoul-Magok	84001	9.866	37.57458	126.83892

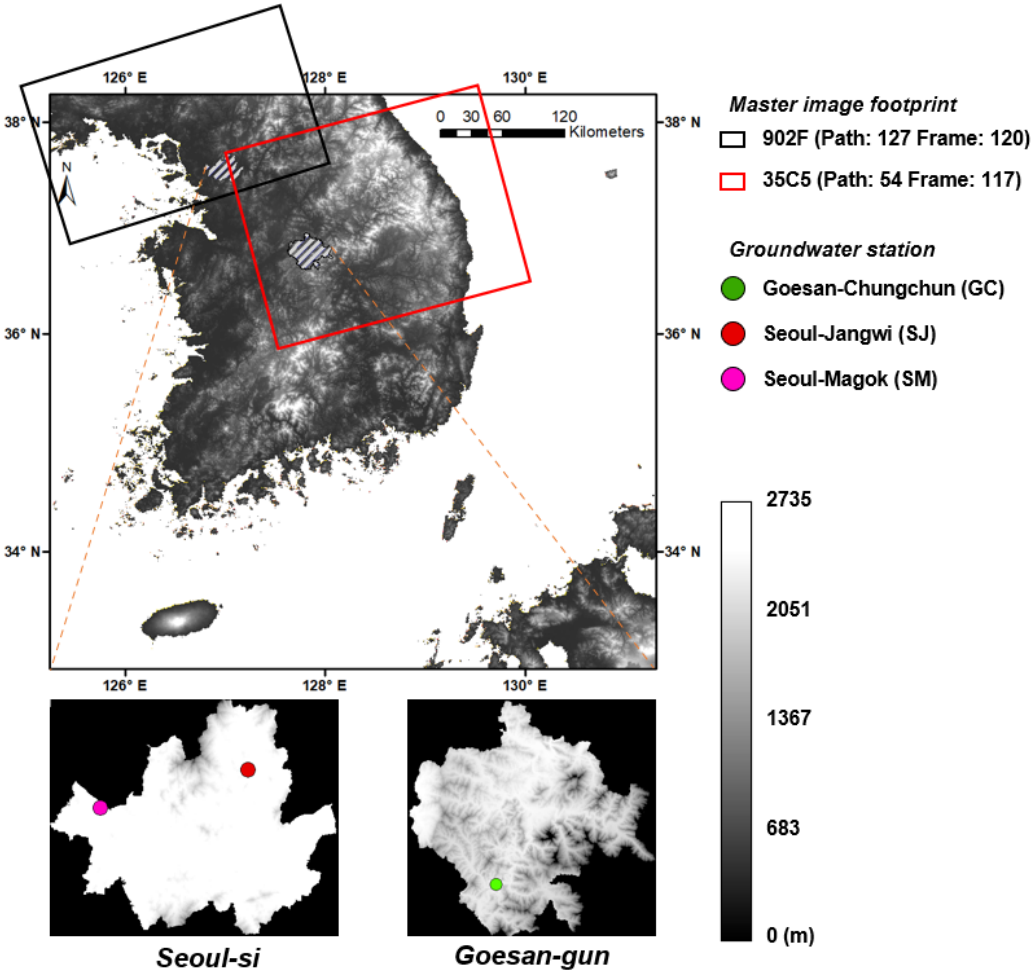

Fig. 1. Locations of groundwater stations and two master images for interferometry

2.2 연구자료

국가지하수정보센터(National Groundwater Information Center, NGIC)에서는 오픈 API (Application Programming Interface)를 기반으로 측정망 제원, 조사시설자료와 지하수 오염취약성도를 포함해 지하수와 관련된 다양한 자료를 제공 중이다(http://www.gims.go.kr/). 본 연구에서는 NGIC에서 제공하는 일 단위 지하수위 정보와 더불어 전지구강수관측위성(Global Precipitation Measurement, GPM) 위성 기반 강우와 Sentinel-1(S-1)에 탑재된 C-band (5.405 GHz) 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)를 활용하였다.

GPM은 2014년 2월 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)와 일본우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)에 의해 발사된 위성으로, 마이크로파 센서, 적외선 센서와 지상 관측기를 기반으로 고품질 강우자료를 생산하며, 한반도를 대상으로 그 적용성의 평가도 다수 이루어진바 있다(Baik *et al.*, 2016). 본 연구에서는 0.1° × 0.1°의 공간해상도를 지니는 일 단위 강수자료인 GPM_3IMERGDF 06을 사용하였다. 한편 S-1는 능동형 마이크로파 센서(active microwave sensor)이다. 획득 방식에 따라 4가지 모드(acquisition mode)가 존재하며, 그중 Interferometric Wide swath (IW) 모드는 ScanSAR 방식으로 영상을 획득한다. 6~12일, 5 m × 20 m의 시·공간해상도를 지니며 이중편파(dual polarization)를 지원한다. 자료는 처리 수준(processing level)에 따라 Level-0부터 -2로 제공되며, 그중 Single Look Complex (SLC) 자료는 진폭(amplitude)과 위상(phase)정보를 모두 포함한다. 본 연구에서는 IW 모드 기반 Single Look Complex (SLC)와 시간 단위(hourly) 지하수면 자료를 사용하였다. 연구기간은 2016년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 2년으로 설정하였으며, 해당 연구기간에 대해 총 58개의 SAR 영상(괴산: 25개, 서울 33개)을 사용하였다.

3. 연구방법

3.1 Differential InSAR (DInSAR)

Differential Interferometry SAR (DInSAR)는 서로 다른 영상 간 위상 차이(phase difference)를 사용해 지반 변위를 모의하는 기법이다(Eq. (1)).

$$\Phi_A = \frac{4\pi D_{S-T}}{\lambda} + \Phi_{shift} \approx \frac{4\pi D_{S-T}}{\lambda} \quad (1)$$

DS-T는 센서 위치(Sensor, S)로부터 지반(Target, T)까지의 거리를 의미하며, Φ_A는 거리 DS-T에 대해 시점 A에서의 위상값이다. Φ_{shift}는 센서와 타겟 간 상호작용 중 발생한 위상 변화(phase shift)로, 본 연구에서는 무시할만큼 작은 값으로 간주하였다. 즉 Φ_A는 DS-T에 따라 달라지므로, DInSAR는 지반의 상승 또는 하강으로 인한 위상차이($\triangle\Phi$)를 사용한다.

$$\triangle\Phi = \Phi_A - \Phi_B = \Phi_{dis} + \Phi_{\top o} + \Phi_{atm} + \Phi_{orb} + \Phi_{noise} + 2k\pi \quad (2)$$

A와 B는 시점 A와 B에서의 위상값을 나타낸다. Φ_{dis}는 지반 변위, Φ_{topo}는 지형, Φ_{atm}는 기상, Φ_{orb}는 궤도오차(orbital error)로 인한 위상값이며, Φ_{noise}는 위상 내 포함된 잡음(noise)를 나타낸다. 실제로 시점 A와 B 사이에는 지반 변위 외에도 지형, 기상조건 등 다른 인자로 인한 위상 변화가 발생할 수 있으므로, 이를 제거하기 위한 전처리 과정이 필수적이다.

3.2 Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR)

Persistent Scatterer Interferometry SAR (PSInSAR)는 다중 이미지를 사용해 구현한 DInSAR 기법으로, 지반 침하 속도나 변위량 등 시간에 따른 위상 변화 정보를 생산하는 데 활용할 수 있다. 시간에 따른 변화량이 적고 안정도가 높은 인공 구조물이나 지형지물을 고정 산란체(Persistent Scatterer, PS)라 부르며, 이러한 지점들을 기준으로 활용해 보다 정확한 모의결과 획득이 가능하다. 위상 정보를 지반 변위 정보로 변환하기 위해서는 일련의 전처리 및 보정(correction)과정이 필요하다(Fig. 2). 각 수행 단계에 대한 설명은 Table 2와 같다.

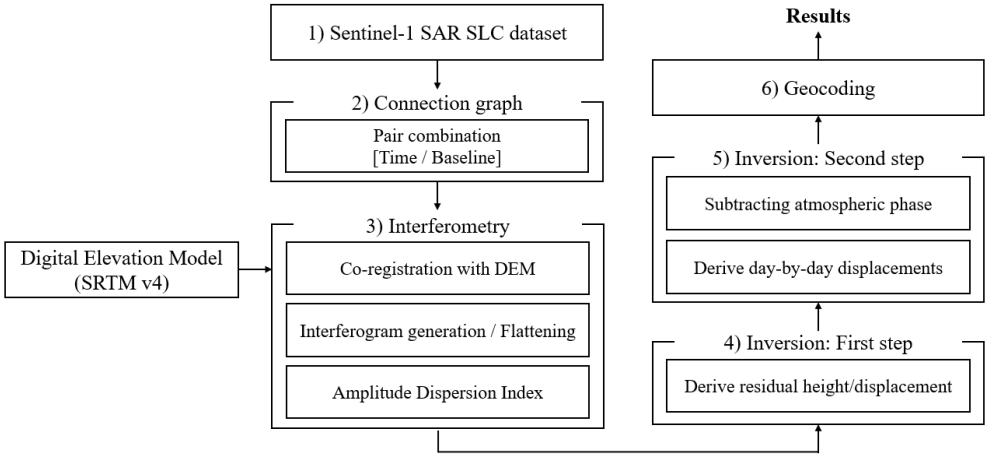

Fig. 2. Flowchart of persistent scatterer interferometry. SRTM DEM version 4 (90 m of spatial resolution) was used to extract the topographic phase components

Table 2. Brief explanation of each step in Fig. 2

No.	Explanation
1)	Acquisition of Sentinel-1 SLC data according to study period and area of interest
2)	1:1 correspondence between Master and Slave images for interferogram creation
3)	Creation Interferogram and intensity image
4)	Creation interferogram-based displacement, velocity, and height
5)	Derivation of quantitative land displacements for each image by removing topological information due to weather conditions
6)	Input the coordinates (latitude, longitude) for the acquired image

4. 결과 및 고찰

4.1 PSInSAR 기반 지반 변위 분석

Figs. 3(a) and 3(b)는 서울, 괴산 지역의 지반 변위를 나타낸다. 지반이 융기(uplift)된 경우 변위값이 양수로 나타나며, 침하된 경우 음수로 나타난다. 모의 결과의 품질 관리(Quality control)을 위해 긴밀도(coherence)에 0.75의 임계값을 적용하였으며, 모의 지점 분포를 통해 서울에 비해 괴산에서 임계값 미만인 지점이 상당한 것을 확인할 수 있다. 긴밀도는 획득된 이미지의 유사성(similarity)을 정량적으로 나타내는 지표로, 0과 1사이의 값으로 나타난다. 낮은 긴밀도를 갖는 지점은 위상에 오류를 야기할 수 있으며, 높은 값을 가질수록 이미지 간 상관성(correlation)이 높은 것으로 본다. 일반적으로 도심인 서울의 경우 빌딩을 포함한 구조물들이 다수 분포하며, 이들은 시간에 따른 변동(temporal decorrelation)이 적어 높은 긴밀도를 갖는다(Wang *et al.*, 2009). 반면 산지인 괴산은 경사가 불규칙적이며 다수의 식생이 분포하므로, 평지에 위치한 인공구조물에 비해 상대적으로 높은 가변성을 띠어 낮은 긴밀도를 갖는다. 가령 자연재해에 따른 지형 변화나 기후에 따른 식생 변화가 이러한 가변성의 원인이 될 수 있다(Jiang *et al.*, 2014). 괴산은 서울에 비해 상대적으로 높은 고도(Figs. 3(c) and 3(d))와 급한 경사도(Figs. 3(e) and 3(f))를 가지므로, 시간에 따른 변동이 여러 지점에서의 긴밀도 감소로 이어진 것으로 보인다.

서울은 지반 변위 분포가 다소 균일(homogeneous)하게 나타난다. 서울의 남동쪽 일대는 전체적으로 지반이 침하된 모습을 보이며, 한강에 인접한 지역은 침하폭이 다소 크게 나타난다. 해당 지역은 타 지역에 비해 도시화(urbanization)의 진행수준이 높은 지역으로, 사회기반시설(infrastructure) 구축 수준과 인구밀도가 높다. 강서구 일대 또한 20 mm 수준의 지반 침하가 발생한 것으로 나타나는데, 이는 주택개발사업으로 인해 다수의 공사현장이 조성된 지역이다. 지속적으로 진행되는 도시화는 지하수 사용량을 증가시킬 뿐 아니라 하방 압력(downward pressure)을 증가시켜 지반 침하를 야기할 수 있으므로(Chen *et al.*, 2012), 도시화가 진행 중인 여러 지점에서 지반 침하가 발생한 것으로 판단된다. 한편 개발제한구역 인근인 도봉구와 강북구 일대에서는 융기된 지점이 여럿 관찰된다. 해당 지역에 비해 지반이 모의되지 않은 지역의 고도가 높은 것으로 보아(Fig. 3(c)), 강우를 비롯한 기후의 영향으로 인해 유출된 토사가 누적된 것으로 보인다.

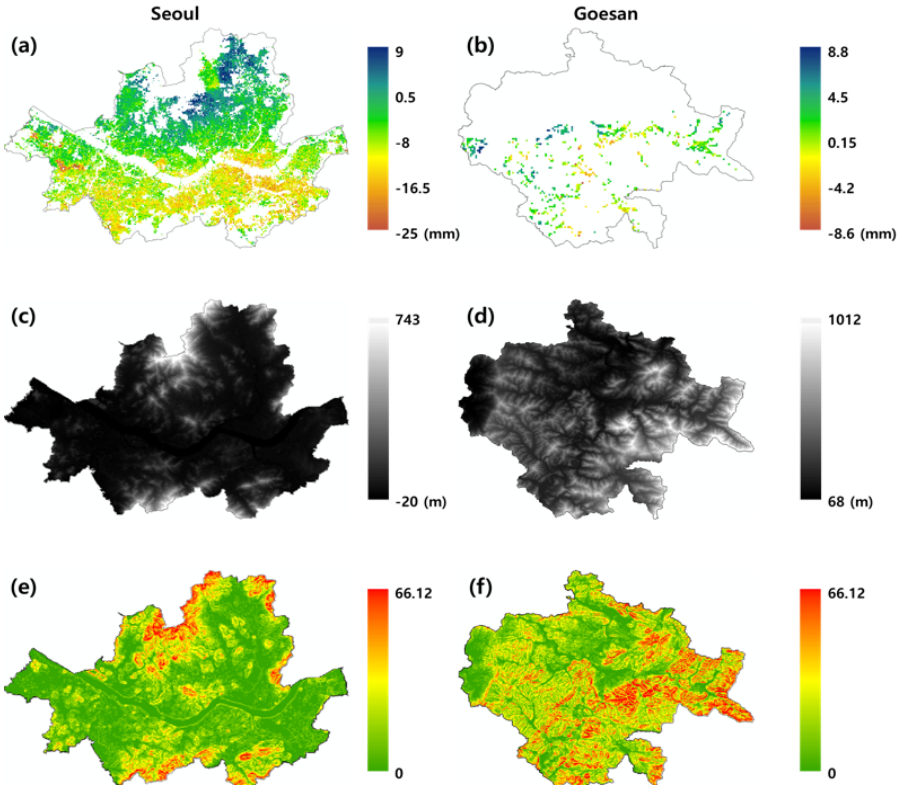

Fig. 3. Spatial characteristics of Seoul (first column) and Goesan (second column). ((a), (b): land subsidence derived from PSInSAR, (c), (d): the elevation from SRTM DEM, (e), (f): the slope)

괴산은 지반 변위 모의 지점이 불연속적으로 나타나므로, 공간 분포에 대한 분석이 제한된다. 모의된 변위의 최대, 최소가 각각 8.8 mm와 -8.6 mm이므로 서울에 비해 변동폭이 좁은 것처럼 보일 수 있으나, 2017년 7월 중순경 산사태 발생 이력이 있어 지반 모의결과가 나타나지 않은 지점에서 상당한 변동이 발생했을 것으로 예상된다.

4.2 지하수위와 지반 변위 간 상관성 분석

Fig. 4는 연구지역별 시계열 지하수위, 강우량, 그리고 지반 변위를 나타낸다. 강우량은 지하수위 측정 지점이 포함된 픽셀 값을 나타냈으며, 지반 변위는 지하수위 측정 지점에서 가장 가까운 지점의 모의 결과를 획득하였다. GC의 경우 약 120 m, SJ와 SM은 각각 7 m, 130 m 떨어진 지점의 지반 변위 결과를 나타내었다.

지하수위는 강우량에 따라 급격한 변동을 보인다. 2016년 7월 초순경 발생한 80 mm 이상의 강우에 대하여 세 연구지역 모두 급격한 지하수위의 상승이 나타나며, 2017년 7월부터 9월까지 발생한 빈도 높은 강우에 대응하는 지하수위 상승이 나타난다. 지점마다 지하수면(Groundwater table)과 지표면 간의 거리가 다르며, 지반 구성 및 조직(skeleton)의 차이로 인해 강우가 지하수면의 상승으로 반영되기까지 소요되는 시간에 있어서는 차이가 존재하지만, 도심과 산지 모두 강우의 발생이 지하수위의 상승을 야기한 것으로 판단된다.

2016년 11월 부근에서 지하수위의 급격한 감소가 나타나는

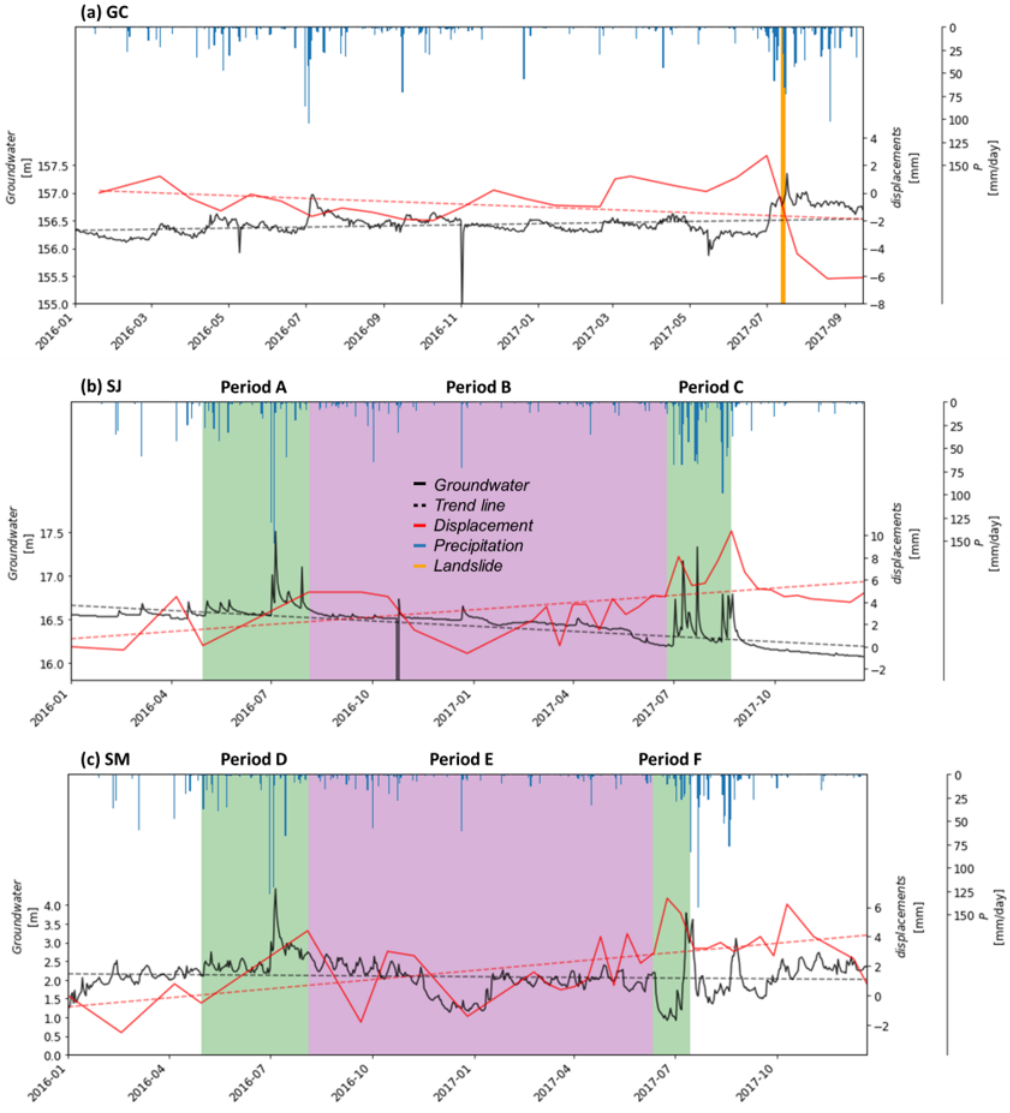

Fig. 4. Time series analysis of groundwater level, precipitation, and surface displacement. (a) Goesan-Chungchun, (b) Seoul-Jangwi, and (c) Seoul-Magok

구간은 지하수 점검을 위한 양수로 인해 발생한 것으로 보인다(Figs. 4(a) and 4(b)). 국가지하수관측망은 연간 약 2~3회의 시설물 점검을 수행 중이며, 이때 지하수 양수를 통한 시료 채취가 이루어진다. GC는 양수 이후 지반이 약 3 mm 융기되었으나 SJ는 양수 이후 지반이 약 4 mm 침하되었으므로, 양수에 따른 지반 변위는 관측 지점에 따라 다른 양상을 보인다. 지하수의 과잉 양수(over-exploitation)는 지반 침하의 대표적 원인 중 하나이나(Huang *et al*., 2012), 양수 이후 지하수위의 급격한 감소가 나타나지 않으므로 지반 변위 변동에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

산지인 GC의 경우 지하수위 경향선이 양의 기울기(3.865)를 가지며 지반 변위 경향선은 음의 기울기(-3.932)를 갖는데(Table 3), 이는 산사태의 발생이 큰 영향을 미친 것으로 보인다. 지하수위는 2016년 1월부터 2017년 6월까지 국지적인 상승과 하강이 나타나지만, 상승 경향성을 띤다고 보기는 어렵다. 지반 변위는 상승과 하강의 번갈아 나타나고, 산사태 발생 직전에는 2 mm 수준의 지반 변위가 나타나므로 최초 관측시점인 2016년 1월과 비교했을 때 지반이 융기된 것으로 보인다. 그러나 2017년 7월 초순부터 발생한 강우에 대해 지하수위가 156.5 m 수준에서 157.4 m까지 상승하며, 지반 변위는 2 mm 수준에서 -4 mm 수준까지 감소하였다. 고강도 강우가 지하수와 더불어 토양 포화도의 급격한 증가를 야기하였고 사면파괴로 이어진 것으로 보인다(Prokešová *et al*., 2013). 지하수면 근처의 사면이 파괴될 경우 보다 큰 지반 침하량이 발생할 것으로 추측된다. 본 연구지역에서 발생한 6 mm수준의 지반 침하는 지표 근처 토양 포화도의 증가로 표토층에서 토사유출이 발생한 것으로 판단된다.

도심인 SJ와 SM의 경우 지하수위 경향선이 음의 기울기(-7.585, -2.424)를 가지며 지반 변위 경향선은 양의 기울기(8.246, 7.813)를 갖는다(Table 3). GC와 마찬가지로 강우에 따른 지하수위의 급격한 상승이 나타나기는 하나, 강우 발생 빈도가 낮은 구간에서는 감소 경향성이 나타났다. SJ의 경우 2016년 8월경 16.5 m 수준이었던 지하수위는 2017년 6월경 16.2 m 수준까지 꾸준히 하강하였으며(Period B), SM 역시 상승과 반복 패턴이 반복적으로 나타나기는 하나 2.0 mm 수준이었던 지하수위가 1.5 mm 수준까지 하강하였다(Period E).

Table 3. Slope of trendline by site

Site	Slope of trendline	
	Groundwater	Displacement
GC	3.865	-3.932
SJ	-7.585	8.246
SM	-2.424	7.813

일반적으로 무강우 기간에는 침투량이 현저히 감소하므로, 유입 속도(inflow rate)에 비해 유출 속도(outflow rate)가 크게 나타난다(Hong and Wan, 2011). 특히 산업화로 인한 도심 지면의 불투수화는 침투능을 저하시키므로(Chithra *et al*., 2015), 유입량의 감소가 지속되어 지하수위의 하강경향이 나타난 것으로 판단된다.

반면 지반 변위는 지역에 따라 다른 관계성이 나타났다. 2016년 7월경 발생한 고강도 강우에 대해 SJ와 SM 모두 지반 변위가 증가했으므로(Period A, D), 지하수위의 상승이 지반 융기로 이어졌음을 알 수 있다. 2017년 7월경 발생한 고강도 강우에 대해 SJ는 지반 변위의 급격한 증가가 나타났으므로(Period C), 앞선 경우와 마찬가지로 지하수위의 상승에 따른 지반의 융기로 보인다. 지하수위의 상승은 지반에 작용하는 유효 응력(effective stress)을 감소시켜 토양 뼈대의 확장(expansion)으로 이어질 수 있으며, 두 지역모두 융기 이후 지반 변위가 원래 수준으로 회복된 것으로 보아 가역적 융기가 발생한 것으로 판단된다(Mahmoodinasab and Mohseni, 2021). 반면 SM의 지반 변위는 6 mm 수준에서 3.8 mm 수준까지 약 2.2 mm에 달하는 지반 침하가 발생한 것으로 나타났다(Period F). 이후 발생한 연속적 강우에 대해 지하수위는 급격한 상승과 하강을 반복하지만, 지반 변위가 이에 대응해 변화한다고 보기는 어렵다. 지하수위와 지반 변위 간의 관계성이 지역에 따라 상이하게 나타나는 이유는 지반 변위 모의 지점과 지하수위 측정 지점 간 거리가 원인일 수 있다. Chen *et al*. (2016)는 지하수 양수 지점에 가까울수록 지반 침하율이 높다는 연구결과를 밝혔으며, Van Asch *et al*. (2009)는 지반 침하를 측정하는 데 사용된 경사계(inclinometer)와 지하수위 측정에 사용되는 압압계(piezometer) 간 거리가 지반 침하 속도와 지하수위 변동 간 관계성에 영향을 줄 수 있음을 밝혔다. 지반 변위는 지하수위 외에도 활단층(active faults), 대수층 형태(aquifer types) 등 지반을 구성하는 지질적 인자와도 높은 상관성을 가지기 때문에, 지반 변위 측정 지점에 따라 상이한 결과가 나타날 수 있다.

본 연구에서는 강우의 발생에 따른 지하수위의 변동과 그로 인한 지반 변위의 거동을 분석하였다. 전반적으로 지하 수위와 지반 변위 간 관계성이 일관되게 나타나지 않았으며, 유사한 환경적 특성을 공유하는 것으로 가정되었던 도심에서도 상이한 결과가 나타났다. 이 같은 결과가 나타나는 이유는 지반 내에 존재하는 내적 불확실성과 지반에 작용하는 외적 불확실성 때문으로 보인다. 토층, 토성 등 지반 조건(ground condition)은 지역에 따라 비균질적인(heterogeneous) 특성을 보인다. 이러한 공간 변동성으로 인해, 서로 다른 지역에 같은 외부 자극이 발생한다고 가정하더라도 이에 대한 반응(유체 흐름 등)은 상이하게 나타날 수 있다(Elkateb *et al*., 2003).

따라서 연구지역의 지반 특성을 파악하는 데 소요되는 시간과 비용 문제를 차치하더라도, 외력의 작용에 따른 지질학적 반작용을 물리적으로 예측하는 일은 불가능에 가까울 수 있다(Hicks and Nuttall, 2012). 한편 Chen *et al*. (2012)는 인위적 영향(anthropogenic activities)이 도심에서의 지반 변위를 좌우한다고 보았다. 여러 요인(건설현장 조성, 도시 확장, 지하공사 등)이 지하수위로 인한 상·하방 압력보다 큰 외력을 발생시킬 수 있으므로, 지하수위의 변동보다 큰 영향인자로 작용할 수 있다는 결과를 제시하였다. 특히 인위적 영향은 앞서 언급한 지형적 인자와 달리 예측이나 정량화가 어려우며 검증이 제한되므로 실질적인 분석에 있어 인자로 활용하기 어려운 실정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지반 변위 분석에 있어 와 지하수위 간 관계성을 파악하고자 하였다. 시간에 따른 지반 변위를 정량적으로 획득하기 위해 PSInSAR 기법을 사용하였고, 도심과 산지가 갖는 환경적인 특성에 근거하여 모의 결과를 분석하였다. 이후 GPM 위성 기반 강우량와 지점 기반 지하수위 변동 자료를 일 단위로 획득하여 지반 변위와 함께 분석하였다.

강우 발생과 지하수위 상승이 도심과 산지에서 공통적으로 나타났으며, 도심의 경우 강우 발생 빈도가 적은 기간에서는 지하수위의 지속적인 하강이 나타났다. 따라서 고강도 강우는 지하수위의 상승 경향에 영향을 미치며, 무강우 및 저강우 기간의 지속은 지하수위의 하강 경향에 영향을 미친 것으로 판단된다. 지하수위 변동에 대해 지반 변위는 불규칙한 거동을 보였다. 산지의 경우 산사태 기간에서 약 6 mm 수준의 지반 침하가 발생했는데, 이는 지하수면 부근에서 사면 파괴가 발생했다기 보다는 지표면 근처 토사가 유출된 것으로 보인다. 한편 도심의 경우 지반 변위 거동이 상이하게 나타났다. SJ의 경우 지하수위 상승에 따른 토양 팽대 확장이 지반 변위의 증가를 야기한 것으로 판단된다. 반면 SM의 경우 지하수위 증가에 따른 지반 변위의 증가와 감소가 나타나는데, 이는 인위적 영향이 지하수위 변동으로 인한 영향보다 크게 나타난 것으로 추측된다.

산지의 경우 산사태 발생 기간을 제외하고는 지하수위와 지반 변위 간 뚜렷한 변동이 관찰되지 않았다. 반면 도심에서는 지하수위의 상승에 따라 지반 변위의 상승 및 감소가 나타났으며, 이는 환경적 특성과 인위적 영향이 지하수위 외의 변인으로 작용한 결과로 보인다. 따라서 지반 변위와 지하수위에 영향을 미치는 인자를 추가적으로 활용한다면 두 변수의 거동을 보다 면밀히 해석하는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 '자연재난 정책연계형 기술개발사업'의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS35-003).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Ahmad, W., Choi, M., Kim, S., and Kim, D. (2017). "Detection of land subsidence due to excessive groundwater use varying with different land cover types in Quetta valley, Pakistan using ESA-sentinel satellite data." *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 40, No. 24, pp.9572-9603.

Ahmad, W., Choi, M., Kim, S., and Kim, D. (2019). "Detection of land subsidence and its relationship with land cover types using ESA Sentinel satellite data: a case study of Quetta Valley, Pakistan." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 40, No. 24, pp. 9572-9603.

Baik, J., Park, J., Ryu, D., and Choi, M. (2016). "Geospatial blending to improve spatial mapping of precipitation with high spatial resolution by merging satellite-based and ground-based data." *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 16, pp. 2789-2803.

Chen, F., Lin, H., Zhang, Y. and Lu, Z. (2012). "Ground subsidence geo-hazards induced by rapid urbanization: Implications from InSAR observation and geological analysis." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 12, No. 4, pp. 935-942.

Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., and Gong, X. (2016). "Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry." *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 6, 468.

Chithra, S., Nair, M.H., Amarnath, A. and Anjana, N. (2015). "Impacts of impervious surfaces on the environment." *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol. 4, No. 5, pp. 27-31.

Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P.K. (2003). "An overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problems." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-15.

Galloway, D.L., and Hoffmann, J. (2007). "The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology." *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 133-154.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, No. 3, pp. 239-267.

Han, H., Shi, B., and Zhang, L. (2021). "Prediction of landslide sharp increase displacement by SVM with considering hysteresis of groundwater change." *Engineering Geology*, Vol. 280, 105876.

Hicks, M.A., and Nuttall, J.D. (2012). "Year influence of soil heterogeneity on geotechnical performance and uncertainty: A Stochastic View on EC7." *Proceedings 10th International Probabilistic Workshop*, IPW, Universität Stuttgart, Stuttgart, pp. 215-227.

Hong, Y.-M., and Wan, S. (2011). "Forecasting groundwater level fluctuations for rainfall-induced landslide." *Natural Hazards*, Vol. 57, No. 2, pp. 167-184.

Huang, B., Shu, L., and Yang, Y. (2012). "Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling." *Water Resources Management*, Vol. 26, No. 14, pp. 4225-4239.

Jiang, M., Ding, X., Li, Z., Tian, X., Wang, C., and Zhu, W. (2014). "InSAR coherence estimation for small data sets and its impact on temporal decorrelation extraction." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 10, pp. 6584-6596.

Kim, K., Park, J., Baik, J., and Choi, M. (2017). "Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far-East Asia." *Atmospheric Research*, Vol. 187, pp. 95-105.

Kim, Y.H., Eum, K.Y., Han, S.J., Park, Y.G., and Jung, J.H. (2015). "A study on settlement characteristics of earthwork subgrade with lowering the groundwater in high-speed railway." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 67-74.

Kitutu, M., Muwanga, A., Poesen, J., and Deckers, J.A. (2009). "Influence of soil properties on landslide occurrences in Bududa district, Eastern Uganda." *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 4, No. 7, pp. 611-620.

Mahmoodinasab, F., and Mohseni, N. (2021). "A spatiotemporal analysis of the relationship between groundwater level and ground surface displacement using Sentinel-1 SAR data." *Arabian Journal of Geosciences*,Vol. 14, No. 12, pp. 1-10.

Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T.J., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J.Á., Zermeño-De-Leon, M.E., and Solís-Pinto, A. (2013). "Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México." *Engineering Geology*, Vol. 164, pp. 172-186.

Prokešová, R., Medveďová, A., Tábořík, P., and Snopková, Z. (2013). "Towards hydrological triggering mechanisms of large deep-seated landslides." *Landslides*, Vol. 10, No. 3, pp. 239-254.

Segoni, S., Piciullo, L., and Gariano, S.L. (2018). "A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence." *Landslides*, Vol. 15, No, 8, pp. 1483-1501.

Van Asch, T.W., Malet, J.-P., and Bogaard, T. (2009). "The effect of groundwater fluctuations on the velocity pattern of slow-moving landslides." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, No. 3, pp. 739-749.

Van Ty, T., Minh, H.V.T., Avtar, R., Kumar, P., Van Hiep, H., and Kurasaki, M. (2021). "Spatiotemporal variations in groundwater levels and the impact on land subsidence in CanTho, Vietnam." *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 15, 100680.

Wang, T., Liao, M., and Perissin, D. (2009). "InSAR coherence-decomposition analysis." I*EEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 7, No. 1, pp. 156-160.

Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S.I., Waldner, P., and Stähli, M. (2020). "Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning." *Landslides*, Vol. 17, No. 8, pp. 1881-1896.

Yin, G., Baik, J., and Park, J. (2022). "Comprehensive analysis of GEO- KOMPSAT-2A and FengYun satellite-based precipitation estimates across Northeast Asia." *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 59, No. 1, pp. 782-800.

Yoo, C.S., and Kim, S.B. (2007). "A study on ground surface settlement due to groundwater drawdown during tunnelling." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 4, pp. 361-375.

Zamanirad, M., Sarraf, A., Sedghi, H., Saremi, A., and Rezaee, P. (2020). "Modeling the influence of groundwater exploitation on land subsidence susceptibility using machine learning algorithms." *Natural Resources Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 1127-1141.

Zhang, W., Furtado, K., Wu, P., Zhou, T., Chadwick, R., Marzin, C., Rostron, J., and Sexton, D. (2021). "Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world." *Science Advances*, Vol. 7, No. 31, eabf8021.