

지속 가능한 수자원 관리를 위한 지표수-지하수 연계이용 최적화

Optimization of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater for Sustainable Water Resources Management



서승범
서울대학교 공학연구원
sbseo07@snu.ac.kr



김영오
서울대학교 건설환경공학부 교수
yokim05@snu.ac.kr

이 증가하게 된 것이다. 2017년에 평년보다 많은 강수가 내려서 잠시 감소했던 지반침하율은 우기가 지나면서 가뭄 직후의 지반침하율로 빠르게 증가되었다(Murray and Lohman 2018). 가뭄이 다시 발생하지 않았고 과도한 지하수 양수를 하지 않았음에도 지반침하율은 예전 자연상태로 회복되지 못하고 가뭄 후 심각했던 상태로 되돌아간 것이다. 용수철에 과도한 힘을 주어 당기면 탄성을 잃어 원상태로 돌아가지 않는 것처럼, 앞서 살펴본 사례는 과도한 수자원(지하수) 사용이 수자원 시스템의 자연회복력(resilience)을 상실하게 만든 하나의 사례라 할 수 있다.

지하수는 지구상에 존재하는 값진 부존자원 중 하나이다. 자연상태의 지하수량과 수질에 영향을 주지 않는 선에서 적절히 사용된다면 단기간에 적은 비용으로 가뭄지역에 용수 공급을 할 수 있다는 측면에서 그 효용성이 높다. 지표수와 지하수는 서로 연결된 자원으로서 수문순환을 통해 지표수-지하수 상호작용(surface water and groundwater interaction)이 연속적으로 이루어진다. 계절에 따른 변동성이 큰 하천수와 달리 지하수는 증발손실이 적고 계절에 따른 변동성도 크지 않아서 안정적인 운영이 가능하다. 또한, 지하수는 석유나 광물자원처럼 재생 불가능한 자원이 아니며 빗물이나 지표수의 유입을 통해 지속적으로 함양(recharge)된다. 하지만, 지하수 함양은

1. 개요

2011년 말부터 2014년까지 이어진 미국 캘리포니아 지역의 장기 가뭄은 관측 이래 최악의 가뭄사상으로 기록되었다. 이 기간 동안 캘리포니아 지역의 농장에선 과도한 지하수 양수를 통해 부족해진 관개용수를 충족시켰으며, 이로 인해 해당 지역의 심각한 지반침하(subsidence)가 초래되었다. 아래 그림 1은 위성을 통해 관측한 캘리포니아 센트럴밸리(Central Valley) 남부지역의 2015-2016년 간 지반침하율(subsidence rates)이다. 실제로 이 지역은 지하수 사용에 따른 지반침하의 위험성이 있는 지역임에도 불구하고 수 년간 지속된 가뭄기간 동안 진행된 과잉 양수로 인해 지반침하율

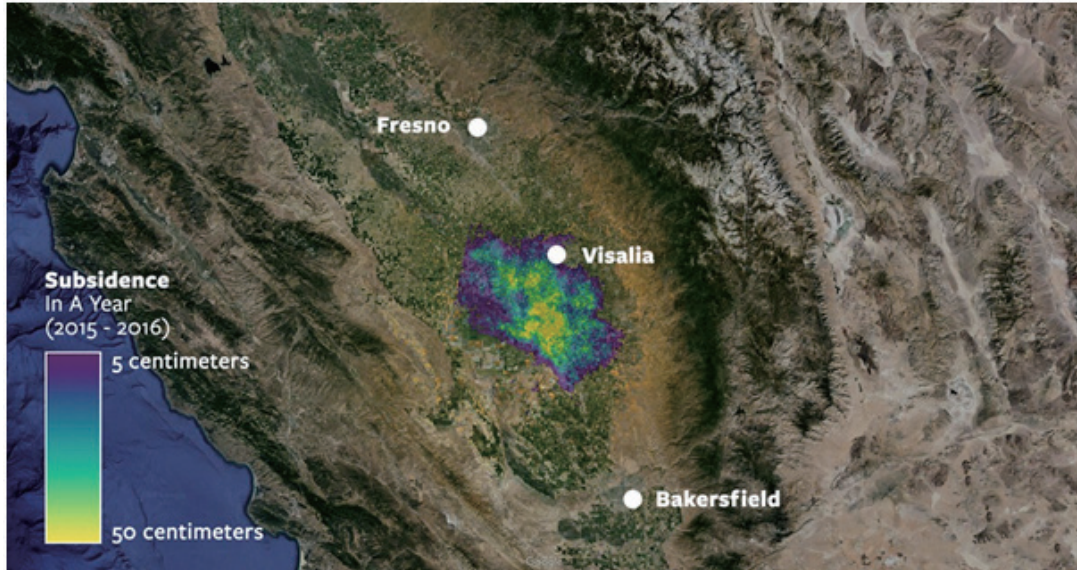


그림 1. 캘리포니아의 센트럴밸리(Central Valley) 남부지역의 연 평균 지반침하량(retrieved from <http://news.comell.edu/stories/2018/08/groundwater-loss-prompts-more-california-land-sinking>)

느리게 진행되므로 과도한 양수가 지속될 경우 대수층(aquifer)이 쉽게 고갈될 위험이 있다. 따라서 지하수량의 지속적인 유지를 위해서는 지표수-지하수 상호작용에 대한 정확한 이해를 바탕으로 최적의 지표수-지하수 연계이용(conjunctive use of surface water and groundwater) 방안을 마련하기 위한 연구가 필요하다.

지표수-지하수 연계 모델링

수자원 계획에 있어서 지표수-지하수 상호작용에 대한 이해의 중요성은 2000년대부터 제기되어 왔다. 이용석(2004)은 지하수 지속성(groundwater sustainability)을 위해 지표수-지하수 상호작용에 대한 조사가 면밀히 이루어져야 한다고 강조했다. 정일문과 김남원(2009)은 지표수-지하수 상호작용의 중요성을 강조하고 다양한 국내의 지표수-지하수 연계모형 개발 사례를 통해 국내에서의 활용방안에 대하여 논하였다. 지표

수-지하수 연계 모델링 연구가 중요한 이유는 지표수-지하수 상호작용을 기반으로 물수지 분석과 장단기 유출해석 등이 가능하며 지하수 양수가 수문순환 및 지표수에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가가 가능해지기 때문이다.

지표수와 지하수의 상호작용을 해석할 수 있는 연계모형 개발의 국내 사례로는 SIRG 통합모형(유동훈 등 2001), SWAT-MODFLOW 모형(김남원 등 2004a; 김남원 등 2004b; Kim et al., 2008), TANK_GS 모형(이우석 등 2010), K-DRUM-MODFLOW 모형(박구영 등 2017) 등이 있다. 위 연계모형 중 SWAT-MODFLOW 모형(그림 2)의 경우 현재까지 여러 국내 유역에 꾸준히 적용되고 있다(김남원과 정일문 2010; 김남원 등 2013; 이정우 등 2015; 정일문 등 2017; 정일문 등 2018). 위 사례 연구들을 통해 SWAT-MODFLOW 모형이 지표수-지하수 상호작용 과정의 시공간적 변동성을 잘 모의하며 지하수 양수가 하천유출량에 미치는 영향을 정량적으로 평가

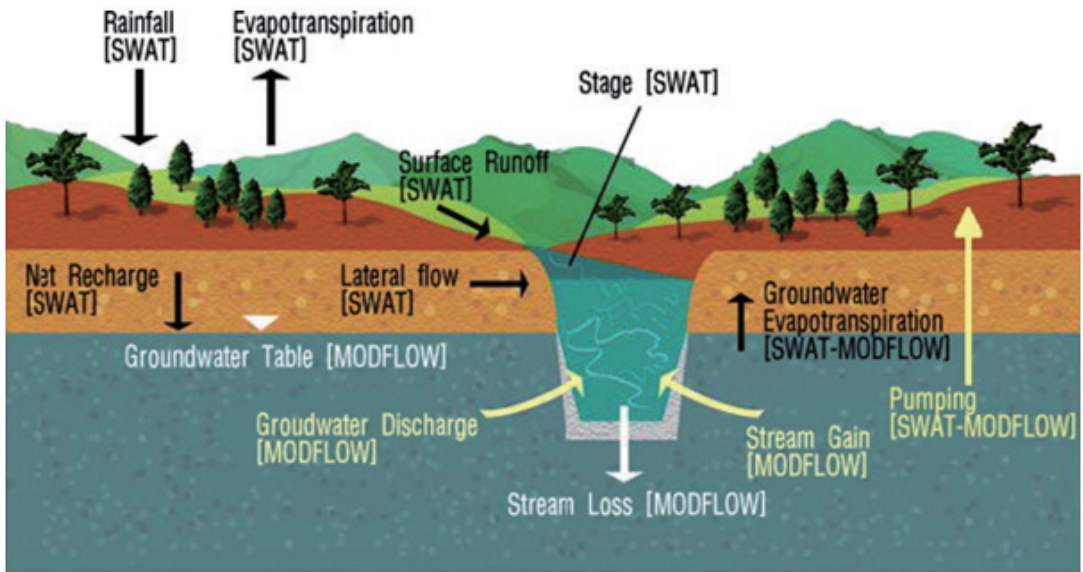
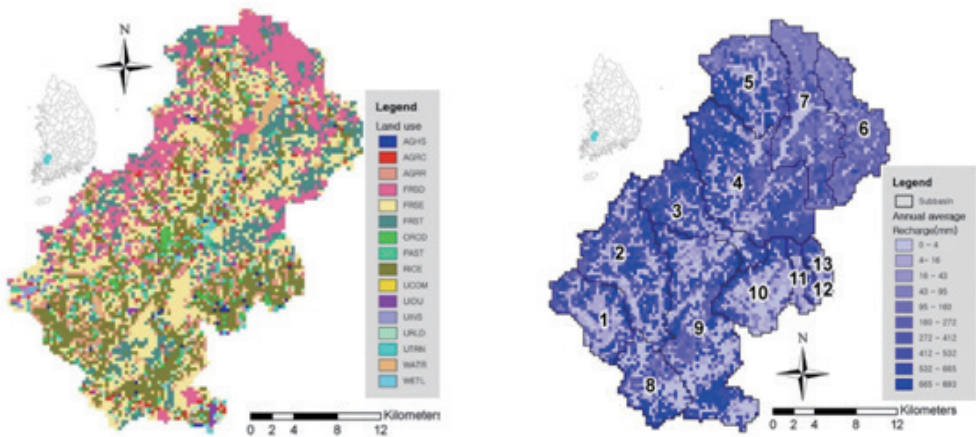


그림 2. SWAT-MODFLOW 모형의 지표수-지하수 상호작용 모식도(Kim et al. 2008)



장성지역의 토지 이용도(입력자료)

장성지역의 연평균 지하수 함양도(출력자료)

그림 3. SWAT-MODFLOW 모형의 토지 이용 입력자료와 지하수 함양 출력자료 예시(정일문 등 2018)

할 수 있음을 보여주었다. 실제로 공간적으로 이질적인(heterogeneous) 유역 인자들인 경사도, 토지피복/이용도, 토양성분도 등에 따라 지하수 함양의 공간적 변동성을 모의할 수 있다(그림 3).

우리나라는 지하수관리기본계획(국토해양부

2012) 수립 이후에 지하수 관측망이 지속적으로 확대 설치되고 있지만 여전히 그 수가 부족하고 자료기한이 짧아 지하수위 및 기저유출량 모의에 대한 시공간적 검증이 어렵다. 그럼에도 불구하고, 국내 실정에 맞는 지표수-지하수 통합모형의

개발 및 사례 연구들을 통해 향후 지표수-지하수 연계이용 최적화 등 다양한 후속 연구들의 기반을 마련하였다는 점에 큰 의미가 있다.

연계이용 최적화

국외에서는 다양한 지표수-지하수 통합모형과 광범위한 지하수 자료의 구축 및 활용을 통해 지표수-지하수 연계이용을 최적화하는 연구들이 활발히 수행되고 있다. 지표수-지하수 통합모형 모의가 ‘what if’에 대한 답을 주는 것이라면, 지표수-지하수 연계이용 최적화는 ‘what is the best’에 대한 답을 찾는 것이다. 지표수-지하수 연계이용 최적화의 궁극적인 목표는 지표수(저수지, 하천수 등) 취수량과 지하수(대수층) 양수량의 적절한 배분을 통해 물 공급의 효율을 극대화 하는 것이다. 즉, 가뭄 시 최적의 지하수 양수 운영을 통해 하천수의 고갈(depletion)은 최소화 하면서 물 공급 안정도를 극대화 할 수 있게 된다.

지표수-지하수 연계이용 최적화 연구에는 모의-최적화(Simulation-Optimization, S-O) 방법이 널리 적용되고 있으며 많은 연구 사례들이 있다(Mantoglou et al, 2004; Rao et al, 2004; Katsifarakis and Petala 2006; Safavi et al, 2010; Zekri et al, 2015; Giacomoni and

Joseph 2017; Shourian et al, 2017; Zhang et al, 2017; Seo et al, 2018a). S-O 모형의 기본 개념은 모의(simulation) 모형과 최적화(optimization) 알고리즘을 연계하여 수자원 계획 최적화 모형을 구축하는 것이다. 즉, S-O 모형이라는 틀 안에 모의 모형과 최적화 알고리즘을 결합하는 것이며, 여기서 모의 모형(지표수-지하수 통합모형)의 역할은 유역 내 지표수-지하수 상호작용을 포함한 모든 수문순환을 모의하는 것이고 최적화 알고리즘의 역할은 최적의 지표수-지하수 연계이용에 대한 해(solution)를 찾는 것이다.

적용하는 수문모형이 개념형(conceptual/lumped) 모형인 경우, 지속되는 컴퓨터 성능의 발전으로 인해 수문모형이 최적화 알고리즘 내에 직접 결합되어 상당히 큰 수의 반복 모의를 시행해도 소요시간에 대한 부담이 적을 수 있다. 하지만 장시간의 모의시간이 소요되는 분포형(distributed) 통합모형의 경우엔 최적해를 찾는 데 매우 긴 시간이 소요될 수 있다. 이러한 경우, 모의 모형과 최적화 알고리즘의 직접적 결합보다는 반응 행렬(response matrix) 기법(Maddock 1972; Dreizin and Haimes 1977)을 통해 지표수-지하수 상호작용을 최적화 알고리즘에 연결시킬 수 있다. 반응 행렬의 각 요소별 값은 반응 함수로서 산정이 되며, 반응 함수는 유역 내 특정 위

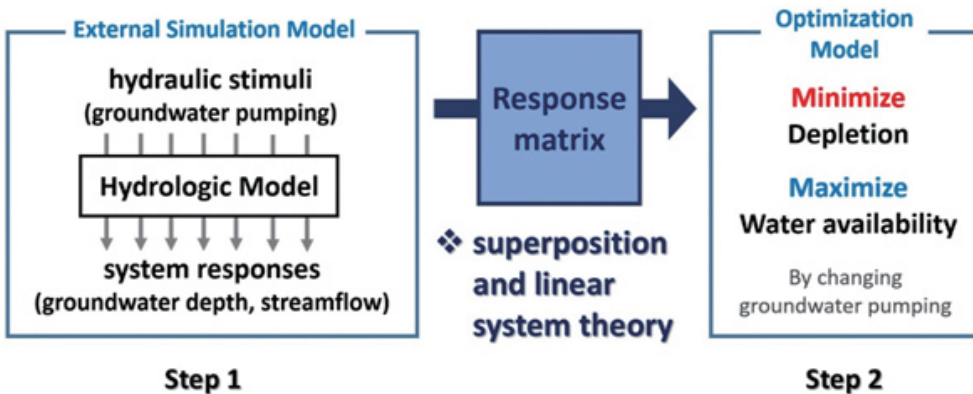


그림 4. 반응 행렬 기법을 통한 지표수-지하수 연계이용 최적화 S-O 모형 개념도

치(대수층)에서의 단위 양수(unit pumping)가 유역 내 특정 위치(대수층 또는 하천수)에 미치는 영향(impact)을 나타낸다(Cosgrove and Johnson 2004). 그림 4는 반응 행렬 기법을 사용하는 S-O 모형의 개념도이다. S-O 모형과 반응 행렬 기법의 이론에 대한 자세한 설명은 지면 관계상 생략하며 관련 문헌을 참조하기 바란다.

최근 사례로 Seo et al. (2018a)은 PIHM (Penn-state Integrated Hydrologic Model)이라는 분포형 지표수-지하수 통합모형(Qu and Duffy 2007; Kumar 2009)을 반응 행렬 기법을 통해 최적화 알고리즘에 연계한 후 미국 노스캐롤라이나주 호(Haw)강 유역의 하천수 취수량과 지하수 양수량 연계이용 최적화 연구를 수행하였다. 지표수-지하수 통합모형을 사용하여 지하수 취수에 따른 하천수와 지하수 저수량의 고갈량을 동시에 산정하고, 저수지의 고갈을 최소화하기 위한 최적의 지표수-지하수 연계 운영률을 결정하기 위해 저수지모형을 최적화 모형에 추가로 결합하였다. 또한, 지속 가능한 지하수 취수에 대한 제약 조건, 즉 지하수 저수량의 회복 기간(Seo et al.

2018b)에 대한 제약 조건이 S-O 모형에 새롭게 제안되었다. 따라서, 지하수 저수량의 회복 기간 제약 조건을 통해 의사 결정자는 가뭄 중에 지하수 사용의 지속 가능성을 유지하는 것과 물의 가용성을 극대화하는 것과의 상충관계(trade-off)을 파악할 수 있게 된다. 그림 5는 지표수-지하수 연계이용 최적화 연구를 통해 “지하수 지속성 증대(지하수량 회복 시간 감소)”와 “수자원 가용성 최대화(저수지 고갈량 최소화)” 사이의 상충관계를 산정하여 도시한 예이다.

맺으며

우리나라의 수자원 이용은 여전히 대부분 지표수에 의존하고 있으므로 장기적인 대체 수원으로 서 지하수를 통합적으로 관리하고 지역적으로는 지표수와의 효율적인 연계 이용을 통해 가뭄 시 안정적인 물 공급을 할 수 있는 관련 계획 및 관리체계가 확립될 필요가 있다. 공학자의 입장에서는 지표수-지하수 상호작용에 대한 정확한 이해를 바탕으로 최적의 지표수-지하수 연계 이용에

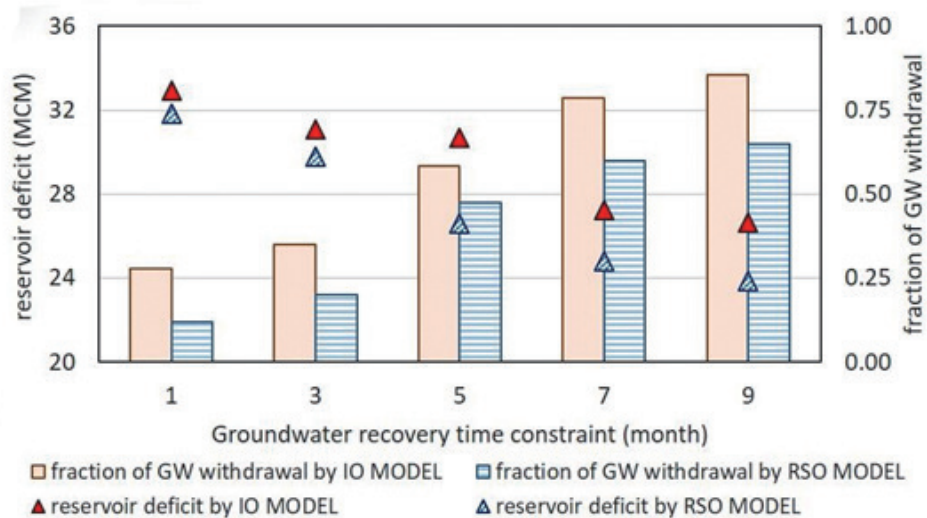


그림 5. 지하수 지속성과 수자원 가용성 극대화의 상충관계 도출 예시(Seo et al. 2018)

대한 여러 대안들을 마련하고 제안할 필요가 있다. 국내에서도 이미 다양한 사례연구를 통해 지표수-지하수 연계 이용에 대한 기술적 접근 및 개선이 이루어지고 있다. 향후 최적의 지표수-지하

수 연계 이용에 대한 연구 개발을 통해 지속 가능한 수자원 정책에 이바지 하는 것이 우리 공학자들의 몫이라 할 수 있다.



참고문헌

국토해양부 (2012). 지하수관리기본계획(2012-2021), 국토해양부

김남원, 이정우, 정일문, 이민호 (2013). 지하수 이용과 농업용 저수지가 하천유량에 미치는 복합 영향, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 46(7): 719-733.

김남원, 정일문 (2010). 지표수-지하수 통합해석모형 SWAT-MODFLOW의 적용, 물과미래, 한국수자원학회, 43(7): 20-24.

김남원, 정일문, 원유승 (2004a). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 37(6): 499-507.

김남원, 정일문, 원유승 (2004b). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 37(6): 509-515.

박구영, 허영택, 박진혁, 장수형, 김병우 (2017). 남강댐 유역 대상 지표수-지하수 연계 강우유출모형 시험적용, 대한토목학회 학술대회, 303-304.

유동훈, 오운창, 박창근 (2001). 지표수-지하수의 연계 수치모형, 대한토목학회논문집 B, 대한토목학회, 21(4B): 327-334.

이우석, 정은성, 김상욱, 이길성 (2010). 지표수-지하수 상호흐름을 고려한 TANK_GS 모형의 개발, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 43(10): 893-909.

이응석 (2004). 지하수 지속성과 지하수-지표수 상호작용, 지질학회지, 대한지질학회, 40(3): 361-368.

이정우, 김남원, 정일문, 차준호 (2015). 죽산천 주변 암반층 지하수 양수로 인한 하천수 감소 영향 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 48(9): 769-779.

정일문, 김남원 (2009). 지표수-지하수 상호작용의 사례 및 활용방안, 물과미래, 한국수자원학회, 42(11): 10-18.

정일문, 김남원, 이정우, 장선우 (2017). 하천유량에 기여하는 지하수 양수량의 물공급 능력 평가, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 50(12): 889-896.

정일문, 박승혁, 이정은, 김민규 (2018). 통합수문모형을 이용한 장성지역의 분포형 지하수 함양량 추정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 38(8): 517-526.

Dreizin, Y.C., and Haimes, Y.Y. (1977). A hierarchy of response functions for groundwater management, Water Resour Res, 13(1): 78 - 86.

Giacomoni, M.H., and Joseph, J. (2017). Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact

development in the catchment scale. *J Water Res Plann Manage.* 2(9): 1–15.

Katsifarakis, K.L., and Petala, Z. (2006). Combining genetic algorithms and boundary elements to optimize coastal aquifers' management. *J Hydrol.* 327(1–2): 200–207.

Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *J Hydrol.* 356: 1–16.

Kumar, M. (2009). Toward a hydrologic modeling system. Ph.D. thesis, Pennsylvania State Univ.

Maddock, T. (1972). Algebraic technological function from a simulation model. *Water Resour Res.* 8(1): 129–134.

Mantoglou, A., Papantoniou, M., and Giannouloupoulos, P. (2004). Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms. *J Hydrol.* 297(1–4): 209–228.

Murray, K.D., and Lohman, R.B. (2018). Short-lived pause in Central California subsidence after heavy winter precipitation of 2017. *Science Advances*, 4(8), eaar8144

Qu, Y., and Duffy, C.J. (2007). A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation. *Water Resour Res.* 43 (8): W08419.

Rao, S.V.N., Bhallamudi, S.M., Thandaveswara, B.S., and Mishra, G.C. (2004). Conjunctive use of surface and groundwater for coastal and deltaic systems. *J Water Res Plann Manage.* 130(3): 255–267.

Safavi, H.R., Darzi, F., and Marino, M.A. (2010). Simulation–optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater.” *Water Resour Manage.* 24(10): 1965–1988.

Seo, S.B., Mahinthakumar, G., Sankarasubramanian, A., and Kumar, M. (2018a). Conjunctive Management of Surface Water and Groundwater Resources under Drought Conditions Using a Fully Coupled Hydrological Model. *J Water Res Plann Manage.* 144(9), 04018060.

Seo, S.B., Mahinthakumar, G., Sankarasubramanian, A., and Kumar, M. (2018b). Assessing the restoration time of surface water and groundwater systems under groundwater pumping. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 32(9): 2741–2759.

Shourian, M., Raoufi, Y., and Attari, J. (2017). Interbasin water transfer capacity design by two approaches of simulation–optimization and multicriteria decision making. *J Water Res Plann Manage.* 143(9): 1–12.

Zekri, S., Triki, C., Al-Maktoumi, A., and Bazargan–Lari, M.R. (2015). An optimization–simulation approach for groundwater abstraction under recharge uncertainty. *Water Resour Manage.* 29(10): 3681–3695.

Zhang, C., Xu, B., Li, Y., and Fu, G. (2017). Exploring the relationships among reliability, resilience, and vulnerability of water supply using many-objective analysis. *J Water Res Plann Manage.* 143(8): 4017044.