



The effect of external influence and operational management level on urban water system from water-energy nexus perspective

Choi, Seo Hyung^a · Shin, Bongwoo^b · Song, Youngseok^c · Kim, Dongkyun^{d,e} · Shin, Eunher^{f,*}

^aSenior Programme Specialist, Research and Development Team, UNESCO i-WSSM, Hwaseong, Korea

^bDirector, UNESCO i-WSSM, Hwaseong, Korea

^cSenior Programme Specialist, Research and Development Team, UNESCO i-WSSM, Hwaseong, Korea

^dManager, Research and Development Team, UNESCO i-WSSM, Hwaseong, Korea

^eSenior Research Scientist, Water Resources & Environmental Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

^fPrincipal Researcher, Water & Wastewater Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

Paper number: 23-040

Received: 1 August 2023; Revised: 30 August 2023; Accepted: 11 September 2023

Abstract

Due to climate change, population growth, and economic development, the demand for water in the urban water system (UWS) and the energy required for water use constantly increase. Therefore, beyond the traditional method of considering only the water sector, the Nexus approach, which considers synergies and trade-offs between the water and energy sectors, has begun to draw attention. In previous researches, the Nexus methodology was used to demonstrate that the UWS is an energy-intensive system, analyze the water-energy efficiency relationship surrogated by energy intensity, and identify climate (long-term climate change, drought, type), geographic characteristics (topography, flat ratio, location), system characteristics (total supply water amount, population density, pipeline length), and operational management level (water network pressure, leakage rate, water saving) effects on the UWS. Through this, it was possible to suggest the direction of policies and institutions to UWS managers. However, there was a limit to establishing and implementing specific action plans. This study built the energy intensity matrix of the UWS, quantified the impact of city conditions, external influences, and operational management levels on the UWS using the water-energy Nexus model, and introduced water-energy efficiency criteria. With this, UWS managers will be able to derive strategies and action plans for efficient operation management of the UWS and evaluate suitability and validity after implementation.

Keywords: Urban water system (UWS), Water-energy nexus, Energy intensity, System dynamics

물-에너지 넥서스 관점에서 외부영향과 운영관리 수준이 도시물순환시스템에 미치는 영향

최서형^a · 신봉우^b · 송영석^c · 김동균^{d,e} · 신은허^{f,*}

^a유네스코 물 안보 및 지속가능 물 관리 국제연구교육센터 연구개발팀 선임전문관, ^b유네스코 물 안보 및 지속가능 물 관리 국제연구교육센터 센터장, ^c유네스코 물 안보 및 지속가능 물 관리 국제연구교육센터 연구개발팀 선임전문관, ^d유네스코 물 안보 및 지속가능 물 관리 국제연구교육센터 연구개발팀 팀장, ^eK-water 연구원 수자원환경연구소 선임연구원, ^fK-water 연구원 상하수도연구소 책임위원

요 지

기후변화, 인구증가 및 경제발전으로 도시물순환시스템 내 용수 수요량과 물 이용에 필요한 에너지는 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 도시물순환시스템을 효율적으로 관리하기 위해 물 부문만을 고려하는 전통적인 방식을 벗어나 물과 에너지 부문 간 상승효과와 상충관계를 고려하는 넥서스 접근법이 주목받기 시작하였다. 이러한 넥서스 방법론을 적용하여 도시물순환시스템이 에너지 집약적인 시스템을 증명하고, 에너지 원단위로 표현되는 물-에너지 효율 관계를 분석하며, 기후(장기 기후변동, 가뭄, 유형), 지리적 특징(표고차, 평지비, 위치), 시스템 특징(총급수량, 인구, 인구밀도, 관로연장) 및 운영관리 현황(상수관망 수압, 누수율, 물절약)이 미치는 영향을 규명하고자 하는 연구들이 수행되어왔다. 그러나 이를 통해 도시물순환시스템 관리자에게 정책 및 제도의 방향을 제시할 수 있으나 구체적인 정책을 수립하고 시행하는 데 한계가 있었다. 본 연구에서는 기존에 제시된 문헌 조사를 통해 시스템 및 공정별 에너지 원단위 매트릭스 구축하고, 물-에너지 넥서스 모델을 활용하여 도시여건, 외부영향 및 운영관리수준이 시스템에 미치는 영향을 정량화하였으며, 관리자가 벤치마킹할 수 있는 물-에너지 사용효율 기준을 제시하였다. 이를 활용하여 도시물순환시스템 관리자는 시스템의 효율적인 운영관리를 위한 전략과 실행계획을 도출할 수 있으며, 계획의 시행 후 적합성 및 타당성에 대한 평가가 가능할 것이다.

핵심용어: 도시 물순환 시스템, 물-에너지 넥서스, 에너지 원단위, 시스템 다이내믹스

*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7514

E-mail: shin2@kwater.or.kr (Shin, Eunher)

1. 서론

도시물순환시스템(Urban Water System)은 인간이 물을 사용하기 위한 인위적인 시스템으로 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수사용, 하수집수, 하수처리, 재이용 및 방류 공정으로 구성되며, 각각의 공정은 다양한 요소와 복잡성을 포함한 세부 공정으로 나누어진다(Wakeel *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2017). 급격한 기후변화, 인구증가, 도시화로 인해 용수 수요량이 점차적으로 증가되고 있어, 도시물순환시스템의 효율적인 관리를 위한 전략과 실행계획을 수립하는 것은 매우 중요하다. 그리고 도시물순환시스템은 물 이외의 다른 부문과 긴밀한 연계성을 지니고 있다. 펌프시스템을 통해 용수를 공급하고 온수를 사용하기 위해서는 에너지가 필요하며, 정수처리 및 하수처리 공정에서는 처리수를 주변 수계로 배출하여 환경 및 생태계에 영향을 미친다. 또한, 사용되는 에너지를 생산하는 과정에서 탄소가 배출되는 등 도시물순환시스템은 에너지, 탄소, 환경, 생태계 등 다양한 부문과 연관관계가 존재한다. 이와 같이, 도시물순환시스템에서 발생하는 문제들은 물에 국한된 것만이 아니라 연관된 다양한 부문에 영향을 끼치므로, 지속가능발전목표를 달성하기 위해서 도시 물관리 문제를 단순히 물의 시각에서 바라보는 것이 아니라 관련된 다른 부문을 포괄적으로 고려하는 넥서스 관점에서 바라볼 필요가 있다(Liu *et al.*, 2018). 넥서스는 여러 부문 간 사이에 존재하는 복잡한 상호연관성을 파악하고 직간접적으로 미치는 영향을 분석을 통해, 부문별 상충관계(trade off)를 최소화하고, 상승효과(synergy)를 최대화하고자 하는 통합적인 접근법이다. 이러한 넥서스 접근법은 자원을 하나의 관점에서 바라보던 전통적인 방식에서 벗어나 다양한 분야와 통합적으로 분석함으로써 다각적으로 바라보는 것을 가능하게 한다.

넥서스 분석 방법론을 선택하고 모델을 구축하기 이전에 넥서스의 분석 부문, 목적, 공간적 범위, 분석 수준 및 분석 형태를 명확히 설정하여야 한다. 널리 고려되는 넥서스의 부문은 물, 에너지, 환경, 식량, 토지, 기후 등을 들 수 있으며, 고려되는 부문에 따라 넥서스의 명칭을 표현하게 된다(예: 물-에너지 넥서스, 물-에너지-환경 넥서스, 물-에너지-토지-기후 넥서스 등). 분석 목적을 명확히 하는 것은 목표 지향적인 분석을 가능하게 하여 전략 및 실행계획별 우선순위 결정을 용이하게 한다. 넥서스는 가정, 도시, 지역(구역), 국가, 국가 간 범위에서 분석될 수 있으며, 이러한 공간적 범위는 분석 방법론, 모델 구조, 이해관계자 설정 및 필요 데이터의 결정에 큰 영향을 미친다(Daher *et al.*, 2017). 넥서스 분석 수준은 상호관계를 입증하고 위험 및 기회를 식별할 수 있는 연관관계 이해 수준, 제도

및 정책적 대응을 유도하기 위한 방향 제시 수준, 자원 활용의 효율성 증진 목적의 정책 및 기술도입을 위한 정책 실행 수준으로 구분될 수 있다. 분석형태는 내부 관계 분석과 외부영향 분석으로 분류되는데, 내부 관계 분석은 서로 다른 부문 간 상호작용을 파악하여 시스템 내 특징을 나타내는 것을 목적으로 하며, 외부영향 분석은 기후변화, 오염사고, 인구증가, 정치 등 외부 동인에 의해 유발되는 시스템 거동 분석을 우선으로 한다(Zhang *et al.*, 2018).

위에 언급된 넥서스의 부문, 목적, 공간적 범위, 분석 수준, 분석 형태에 따라 적합한 넥서스 분석 방법을 선택하여야 하며, 이러한 방법은 크게 정성적 분석과 정량적 분석으로 분류할 수 있다. 정성적 분석은 사회과학 분야에서 많이 사용되며 설문 조사와 구성원들 간의 상호 이해를 향상시키기 위해 학제간 통합 방법인 온톨로지 공학(Ontology Engineering)이 주로 사용되며(Endo *et al.*, 2018), 정량적 분석을 위해서는 다양한 방법론이 적용되고 있다. 여러 부문을 통합적으로 분석할 수 있는 통합평가모델(Integrated Assessment Model) (Kling *et al.*, 2017; Javadifard *et al.*, 2020; Rising, 2020), 생산부터 폐기까지의 전 과정을 분석하는 전과정분석(Life Cycle Assessment) (Pacetti *et al.*, 2015; Armengot *et al.*, 2021; Li and Ma, 2020), 경제적 분석을 위한 비용편익분석(Benefit Cost Analysis) (Lubis *et al.*, 2018; Tajziehchi *et al.*, 2022) 및 산업연관분석(Input-Output Analysis) (Fang and Chen, 2017; Wang *et al.*, 2017; White *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2019), 부문 간 복잡한 관계성을 분석하기 위한 시스템 다이내믹스(System Dynamics) (Ravar *et al.*, 2020; Chhipi-Shrestha *et al.*, 2017; Wen *et al.*, 2022) 등이 폭넓게 활용되고 있다. 이외에도 다양한 분석 방법론이 넥서스 연구에 사용 및 제안되었으며, 현재는 각각의 방법론의 장·단점으로 고려하여 여러 방법을 혼용하여 사용하고 있는 추세이다(Liu *et al.*, 2018).

그동안 넥서스 관점에서 도시물순환시스템을 분석하기 위한 많은 연구가 수행되어왔다. 우선적으로 국가, 주(또는 도) 또는 도시별로 전체 에너지 사용 총량 대비 도시물순환시스템에 사용되는 에너지양을 제시하여 도시물순환시스템이 매우 에너지 집약적인 시스템임을 보여주는 연구가 수행되었다(EPRI, 2002; Griffiths-Sattenspiel and Wilson, 2009; Twomey and Webber, 2011; Sanders and Webber, 2012; Hardy *et al.*, 2012; Chu, 2017; Lofman *et al.*, 2002; Bennett *et al.*, 2010). 그리고 도시물순환시스템, 상수시스템, 하수시스템 또는 각각의 공정에서 단위 용수 생산을 위해 사용되는 에너지양을 나타내는 에너지 원단위(Energy Intensity)에 대한 연구를 통해 도시물순환시스템 내 물과 에너지의 효율 관계를

제시하고자 하였다(Rothausen and Conway, 2011; Nelson *et al.*, 2009; Wilkinson, 2000; Dale, 2004; Anderson, 2006; Stokes and Horvath, 2009; Scott *et al.*, 2009; Raluy *et al.*, 2005; Kneppers *et al.*, 2009; Kenway *et al.*, 2008; Wakeel *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2016; Apostolidis, 2010). 그리고 지역별, 시스템별, 공정별로 다른 물과 에너지 효율의 인과관계를 규명하기 위해 기후(장기 기후변동, 가뭄, 유형), 지리적 특징(표고차, 평지비, 위치), 도시물순환시스템 특징(총급수량, 인구, 인구밀도, 관로연장) 및 운영관리 현황(상수관망 수압, 누수율, 시스템효율, 물절약) 등이 에너지 원단위에 미치는 영향을 분석하였다(Lam *et al.*, 2017; Van Dijk *et al.*, 2013; Sanjuan-Delmás *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2018). 또한 도시물순환시스템 넥서스 모델을 구축하여 여러 영향 요소들의 변동에 따른 도시물순환시스템의 거동, 문제점들 그리고 해결 방안을 제시하고자 하는 연구들이 수행되었다(Chhipi-Shrestha *et al.*, 2017; Zarghami and Akbariyeh, 2012; De Stercke *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2022). 이와 같은 다양한 넥서스 관점의 도시물순환시스템 연구들은 각 부문 간의 연관 관계를 설명하고 정책 및 제도의 방향을 제시할 수 있으나, 구체적인 정책을 수립하고 시행하는 목적으로 활용하기에는 충분하지 않은 실정이다.

이러한 한계를 극복하고, 도시물순환시스템의 효율적인 운영관리를 위한 전략 및 실행계획을 넥서스 관점에서 도출하는 것을 목적으로 하여 연구를 수행하였다. 첫 번째로, 국내·외 도시물순환시스템의 문헌 조사를 통해 시스템 및 공정별 에너지 원단위 매트릭스를 구축하고 기술통계 값을 도출하여, 물 사용 시 시스템과 공정별로 필요한 에너지를 통계적으로 알고자 하였다. 두 번째로, 시스템 다이나믹스 방법론을 적용한 도시물순환시스템 물-에너지 넥서스 모델을 구축하여, 도시여건, 외부영향 및 운영관리 변수가 물과 에너지 사용량과 사용 효율에 미치는 영향을 정량화하고자 하였다. 세 번째로, 구축된 에너지 원단위 매트릭스와 모델을 활용하여 대상 도시를 물과 에너지 사용효율 관점에서 분류할 수 있는 기준을 제시하였다. 마지막으로 각각의 영향 요소들을 동시에 고려한 복합적인 시나리오별 물과 에너지 사용량의 궤적 변동을 제시된 기준에 따라 분석하였다. 이를 통해 도시물순환시스템 관리자는 타 시스템을 벤치마킹하고, 시스템의 문제점을 도출하며, 넥서스 관점에서 개선을 할 수 있다.

이와 같은 도시 물관리 분야의 넥서스 적용은, 물 부문만을 고려하는 전통적인 운영관리 및 실행계획 수립 방식에서 벗어나 에너지 부문의 직·간접적인 영향까지 포괄적으로 포함하는 관리가 가능하게 할 것이다.

2. 연구재료 및 방법

2.1 에너지 원단위 매트릭스 구축

도시 물순환 과정에서 물-에너지 사용효율을 살펴보기 위해 시스템(도시물순환시스템, 상수시스템, 하수시스템)과 공정별(취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수사용, 하수집수, 하수처리, 방류 등) 에너지 원단위를 조사·분석할 필요가 있다. 에너지 원단위는 도시물순환시스템에서 단위 용수를 생산, 이송 또는 사용을 위해 필요한 에너지양이며, 에너지 원단위가 작을수록 해당 시스템 또는 공정이 에너지 관점에서 효율적임을 의미한다. 많은 문헌에서 국가, 지역 또는 도시 범위에서 시스템과 공정별 에너지 원단위가 제시되었으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 지역에 구분 없이 전 세계의 시스템 및 공정별 에너지 원단위 매트릭스를 구축하고자 하였다.

일반적인 도시물순환시스템은 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수 공정을 포함하는 상수시스템과 하수집수, 하수처리, 방류를 포함하는 하수시스템으로 구분되어 진다. 그리고 상수시스템과 하수시스템 사이의 용수사용 공정은 상수 또는 하수 시스템에 포함되지 않으며, 연구자에 따라 용수사용공정의 도시물순환시스템에 포함 여부에 대한 의견이 다르다. 본 연구에서는 시스템들과 공정들을 Fig. 1과 같이 구분하여 에너지 원단위 매트릭스를 구축하였다. 도시 물순환 과정은 도시물순환시스템(total urban water system, Total), 상수시스템(total drinking water system, TDWS), 하수시스템(total wastewater system, TWWS)의 세 가지 시스템으로 구분하였으며, 공정들의 구분은 에너지 사용을 구분할 수 있는 최소한의 단위로 분류하고자 하였다. 일반적으로 취수장에서 설치된 펌프를 통해 취수하고 정수장까지 원수를 이동시키므로, 취수와 도수 공정에 사용된 에너지양을 명확하게 분리하기는 어렵다. 그리고 지하수를 취수원으로 사용하는 경우 대부분 지하수 취수에 많은 에너지가 소비되며, 지표수를 취수원으로 사용하는 경우 도수에 많은 에너지를 소모하게 된다. 따라서 본 연구에서 취수 및 도수 공정을 지하수를 수원으로 사용할 경우 지하수 취수(abstracting groundwater, Abs_g)로, 지표수를 수원으로 사용할 경우 지표수는 도수(conveyance surface water, Con_s)로, 그리고 수원이 명확하지 않은 경우 취수 및 도수

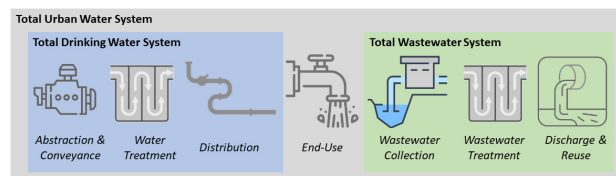


Fig. 1. Urban water system

(abstraction and conveyance, Abs.Con) 공정으로 구분하였다. 정수처리공정은 일반적으로 1차, 2차, 고도처리로 구성되며, 원수의 수질에 따라 적용되는 처리기법이 다르다. 지하수의 경우 지표수에 비해 수질이 양호하며 변동성이 크지 않아 지하수 정수처리 공정은 지표수 정수처리 공정에 비해 단순하며 에너지 소모가 적다. 그리고 기수 또는 해수를 원수로 사용하는 담수화의 경우 지하수나 지표수 처리보다 더 복잡한 처리기법이 적용된다. 따라서 정수처리 공정은 지표수 정수처리(water treatment surface water, WT_s), 지하수 정수처리(water treatment groundwater, WT_g), 담수화(water treatment desalination, WT_d)로 구분하였으며, 원수가 명확하지 않은 경우 전체 정수처리 공정(water treatment all, WT_all)으로 분류하였다. 그리고 제시된 자료에서 송수와 배급수 공정을 명확하게 구분하기는 어려워 송수공정과 배급수 공정을 모두 포함하는 배·급수(distribution, Dis.)로 분류하였다. 용수사용(end-use, EU) 하수집수(wastewater collection, WWC), 하수처리(wastewater treatment, WWT), 용수 재이용(water reuse, WR) 및 방류(discharge, D) 공정은 통상적인 도시 물순환 과정의 공정 분류를 따라 적용하였다.

2.2 물-에너지 넥서스 모델 구축

도시물순환시스템 물-에너지 넥서스 모델을 구축하기 위하여 시스템 다이내믹스를 방법론은 적용하였다. 시스템 다이내믹스는 복잡한 인과관계와 상호연관성을 분석하기에 적합하고(Forrester, 1961; 1968) 시스템 내 피드백에 의한 영향을 고려할 수 있어(Qi and Chang, 2011), 공학 분야와 더불어 경제, 사회 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있는 방법론이다. 그리고 복잡한 변수들로 구성된 시스템을 동적으로 분석하고 시스템이 가진 복잡성과 그 관계를 직관적으로 파악할 수 있어, 도시 물순환 분야에서는 시스템 다이내믹스의 활용도가 점차 증대되고 있는 추세이다(Chhipi-Shrestha *et al.*, 2017; Zarghami and Akbariyeh, 2012; De Stercke *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2022).

본 연구에서는 기 개발된 도시물순환시스템 넥서스 모델(Choi *et al.*, 2022)을 분석에 활용하였다. 해당 모델은 도시에서 물을 공급할 때 필수적으로 필요하며 연관성이 높은 에너지

부문을 고려하였으며, 도시물순환시스템 물-에너지 넥서스의 거동을 이해하는 것을 목적으로 각 공정 간의 상관관계를 거시적 관점에서 해석하였다. 또한, 물 중심의 넥서스 모델을 구축하여, 해당 시스템 내·외의 동인에 따른 자원의 사용 및 효율을 분석하고, 이를 통해 효율적인 운영관리를 위한 전략과 실행 계획을 도출하고자 하였다. 본 모델은 담수화(desalination), 지하수 취수(groundwater intake), 지표수 취수(surface water intake), 도수(conveyance), 정수처리(water treatment, WT), 송수 및 배·급수(transmission & distribution), 용수사용(end-use), 하수 집수(wastewater collection), 하수처리(wastewater treatment, WWT) 및 방류(discharge) 공정을 분석 대상 공정으로 고려하였으며, 하수 재이용은 포함하지 않았다.

구축된 모델은 Table 1과 같이 공정별로 공정전체경험모델(whole empirical model, WEM), 공정세부경험모델(segmented empirical model, SEM), 공정이론모델(theoretical model, TM)로 구성된다. 공정전체경험모델은 2.1절에서 구축된 공정별 에너지 원단위 매트릭스와 해당 공정에서 이송 또는 처리되는 수량을 통해 에너지 사용량을 산정하는 모델이다. 가장 간단한 모델이지만, 다양한 목적으로 적용 가능하며 직관적인 결과를 도출하기에는 매우 적합한 모델이다. 공정세부경험모델은 문헌에서 제시된 각각의 공정에서 에너지 산정 경험식을 적용하여 필요한 에너지를 계산하였다. 담수화, 지하수 취수, 도수, 정수처리, 송수 및 배·급수, 용수사용 및 하수처리 공정의 공정세부경험모델을 구현하였으며, 지표수 취수, 하수 집수 및 방류 공정은 경험식 부재로 인해 포함되지 않았다. 담수화 공정은 IDA (2012)와 Pérez-Navarro Gómez *et al.* (2015)에서 제시된 기법별(다단증발법, 다중효율법, 기계증기압축법, 역삼투압방식) 에너지 산정식을 적용하였다. 지하수 취수의 경우 Plappally (2012)의 경험식을 바탕으로 지하수 수심 깊이에 따라 계산되며, 도수 공정은 GEI and Navigant (2010), Dale (2004), Anderson (2006), Wilkinson (2000), Stokes and Horvath (2009), Scott *et al.* (2009), AGDSEWPC (2010)이 제시한 지역별 도수관로 길이에 따른 단위 용수 이송에 사용된 에너지양과 관로길이를 통해 산정된다. 정수처리 공정에서는 혼화, 응집, 침전, 여과, 역세, 소독, 막, 오존, UV 등 정수처리에 적용된 처리방법에 따라 산정하도록 구성하였

Table 1. Water-energy nexus model structure

Type	Desalination	Surface water intake	Groundwater intake	Conveyance	WT	Transmission Distribution	End-use	Wastewater collection	WWT	Discharge
WEM	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SEM	○		○	○	○	○	○		○	
TM				○		○				

다. 배·급수 공정은 Sanjuan-Delmás et al. (2015)가 제시한 경험식을 적용하였으며, 해당식은 단위길이당 에너지 소모량, 관로길이, 유수수량 및 인구를 매개변수와 입력변수 값으로 가진다. 용수사용 공정에서는 용수 가열(온수), 가전제품 사용(세탁기, 식기세척기), 조경 사용과 같은 사용 목적별 에너지를 고려하였다. 하수처리 공정에서는 하수 1차처리, 2차처리(라군, 활성슬러지, 산화구, 살수여상, MBR), 3차처리의 적용 처리방법에 따라 산정할 수 있다. 공정이론모델은 물리적 이론에 따라 에너지의 사용량을 산정하는 모델이다. 해당 모델을 도수 공정과 송수 및 배급수 공정에서 관로를 통해 이송시 발생하는 수두 손실을 산정하는 이론(Pérez-Navarro Gómez et al., 2015)를 적용했다. 해당 이론식은 표고차이, 달시-바이스바흐 또는 하젠-윌리엄스 식을 통해 산정된 수두손실, 최소 요구 동수두 등을 고려하고 있다.

일반적으로 개발된 시스템 다이내믹스 모델의 신뢰성은 모델 단위의 일관성 검증(dimensional consistency test), 구조적 검증(structural test), 그리고 과거 계측된 자료 기반의 검·보정(historical consistency)을 통해 확보된다. 본 연구에서는 가상의 도시를 대상으로 분석을 수행하여, 물-에너지 넥서스 모델의 단위 일관성 검증 및 구조적 검증만을 수행하였으며, 향후 국내·외 도시에 해당 모델을 적용하여 과거 자료 기반의 검·보정을 하여 모델의 신뢰도를 높일 필요가 있다.

2.3 도시여건에 따른 단위 외부영향 및 운영관리수준 영향 분석

“에너지 절약을 위한 물 절약”, “물 절약을 위한 에너지 절약”은 넥서스 관점에서 매우 중요한 항목이며, 이를 위해 물 또는 에너지 부문의 실행계획이 다른 부문에 미치는 상승효과와 상충관계를 예측할 필요가 있다. 도시물순환시스템 내 물-에너지 사용량과 사용효율은 도시여건(시스템 에너지 집약도, 도시 지리 등), 외부영향(기후변화, 도시화, 인구증가 등), 그리고 운영관리수준(기술도입, 유지관리 효율 개선, 물손실 증가·감소, 수요관리 등) 등에 따라 변화하게 된다. 그러나 일반적으로 여러 요인들은 동시에 복합적으로 발생하여서 개별적 요인 변동이 도시물순환시스템에 미치는 영향을 개량하기는 어려운 실정이다. 일례로 도시물순환시스템 관리자가 물-에너지 사용효율

향상을 위해 신기술을 도입하였을 때, 인구증가나 기후변화와 같은 외부요인으로 인해 물과 에너지 사용량이 증가할 경우 해당 실행계획의 긍정적인 결과가 나타나지 않을 수 있다.

서론에서 논의된 바와 같이 도시별로 기후, 지리적 특징, 도시물순환시스템의 특징 등에 따라 동일 양의 용수를 공급하기에 요구되는 에너지의 차이가 존재한다. 따라서 대상 도시를 단위 용수 사용 시 필요 에너지가 적은 강건한 도시(robust city), 평균의 에너지를 사용하는 보통의 도시(normal city), 그리고 에너지를 많이 필요로 하는 취약한 도시(vulnerable city)로 구분하여 분석하였다. 강건한 도시, 보통의 도시, 취약한 도시에 적용된 에너지 원단위 매개변수 값은 2.2절을 통해 도출된 에너지 매트릭스의 삼사분위값, 중위값, 일사분위값을 적용하였으며, 그 값은 Table 2에 나타난 바와 같다. 용수사용 공정의 경우, 문헌에서 제시된 에너지 원단위 범위가 매우 넓어 각각의 도시 경우에 중위값을 고려하였다.

도시물순환시스템에 영향을 미치는 변수는 도시물순환시스템 운영관리자가 제어하기 어려운 외부영향 변수와 시스템 개선과 정책 등을 통해 변화가 가능한 운영관리수준 변수로 구분할 수 있다. 그리고 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 도시여건, 외부영향 및 운영관리수준 변동에 따라 도시물순환시스템의 총사용수량과 총에너지사용량의 궤적 시작점과 궤적 방향은 다양하게 나타나게 된다. 동일한 양의 물을 사용하여도 도시여건이 다른 경우에 궤적의 시작점에 차이가 발생하게 되며, 강건한 도시여건의 경우 낮은 지점을, 취약한 도시여건의 경

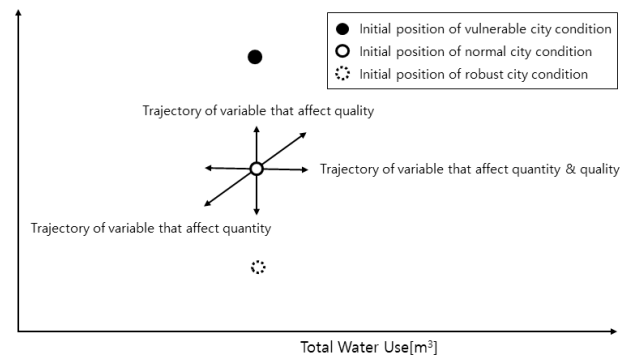


Fig. 2. The general trajectory of total water and total energy use according to influencing factors

Table 2. Energy intensity values [kWh/m³] of robust, Normal and vulnerable city cases

City Condition	Desalination	Surface water intake	Groundwater intake	Conveyance	WT	Transmission Distribution	End-use	Wastewater collection	WWT	Discharge
Robust	1.197	0	0.372	0.150	0.029	0.136	3.211	0.037	0.300	0.038
Normal	3.170	0	0.505	0.370	0.090	0.255	3.211	0.061	0.440	0.054
Vulnerable	5.450	0	0.874	1.813	0.298	0.385	3.211	0.140	0.711	0.068

우 높은 지점을 궤적의 시점으로 가지게 된다. 그리고 변수들의 특성에 따라 변동은 크게 사선방향, 수직방향, 수평방향이동이 발생된다. 물-에너지 사용효율의 변동은 없으며, 물-에너지 사용량이 변화하는 경우 사선 방향의 궤적 이동이 발생하며, 동일한 물 사용량에서 에너지 사용량만 변동할 경우 물-에너지 사용효율이 변하는 수직 방향의 궤적 이동이 생기게 된다. 그리고 양적인 측면과 효율적인 측면에 모두 변동될 경우 수평 방향의 궤적 이동이 발생된다. 본 연구에서는 외부영향 변수로 인구와 취수원 내 지하수 비율을 고려하였다. 많은 도시들은 도시화로 인해 인구가 증가되고 있으며, 이에 비례하여 도시의 물과 에너지 사용량은 증가하게 된다. 그리고 취수원으로 지하수를 사용할 경우 지표수를 사용할 때보다 더 많은 펌프 에너지가 필요하다. 대표적인 운영효율 변수로는 물손실량을 들 수 있으며, 물손실은 상수관망에서 관 파손 등으로 인한 실손실(real loss)과 수도사업자가 요금을 징수하지 못한 명목손실(apparent loss)로 구분된다. Choi *et al.*(2022)은 물손실 중 실손실을 줄이는 것이 넥서스 관점에서 도시물순환시스템의 물-에너지 사용량을 줄이는데 중요한 요소임을 보여주었다. 각각의 변수들의 궤적 변동을 분석하기 위해 Table 3과 같이 각각 3개의 도시여건(R, N, V), 인구(P5, P25, P50), 지하수 취수비율(GR0.1, GR0.5, GR0.9), 물손실(WR0.1, WR0.3, WR0.5)을 고려하여 총 27개 경우를 분석하였다. 이를 통해 물과 에너지 사용의 양적인 측면과 효율적인 측면의 변화를 파악하여, 이를 통해 넥서스 관점에서 도시물순환시스템 관리의 방향성을 제시하고자 하였다.

도시물순환시스템에서 물 사용량은 일반적으로 총사용수량을 고려하며, 이를 이용하여 에너지 원단위를 계산한다. 그러나 총사용수량은 실사용수량과 물손실의 합으로 물손실에 차이가 있는 도시 간의 비교가 어려우며, 물손실로 인해 왜곡된 결과를 도출할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 물 사용량으로 총사용수량 외에 우수수량과 실사용수량의 세 가지 경우를 고려하였으며, 물-에너지 사용효율 분석을 위해 에너지 원단위(총에너지 사용량/총사용수량), 우수수량 에너지 원단위(총에너지 사용량/총우수수량), 실사용수량 에너지 원단위(총에너지 사용량/실사용수량)를 적용하였다.

2.4 도시물순환시스템 물-에너지 사용효율 기준 제시

도시물순환시스템 관리자는 효율적으로 운영되고 있는 다른 도시의 물순환시스템을 벤치마킹하여 관리하고 있는 시스템과 벤치마킹 하고자 하는 대상 시스템의 물-에너지 사용효율을 평가하고, 새로운 전략과 실행계획을 도입하여, 두 시스템 간의 효율 간격을 줄여나갈 수 있다. 그러나 현재 도시물순환시스템의 물-에너지 사용효율을 판단할 수 있는 기준은 부재한 실정이다. 본 연구에서는 2.1절에서 수립된 에너지 원단위 매트릭스와 2.2절에서 구축된 물-에너지 넥서스 모델을 기반으로 도시물순환시스템 내 물-에너지 사용효율 평가를 위한 두 가지 기준을 제시하였다.

첫 번째로 에너지 원단위 매트릭스 내 도시물순환시스템, 상수시스템, 하수시스템 별 에너지 원단위 값의 일사분위수, 중위값, 삼사분위수를 적용하여 그룹 I(뛰어남), 그룹 II(좋음), 그룹 III(좋지 않음), 그룹 IV(나쁨)의 네 가지 단계로 구성된 기준을 제시하였다. 해당 기준은 전 세계 도시들을 동일한 기준에서 평가하여 도시의 여건에 따른 차이는 고려하지 못하는 단점이 있다. 그러나 해당 기준을 통해 세부적인 도시 여건에 대한 자료(예, 취수비율, 물손실, 인구, 1인당 일평균 물사용량 등)가 없어도 전세계 도시 관점에서 분석대상 도시의 물-에너지 사용효율 현황 검토가 가능하다. 두 번째로는 첫 번째 기준의 한계점을 개선하여 도시의 여건을 반영한 기준을 제시하였다. 2.2절에서 구축된 물-에너지 넥서스 모델의 매개변수 값들에 대표적인 도시 여건을 반영하여 그 결과를 기반으로 기준을 수립하였다. 에너지 원단위 매트릭스의 각각의 공정별 에너지 원단위의 일사분위수, 중위값, 삼사분위수 값으로 구성된 모델을 일정 인구(5만, 25만, 50만), 지하수 취수비율(50%) 및 물손실(0.3)의 경우를 고려하여 첫 번째 기준과 동일하게 도시 분류를 그룹 I(뛰어남), 그룹 II(좋음), 그룹 III(좋지 않음), 그룹 IV(나쁨)의 네 가지 단계로 구분하는 기준을 제시하였다.

도시물순환시스템 관리자는 제시된 두가지 물-에너지 사용효율 기준 중 해당 도시에 적용하기 적합한 기준을 선정하여 벤치마킹을 수행할 수 있다. 이러한 도시 분류 기준을 통해 시간 흐름에 따른 도시의 물-에너지의 사용량과 사용효율 변동을 추적하며, 도입된 전략과 실행계획 등의 타당성에 대한

Table 3. Set values of city condition, External impact variables, and O&M level variables

Category	Variables	Values (Abbreviation)
City Condition	Energy Intensity Conditions	Robust (R), Normal (N), Vulnerable (V)
	Population	50,000 (P5), 250,000 (P25), 500,000 (P50)
External Impact	Water Source (Groundwater)	10% (GR0.1), 50% (GR0.5), 90% (GR0.9)
	Water Loss*	0.1 (WR0.1), 0.3 (WR0.3), 0.5 (WR0.5)

*Assumed that apparent loss is 10%

평가도 수행할 수 있다.

2.5 복합 영향 시나리오 프로파일 분석

실제 도시물순환시스템은 하나의 요인에만 영향을 받지 않고, 여러 가지의 영향 요인들이 동시에 복합적으로 발생하여 변화하게 된다. 따라서 2.5절에서는 도시여건 및 인구 현황에 따라 여러 가지 외부영향 및 운영관리수준 영향 변수들이 동시에 발생 되는 시나리오를 구성하고, 각각의 시나리오별 물-에너지 사용량 및 사용효율 변동을 10년 동안 분석하였다. 전체적인 시나리오는 3개의 도시여건(취약, 보통, 강건)과 3개의 인구 현황(5만, 25만, 50만)에서 2개의 외부영향 변동(외부영향 존재, 외부영향 없음)과 3개의 운영관리수준 변동(개선, 유지, 악화)을 고려한 총 54개의 시나리오로 구성되었다.

도시여건은 2.3절과 동일하게 취약한 도시(E1), 보통의 도시(E2), 강건한 도시(E3)의 경우로 분류하였으며, 인구는 5만(P1), 25만(P2), 50만(P3)의 상황을 고려하였다. 그리고 도시의 1인당 일평균 물사용량, 물손실, 취수원 지하수 비율, 지하수 수위, 도수관로 길이 초기값은 각각 250 liter/capita/day, 0.3, 0.5, 30 m, 100 km를 적용하였다. 외부영향에서 변동이 없는 경우(I1)는 기후변화가 거의 없고 도시화가 심하지 않은 경우로, Table 4에 제시된 바와 같이 취수원 지하수 비율과 지하수 수위, 도수관로 길이는 변동이 없는 것으로 가정하였으며, 도시의 인구증가는 10년간 일정하게 낮은 값(1%/년)으로 설정하였다. 외부영향에 변동이 있는 경우(I2)는 도시가 기후변화에 큰 영향을 받으며 도시화가 급격하게 진행되고 있는 시나리오이다. 이 경우 기존의 전통적인 수자원(지표수, 지하수)이 부족하여 6년차에 비전통적인 수자원(담수화)를 통해 원수를 일부 공급하고, 지하수의 수위는 10년간 지속적으로

감소하며, 다른 지역에서 광역 용수를 3년차 부터 수입하는 것으로 시나리오를 설정하였다. 그리고 해당 경우 인구증가율은 10년간 5%/년으로 가정하였다. 운영관리수준의 변동 변수로는 Table 5에 설명된 바와 같이 물손실, 1인당 일평균 물사용량, 온수 사용 비율을 고려하였다. 운영관리수준이 개선되는 경우(O1) 물손실은 10년 동안 0.3에서 0.1로 감소하며, 수요관리를 통하여서 1인당 일평균 물사용량은 250 liter/capita/day에서 200 liter/capita/day으로 변동되는 것으로 가정하였다. 그리고 온수 사용 비율은 초기에 비해 10년 후에 10% 감소하는 것으로 가정하였다. 운영관리수준이 악화되는 경우(O3)는 이와 반대로 물손실이 0.3에서 0.5로 증가하고, 1인당 일평균 물사용량 또한 250 liter/capita/day에서 300 liter/capita/day으로 증가하였으며, 온수 사용 비율도 10% 증가하는 시나리오이다. 그리고 유지하는 경우(O2)는 초기 값을 10년 동안 동일하게 유지하는 경우이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에너지 원단위 매트릭스

기존의 국내·외 연구에서 제시된 에너지 원단위를 시스템과 공정별로 분류하여 에너지 원단위 매트릭스를 Table A1과 같이 구축하였다. 구축된 시스템 및 공정별 에너지 원단위 매트릭스는 평균, 중앙값, 최빈값, 표준편차, 최솟값, 최댓값 등 기술통계 값들을 포함하고 있다. 기술통계 값에서 평균값이 삼사분위수보다 높은 경향을 보이는 것을 나타내었는데, 이는 기존 문헌에서 제시된 인텐시티 값에 특수한 상황에서 제시된 값들이 몇몇 존재하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 4. Set values for external impact scenarios

Variables	Without External Impacts (I1)	With External Impacts (I2)	Event Period
Source	Groundwater 50% Surface Water 50%	Groundwater 40% Surface Water 40% Desalination 20%	Year 6
Groundwater Level	30 m	30 m → 45 m	0~10 years
Bulk water import	Pipeline Length: 100 km	Pipeline Length: 500 km	Year 3
Population Growth	Growth Rate: 1%/yr	Growth Rate: 5%/yr	0~10 years

Table 5. Set values for operation & maintenance level scenarios

Variables	Improvement (O1)	Maintenance (O2)	Deterioration (O3)	Event Period
Water Loss	0.1	0.3	0.5	0~10 years
LPCD	200 liter/capita/day	250 liter/capita/day	300 liter/capita/day	0~10 years
Hot Water Ratio	10% decrease	maintain	10% increase	0~10 years

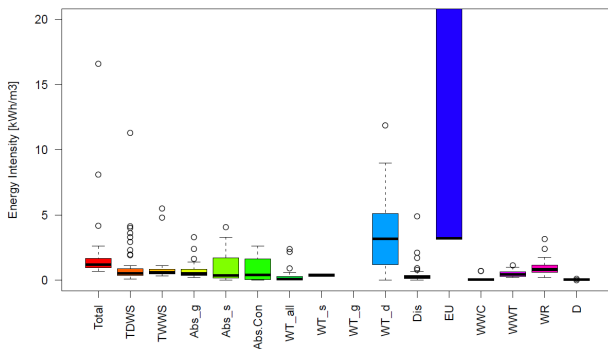


Fig. 3. Box plot of energy intensity in urban water system

따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 평균값 대신 중앙값을 중심으로 시스템과 공정별 에너지 원단위 매트릭스를 비교 분석하였다.

시스템 관점에서 인텐시티를 분석한 결과 도시물순환시스템(Total), 상수시스템(TDWS), 하수시스템(TWWS)의 에너지 원단위 중앙값은 각각 1.210 kWh/m^3 , 0.519 kWh/m^3 , 0.580 kWh/m^3 의 값으로 나타났다. 이러한 수치는 도시물순환시스템에서 1 톤의 물을 공급하고 사용하며 처리하기 위해서는 1.210 kWh 의 에너지가 필요로 함을 의미한다. 하수시스템의 에너지 원단위가 상수시스템보다 약간 높은 것으로 나타났지만, 그 차이가 0.061 kWh 로 크지 않았다.

지하수 취수(Abs_g), 지표수도수(Con_s), 지표수 정수처리(WT_s), 담수화(WT_d), 배급수(Dis.), 용수사용(EU), 하수 집수(WWC), 하수처리(WWT), 용수 재이용(WR) 및 방류(D) 공정의 에너지 원단위 중앙값은 각각 0.505 kWh/m^3 , 0.370 kWh/m^3 , 0.382 kWh/m^3 , 3.170 kWh/m^3 , 0.255 kWh/m^3 , 3.211 kWh/m^3 , 0.061 kWh/m^3 , 0.440 kWh/m^3 , 0.820 kWh/m^3 , 0.054 kWh/m^3 을 나타내었다. 용수사용 공정은 전체 공정에서 가장 높은 에너지 원단위 중앙값(3.211 kWh/m^3)과 표준편차(102.593 kWh/m^3)를 보였다. 이는 전체 도시물순환시스템에서 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 온수 또는 가전제품 사용과 같은 용수사용 시 사용되는 에너지를 줄이는 것이 가장 중요함을 시사한다. 그러나 용수사용에 많은 부분을 차지하는 온수는 도시의 기후, 지리적 위치, 계절에 큰 영향을 받으므로, 도시별 비교 시 적합하지 않은 항목일 수 있다. 이와 같은 특성 때문에 기존의 많은 연구에서는 용수사용 공정을 도시물순환시스템에서 제외하고 분석하기도 하였다. 용수 재이용과 담수화 공정은 기후변화, 인구증가와 같은 외부영향에 적응하여 부족한 수자원 문제를 해결할 수 있는 공정이다. 두 공정은 에너지 집약적인 수처리 공정을 포함하기 때문에 각각 3.170 kWh/m^3 , 0.820 kWh/m^3 의 높은 에너지 원단위를 보였다. 이를 통해 대

체수자원 확보 시 용수 재이용이 담수화보다 에너지 관점에서 우선되어야 하는 것을 정량적으로 알 수 있었다. 더불어, 담수화 공정은 용수사용 다음으로 가장 큰 표준편차를 보였는데 (30.761 kWh/m^3) 이는 담수화 공정이 원수(해수, 기수) 수질, 적용 기술 및 시설용량 등 다양한 요인에 영향을 받는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 정수처리와 하수처리와 같은 처리 공정과 펌프에너지를 필요로 하는 지하수 취수, 도수, 배급수 공정에서 일정 수준의 에너지가 소모됨을 알 수 있었다. 그리고 중력을 활용하여 이송하는 경우가 대부분인 하수집수와 방류 공정에 필요한 에너지는 상대적으로 매우 낮았다.

3.2 도시여건에 따른 단위 외부영향 및 운영관리수준 영향

도시물순환시스템에서 도시여건, 외부영향 및 운영관리수준의 변동은 물-에너지 사용량 및 에너지 원단위로 표현되는 사용효율에 큰 영향을 미친다. 외부영향 변수는 시스템에서 운영관리자가 제어할 수 없는 변수로 기후변화, 도시화, 인구증가 등에 의해 야기된다. 반면, 운영관리수준 변수는 효율적인 관리 전략과 실행계획의 수립 및 적용을 통해 운영관리자가 제어할 수 있는 변수로 신기술 도입, 유지관리 효율 개선, 물손실 관리, 수요관리 등을 예로 들 수 있다. 본 연구에서는 2.3절에 설명되어있는 바와 같이 도시여건(강건, 보통, 취약)에 따라 외부영향 변수(인구, 취수원 변동)와 운영효율 변수(물손실 비율)가 도시물순환시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 보통의 도시여건에서 외부영향 변수와 운영효율 변수의 변화에 따른 총사용수량과 총에너지사용량은 Fig. 4에 나타나 있다.

동일한 조건(보통의 도시여건, 지하수 취수비율 0.5, 물손실 0.3)에서 인구가 증가하는 경우(5만, 25만, 50만), 인구증가에 비례하여 총사용수량과 총에너지사용량이 증가하였으나 에너지 원단위 값은 3.574 kWh/m^3 로 인구 변화에 상관없이 일정한 값을 나타내었다. 이는 인구증가가 물-에너지 사용량에 영향을 미치나 물-에너지 사용효율에는 영향을 미치지 않는 변수임을 의미한다. 지표수에서 지하수로 취수원을 변동하는 경우는 인구증가와 다른 경향을 나타내었다. 일반적으로 지하수를 원수로 사용하는 경우 지표수를 이용하는 경우에 비해 더 많은 펌프에너지를 필요로 하기 때문에 총에너지사용량에는 증가하는 경향을 나타내었지만, 지하수 취수율 변동에 따른 총사용수량의 변화는 없었다. 25만 인구의 보통의 도시여건에서, 지하수 취수비율이 0.1, 0.5, 0.9로 변함에 따라 인텐시티는 각각 3.526 kWh/m^3 , 3.574 kWh/m^3 , 3.622 kWh/m^3 로 소폭 증가 되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 취수원 변동은 물 사용량은 영향을 끼치지 않지만, 에너지 사용

량을 증감시켜 물-에너지 사용효율 측면에서 변동성을 유발하는 것을 의미한다. 물손실은 취수해야하는 원수량과 사용자에게 공급해야하는 정수량에 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 도시물관리시스템에서 중요한 영향 요인 중 하나이다. 물손실 변동에 따른 물-에너지 사용량과 사용효율의 변동을 분석하기 위해 보통의 도시여건에서 인구 25만, 지하수 취수비율이 0.5인 경우를 검토한 결과, 물손실에 따른 용수형태별(총사용수량, 유수수량, 실사용수량) 물-에너지 사용량 및 사용효율 변화는 다른 경향을 나타내었다. 총사용수량의 경우, 물손실이 0.1, 0.3, 0.5로 증가할 때 수량은 각각 68.7 Mm³/year, 85.6 Mm³/year, 113.6 Mm³/year으로 증가한 반면, 에너지 원단위는 4.243 kWh/m³, 3.574 kWh/m³, 2.905 kWh/m³로 감소하는 경향을 보였다. 총유수수량의 경우 물손실이 증가하면서 수량에서 약간의 감소가 발생하였으며, 유수수량 에너지 원단위는 4.714 kWh/m³, 5.106 kWh/m³, 5.810 kWh/m³로 증가하였다. 실사용수량의 경우 물손실에 따른 수량의 변동성은 없는 것으로 나타났으며, 실사용수량 에너지 원단위는 유수수량 에너지 원단위와 유사하게 물손실이 증가함에 따라 4.662 kWh/m³, 4.896 kWh/m³, 5.282 kWh/m³로 증가하였다. 이러한 결과는 일반적으로 널리 활용되고 있는 총사용수량 및 에너지 원단위의 관점에서 분석할 경우, 물손실이 높은 도시물

순환시스템은 물-에너지 사용효율이 실제보다 더 좋게 과대 평가되며, 물손실이 증가함에 따라 시스템의 사용효율이 개선되는 것으로 잘못 해석될 여지가 있다. 이에 따라 물손실이 높거나, 물손실 변동성이 큰 도시물순환시스템의 경우 총사용수량 관점의 사용량과 에너지 원단위와 더불어, 유수수량 또는 실사용수량 관점의 사용량과 에너지 효율을 동시에 비교하는 것이 필요하다.

3.3 도시물순환시스템 물-에너지 사용효율 기준

3.1절에 구축된 에너지 원단위 매트릭스에 기반한 물-에너지 사용효율 기준과 물-에너지 벡서스 모델에 기반한 기준 두 가지를 Table 6과 같이 제시하였다. 매트릭스 기반 기준은 상수시스템, 하수시스템, 그리고 전체 도시물순환시스템의 에너지 원단위 기술통계를 기반으로 제시되었으며, 4개 그룹의 구분은 사분위수 값을 기준으로 수립하였다. 일사분위수 이하의 에너지 원단위 값은 그룹 I(뛰어남), 일사분위수와 중위값 사이는 그룹 II(좋음), 중위값과 삼사분위수 사이는 그룹 III(좋지 않음), 그리고 삼사분위수 이상의 값에서는 그룹 IV(나쁨)으로 하였다. 모델 기반 기준은 도시물순환시스템의 각각의 공정별 에너지 원단위의 일사분위수, 중위값, 삼사분위수 값으로 구성된 모델을 일정 인구(5만, 25만, 50만), 지하수 취수비율(50%) 및 물손실(0.3)의 경우에 분석하여, 에너지 원단위, 유수수량 에너지 원단위, 그리고 실사용수량 에너지 원단위 별로 제시되었다. 매트릭스 기반 기준과 동일하게 그룹 I(뛰어남), 그룹 II(좋음), 그룹 III(좋지 않음), 그룹 IV(나쁨)의 4단계로 구분하였으며, 총사용수량을 고려한 에너지 원단위 기반의 기준은 Fig. 5와 같다.

매트릭스 기반 기준과 모델 기반 도시분류 기준을 비교한 결과 모델 기반 기준이 매트릭스 기반 기준보다 상대적으로 높은 값을 제시하는 것으로 나타났다. 모델 기반 기준은 도시물순환시스템의 모든 공정들을 고려하여 산정된 값이므로, 과대하게 산정될 여지가 있는 것으로 추측된다. 따라서 벤치마킹 시 도시물순환시스템 관리자는 매트릭스 기반 기준을 우선 적용하는 것이 적합한 것으로 판단되며, 도시물순환시스템의 세부 자료가 존재할 경우 모델 기반 기준을 통한 벤치

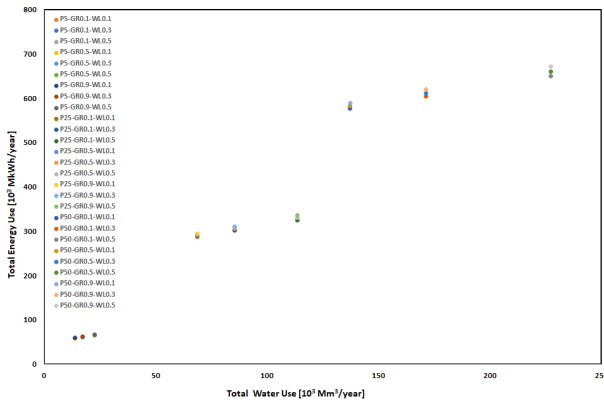


Fig. 4. Total water and total energy use according to influencing factors in normal city

Table 6. Water-energy use efficiency criteria of urban water system

Group	Matrix based criteria			Model based criteria		
	Drinking water system	Wastewater system	Urban water system	EI	Revenue water EI	Actual water use EI
Excellent	~0.36	~0.47	~0.87	~3.274	~4.678	~4.486
Good	0.36~0.52	0.47~0.58	0.87~1.21	3.274~3.574	4.678~5.106	4.486~4.896
Poor	0.52~0.90	0.58~0.93	1.21~1.69	3.574~4.154	5.106~5.935	4.896~5.691
Bad	0.90~	~0.93	1.69~	4.154~	5.935~	5.691~

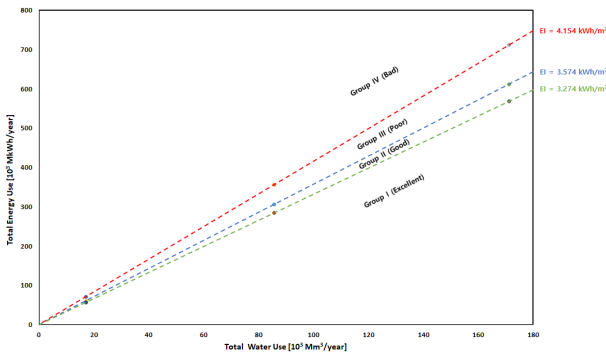


Fig. 5. Water-energy use efficiency criteria for urban water system based on model with EI

마킹을 확대 적용할 수 있다.

3.4 복합 영향 시나리오 프로파일

도시여건, 인구, 외부영향, 운영관리수준을 고려한 54개의 시나리오를 분석하여, 다양한 도시의 현재 상황에서 외부영향의 유무와 운영관리수준의 변화가 도시물순환시스템 내 물-에너지 사용량 및 사용효율에 미치는 영향을 10년간 프로파일 분석하였다. 보통의 도시여건과 25만의 인구에서 외부영향과 운영관리수준 변동 시 모델 기반 기준에 따른 물-에너지 프로파일은 Fig. 6에 제시된 바와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 기후변화 또는 도시화와 같은 외부영향이 있는 시나리오(E2-P2-I2-O1, E2-P2-I2-O2, E2-P2-I2-O3)에서는 물-에너지 사용효율을 의미하는 에너지 원단위가 증가하여, 기존의 그룹 II (좋음)과 그룹 III (좋지않음)의 사이에 속해있던 에너지 원단위는 그룹 IV (나쁨)로 변화되었다. 외부영향이 있으나 운영관리수준을 개선한 시나리오(E2-P2-I1-O1)에서는 에너지 원단위는 증가하였으나, 운영관리수준 개선으로 인해 총사용수량에 변동은 크지 않는 것으로 나타났다. 그러나 운영관리수준이 악화되는 시나리오(E2-P2-I2-O3)에서는 에너지 원단위의 증가뿐만 아니라 총사용수량도 급격하게 증가하여 양적인 측면과 질적인 측면 모두에서 악화되는 것을 확인할 수 있었다. 외부의 영향이 없는 시나리오(E2-P2-I1-O1, E2-P2-I1-O2, E2-P2-I1-O3)에서는 에너지 원단위의 값은 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 외부영향이 없으며 운영관리수준의 변동이 없는 시나리오(E2-P2-I1-O2)에서는 에너지 원단위의 값은 그대로 유지하면서 총사용수량만 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 운영관리수준을 개선하는 시나리오(E2-P2-I1-O1)에서는 총사용수량이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 에너지 원단위 관점에서 살펴보았을 때 그룹 III (좋지않음)에 속해지며 효율이 악화되는 결과를 도출하였다. 이와 유사하게 운영관리수준이 악화되는 시나리

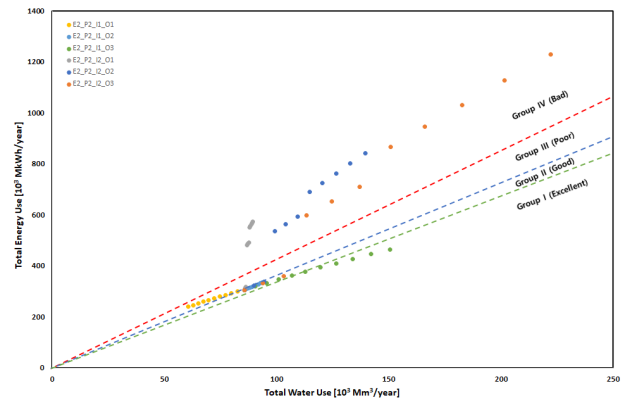


Fig. 6. The trajectory of total water and total energy use according to external effect and O&M level in normal city

오(E2-P2-I1-O3)에서는 총사용수량이 증가하였으나 효율적인 측면에서는 그룹 I (좋음)로 점차 개선되는 것으로 해석되었다. 이와 같이 결과를 통해 부정적인 외부영향은 도시물순환시스템의 효율적인 측면을 악화시키며, 부정적인 운영관리수준은 양적인 측면에서 악영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고 총사용수량과 에너지 사용량을 분석하는 경우 양적인 측면 분석에서는 적합한 방법이지만 효율적인 측면에서는 왜곡된 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 앞에서 언급된 총사용수량을 통해 분석하는 경우 물순환에 따른 왜곡이 발생할 수 있으며, 이와 같은 단점을 극복하기 위해 유수량과 또는 실사용수량과 기반의 분석이 같이 병행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 문헌에서 제시된 도시물순환시스템의 시스템 및 공정별 에너지 원단위를 조사하여 에너지 원단위 매트릭스를 구축하였고, 시스템 다이내믹스가 적용된 벡서스 모델을 개발하여 여러 요인 및 시나리오에 따른 도시물순환시스템 내에서 자원의 양적·질적 사용을 분석하였으며, 현재 도시의 상태를 벤치마킹 할 수 있는 기준을 제시하였다. 이를 통하여 벡서스 관점에서 도시물순환시스템의 효율적인 관리 전략 및 실행계획을 도출하는 것을 연구 목적으로 하였다.

첫 번째로 구축된 에너지 인텐시 매트릭스를 통하여 도시물순환시스템 관리자는 물을 사용하기 위해 시스템과 공정별로 필요한 에너지의 통계 범위를 알 수 있었다. 상수시스템과 하수시스템은 비슷한 에너지를 필요로 하였으며, 담수화와 용수 재이용은 에너지 집약적인 공정임을 정량적으로 알 수 있었다. 처리공정(정수처리, 하수처리)과 용수 이송 공정(지하수 취수, 도수, 배급수)은 일정 값 이상의 에너지가 필요하

였으며, 주로 중력을 에너지원으로 이용하는 하수 집수와 방류 시 필요 에너지는 매우 적은 값을 나타내었다. 두 번째로 도시여건, 외부영향, 운영관리수준의 개별적 변화에 따른 물-에너지 사용량 및 사용효율 변동 궤적을 분석하였다. 도시의 여건에 따라 궤적의 시작점은 다르게 나타났으며 사용량에 영향을 미치는 변수(인구, 1인당 일평균 물사용량 등)와 사용효율에 영향을 미치는 변수(지하수 취수율 변동, 신기술 도입, 원수 수입 등)로 분류될 수 있었다. 물손실은 다른 변수들과는 다르게 양적인 측면과 질적인 측면에서 모두 변화를 미치는 것으로 나타났다. 그리고 물손실이 크거나 변동이 있는 도시 물순환시스템의 경우, 기존의 총사용수량과 총에너지양을 기준으로 한 사용량 및 효율 검토와 더불어 우수수량과 실사용수량을 활용한 검토가 동시에 수행되어야 함을 알 수 있었다. 이를 통해 도시물순환시스템 관리자는 도시의 과거 통계 자료에 따른 물-에너지 궤적을 분석을 수행하여 주요 영향 요인을 도출할 수 있으며, 넥서스 관점에서 어떻게 시스템을 관리해야 하는지에 대한 일차적인 방향을 제시할 수 있다. 세 번째로는 에너지 원단위 매트릭스와 넥서스 모델에 기반한 도시 물순환시스템 기준을 제시하여 도시물순환시스템 관리자가 벤치마킹하고, 시스템의 문제점을 도출하며, 개선이 넥서스 관점에서 가능하도록 하였다. 마지막으로 해당 도시의 여건에 따라서 도시 물순환 시스템의 외부영향 및 운영관리수준 변동이 동시에 발생하는 시나리오 분석을 통해, 부정적인 외부영향과 운영관리수준은 도시물순환시스템의 효율적인 측면과 양적인 측면에 각각 악영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 기준에 기반한 물-에너지 궤적을 추적하여, 도입된 전략과 실행계획의 적합성 및 타당성에 대한 평가가 가능하며, 효율적인 전략 및 실행계획을 수립할 수 있다.

도시물순환시스템의 넥서스 개념은 지속가능한개발 목표에 도달하기 위해 부문 간의 상호연계를 정량화하고 평가할 수 있으므로, 지난 기간 동안 정부, 산업 및 연구자들에 의해 유익한 접근법으로 확인되었다. 그리고 앞으로 도시물순환시스템에 넥서스 관점을 정착하기 위해서는 다음과 두가지 문제들이 선결되어야 할 것이다. 해당 지역 및 개별 넥서스 모델들은 다양한 데이터와 정보를 요구하고, 각각의 모델의 장점과 제한사항은 서로 다르며, 특정 제약 조건에서만 합리적인 결과를 도출한다. 따라서 다양한 이해관계자의 조치를 평가하고, 조정하며, 의사결정을 용이하게 하기 위해 포괄적이고, 다용도적이며, 실용적이고, 널리 받아들여지는 넥서스 프레임워크와 방법론의 개발이 우선되어야 할 것이다. 그리고 현재 넥서스 개념이 학계, 기업, 기관, 정부 등에서 인기를 끌고 있지만, 연구 결과를 현장에서 적용하기 위한 방법은 많이 제

시되지 않고 있다. 기존의 많은 연구가 넥서스 관점에서 통찰력을 제공하는 것을 목표로 하는 반면, 거버넌스와 실현을 지원하기 위한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 넥서스 관점을 단순히 이해하는 것이 아니라 적용에 대한 연구가 향후 넥서스 연구의 중심 초점이 되어야 하며, 넥서스 연구가 지속적인 관심을 받기 위해서는 적용 단계에서 실질적인 성과를 입증할 필요가 있다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Amores, M. J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., and Castells, F. (2013). "Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 43, pp. 84-92.
- Anderson, J.M. (2006). "Integrating recycled water into urban water supply solutions." *Desalination*, Vol. 187, No. 1-3, pp. 1-9.
- Apostolidis, N. (2010). "Australian experience in water and energy footprints." *Water Practice and Technology*, Vol. 5, No. 4, wpt2010076.
- Armengot, L., Beltrán, M.J., Schneider, M., Simón, X., and Pérez-Neira, D. (2021). "Food-energy-water nexus of different cacao production systems from a LCA approach." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 304, 126941.
- Australian Government Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities (AGDSEWPC) (2010). *Moving water long distances: Grand schemes or pipe dreams*. accessed 10 July 2023, <<http://www.environment.gov.au/water/publications/action/pubs/moving-water.pdf>>.
- Bennett, B., Park, L., and Wilkinson, R. (2010). *Embedded energy in water studies: Statewide and regional water-energy relationship*. California Public Utilities Commission, San Francisco, CA, U.S.
- Buckley, C., Friedrich, E., and Von Blottnitz, H. (2011). "Life-cycle assessments in the South African water sector: A review and future challenges." *Water SA*, Vol. 37, No. 5, pp. 719-726.
- California Energy Commission (CEC) (2006). *2006 California Commercial End-Use Survey (CEUS)*. Sacramento, CA, U.S.
- Cheng, C.L. (2002). "Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building." *Energy and Buildings*, Vol. 34, No. 3, pp. 261-266.
- Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., and Sadiq, R. (2017). "Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: System dynamics approach." *Journal of Water Resources Planning and*

- Management*, Vol. 143, No. 6, 04017016.
- Choi, S.H., Shin, B., and Shin, E. (2022). "Managing apparent loss and real loss from the nexus perspective using system dynamics." *Water*, Vol. 14, No. 2, 231.
- Christoforidou, P., Bariamis, G., Iosifidou, M., Nikolaidou, E., and Samaras, P. (2020). "Energy benchmarking and optimization of wastewater treatment plants in Greece." *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 2, No. 1, 36.
- Chu, C. (2017). *Water-energy nexus in China and its implications for regional water and energy self-sufficiency*. Ph. D. Dissertation, University of Delaware, Newark, DE, U.S.
- City West Water (CWW) (2014). *Annual Report for the year ended*. Victoria, Australia.
- Cohen, R., Wolff, G., and Nelson, B. (2004). *Energy down the drain: The hidden costs of California's water supply*. Natural Resources Defense Council, Pacific Institute, Oakland, CA, U.S.
- Cooley, H., Gleick, P.H., and Wolff, G.H. (2006). "Desalination, with a grain of salt: A California perspective." Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, Oakland, CA, U.S.
- Daher, B., Mohtar, R.H., Lee, S.H., and Assi, A. (2017). "Modeling the water-energy-food nexus: A 7-question guideline." *Water-energy-food nexus: Principles and practices*, John Wiley and Sons, Inc, Washington, D.C., U.S., pp. 55-66.
- Dale, L. (2004). "Electricity price and Southern California's water supply options." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 42, No. 4, pp. 337-350.
- Danish Water and Waste Water Association (DANVA) (2014). *Water in figures 2014: DANVA Benchmarking 2014 - Process benchmarking and statistics*. Dansk Vand- og Splevedandsforening (DANVA). Godthåbsvej, Denmark.
- De Stercke, S., Mijic, A., Buytaert, W., and Chaturvedi, V. (2018). "Modelling the dynamic interactions between London's water and energy systems from an end-use perspective." *Applied Energy*, Vol. 230, pp. 615-626.
- Dimitriadis, S. (2005). *Issues encountered in advancing Australia's water recycling schemes*. Parliamentary Library Research Brief, Commonwealth of Australia.
- Electric Power Research Institute (EPRI) and Water Research Foundation (WRF) (2013). *Electricity use and management in the municipal water supply and wastewater industries*. Canada.
- Electric Power Research Institute (EPRI) (2002). *Water and sustainability: U.S. electricity consumption for water supply & treatment - The next half century*. Palo Alto, CA, U.S.
- Eltawil, M.A., Zhengming, Z., and Yuan, L. (2008). "Renewable energy powered desalination systems: Technologies and economics-state of the art. *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008*, Alexandria, Egypt, pp. 1-38.
- Endo, A., Kumazawa, T., Kimura, M., Yamada, M., Kato, T., and Kozaki, K. (2018). "Describing and visualizing a water-energy-food nexus system." *Water*, Vol. 10, No. 9, 1245.
- Fang, D., and Chen, B. (2017). "Linkage analysis for the water-energy nexus of city." *Applied Energy*, Vol. 189, pp. 770-779.
- Forrester, J.W. (1961). *Industrial dynamics; Wright allen series in system dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA, U.S.
- Forrester, J.W. (1968). "Industrial dynamics - After the first decade." *Management Science*, Vol. 14, No. 7, pp. 398-415.
- Friedrich, E. (2002). "Life-cycle assessment as an environmental management tool in the production of potable water." *Water Science and Technology*, Vol. 46, No. 9, pp. 29-36.
- Friedrich, E., Pillay, S., and Buckley, C.A. (2009). "Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: A case study." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-12.
- GEI Consultants (GEI) and Navigant Consulting (Navigant) (2010). *Embedded energy in water studies - study 2: Water agency and function component study and embedded energy-water load profiles*. California Public Utilities Commission Energy Division, Sanfrancisco, CA, U.S.
- Gleick, P.H. (2009). "Facing down the hydro-crisis." *World Policy Journal*, Vol. 26, No. 4, pp. 17-23.
- Goldstein, R., and Smith, W. (2002). *Water & sustainability (volume 4): US electricity consumption for water supply & treatment-the next half century*. Electric Power Research Institute, EPRI, 2, Palo Alto, CA, U.S.
- Griffiths-Sattenspiel, B., and Wilson, W. (2009). *The carbon footprint of water*. River Network, Portland, OR, U.S.
- Gude, V.G., Nirmalakhandan, N., and Deng, S. (2010). "Renewable and sustainable approaches for desalination." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 2641-2654.
- Hardy, L., Garrido, A., and Juana, L. (2012). "Evaluation of Spain's water-energy nexus." *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 28, No. 1, pp. 151-170.
- Huang, C., Li, Y., Li, X., Wang, H., Yan, J., Wang, X., Wu, J., and Li, F. (2018). "Understanding the water-energy nexus in urban water supply systems with city features." *Energy Procedia*, Vol. 152, pp. 265-270.
- International Desalination Association (IDA) (2012). *Desalination yearbook 2010-2011*. Danvers, MA, U.S.
- Javadifard, N., Khadivi, S., Motahari, S., and Farahani, M. (2020). "Modeling of water-energy-environment nexus by water evaluation and planning and long range energy alternative planning models: A case study." *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 39, No. 2, e13323.
- Kenway, S.J., Priestley, A., Cook, S., Seo, S., Inman, M., Gregory, A., and Hall, M. (2008). *Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand*. Water Services Association of Australia, Sydney, Australia.
- Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T., and Blevins, B. (2005). *California's water-energy relationship*. California Energy Commission, Sacramento, CA, U.S.
- Kling, C.L., Arritt, R.W., Calhoun, G., and Keiser, D.A. (2017). "Integrated assessment models of the food, energy, and water nexus: A review and an outline of research needs." *Annual Review of Resource Economics*, Vol. 9, pp. 143-163.
- Kneppers, B., Birchfield, D., and Lawton, M. (2009). *Energy-water*

- relationships in reticulated water infrastructure systems*. Report WA7090/2, Beacon Pathway Limited, Auckland, New Zealand
- Lam, K.L., Kenway, S.J., and Lant, P.A. (2017). "Energy use for water provision in cities." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, pp. 699-709.
- Lassaux, S., Renzoni, R., and Germain, A. (2007). "Life cycle assessment of water: From the pumping station to the wastewater treatment plant (9 pp)." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 12, No. 2, pp. 118-126.
- Lee, M., Keller, A.A., Chiang, P.C., Den, W., Wang, H., Hou, C.H., Wu, J., Wang, X., and Yan, J. (2017). "Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental impacts in relation to global water risks." *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 589-601.
- Lemos, D., Dias, A. C., Gabarrell, X., and Arroja, L. (2013). "Environmental assessment of an urban water system." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 54, pp. 157-165.
- Li, P.C., and Ma, H.W. (2020). "Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 157, 104789.
- Li, X., Liu, J., Zheng, C., Han, G., and Hoff, H. (2016). "Energy for water utilization in China and policy implications for integrated planning." *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 32, No. 3, pp. 477-494.
- Liu, J., Hull, V., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., Pahl-Wostl, C., Xu, Z., Chung, M.G., Sun, J., and Li, S. (2018). "Nexus approaches to global sustainable development." *Nature Sustainability*, Vol. 1, No. 9, pp. 466-476.
- Liu, J., Zang, C., Tian, S., Liu, J., Yang, H., Jia, S., You, L., Liu, B. and Zhang, M. (2013). "Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward." *Global Environmental Change*, Vol. 23, No. 3, pp. 633-643.
- Lofman, D., Petersen, M., and Bower, A. (2002). "Water, energy and environment nexus: The California experience." *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 18, No. 1, pp. 73-85.
- Los Angeles Department of Water and Power (LADWP) (2011). *Urban water management plan 2010*. Los Angeles, CA, U.S.
- Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E., and Bellon-Maurel, V. (2014). "Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature." *Water Research*, Vol. 67, pp. 187-202.
- Lubis, R.F., Delinom, R., Martosuparno, S., and Bakti, H. (2018). "Water-food nexus in Citarum watershed, Indonesia." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Bandung, Indonesia, Vol. 118, No. 1, 012023.
- Lundie, S., Peters, G.M., and Beavis, P.C. (2004). "Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning." *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, No. 13, pp. 3465-3473.
- Maas, C. (2009). *Greenhouse gas and energy co-benefits of water conservation*. POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria, Victoria, Canada.
- Maas, C. (2010). *Ontario's water-energy nexus: Will we find ourselves in hot water... or tap into opportunity?*. POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria, Victoria, Canada.
- Maddocks, A., Young, R.S., and Reig, P. (2015). Ranking the world's most water-stressed countries in 2040. World Resources Institute, Accessed 4 April 2022, from <<https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040>>.
- Majid, A., Cardenes, I., Zorn, C., Russell, T., Colquhoun, K., Bañares-Alcantara, R., and Hall, J.W. (2020). "An analysis of electricity consumption patterns in the water and wastewater sectors in South East England, UK." *Water*, Vol. 12, No. 1, 225.
- Marsh, D.M. (2008). *The water-energy nexus: A comprehensive analysis in the context of New South Wales*. Ph. D. Dissertation, University of Technology, Sydney, New South Wales, Australia.
- McMahon, J.E., and Price, S.K. (2011). "Water and energy interactions." *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 36, pp. 163-191.
- Miller, L.A., Ramaswami, A., and Ranjan, R. (2013). "Contribution of water and wastewater infrastructures to urban energy metabolism and greenhouse gas emissions in cities in India." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 139, No. 5, pp. 738-745.
- Mo, W., Wang, R., and Zimmerman, J.B. (2014). "Energy-water nexus analysis of enhanced water supply scenarios: A regional comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California." *Environmental Science and Technology*, Vol. 48, No. 10, pp. 5883-5891.
- Muñoz, I., Milà-i-Canals, L., and Fernández-Alba, A.R. (2010). "Life cycle assessment of water supply plans in Mediterranean Spain: the Ebro river transfer versus the AGUA Programme." *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 14, No. 6, pp. 902-918.
- National Research Council (NRC). (2008). *Desalination: A national perspective*. National Academies Press, Washington, D.C., U.S.
- Navigant Consulting (Navigant) (2006). *Refining estimates of water-related energy use in California*. Chicago, IL, U.S.
- Navigant Consulting (Navigant) (2014). *Water-energy cost effectiveness analysis: Public workshop presentation of work plan*. Chicago, IL, U.S.
- Nelson, G.C., Robertson, R., Msangi, S., Zhu, T., Liao, X., Jawajar, P. (2009). *Greenhouse gas mitigation: Issues for Indian agriculture*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C., U.S.
- New South Wales Government (NSW) (2012). *Sydney catchment authority answers to questions on notice*. Sydney, New South Wales, Australia.
- Olsson, G. (2012). "ICA and me-a subjective review." *Water Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 1585-1624.
- Olsson, G. (2015). *Water and energy: Threats and opportunities*. IWA publishing, London, UK.

- Pacetti, T., Lombardi, L., and Federici, G. (2015). "Water-energy Nexus: A case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 101, pp. 278-291.
- Pérez-Navarro Gómez, Á., Peñalvo López, E., Alfonso Solar, D., Cabrera Benito, S., Escuder-Bueno, I., Andrés-Doménech, I., Morales Torres, A., Perales-Momparler, S., Wade, R., Jefferies, C., Berwick, N., and Duffy, A. (2015). Report on energy in the urban water cycle, accessed 7 April 2021, <<https://www.iiama.upv.es/iiama/src/elementos/Proyectos/e2stormed/D.3A.01%20Report%20on%20energy%20in%20the%20urban%20water%20cycle.pdf>>.
- Plappally, A.K. (2012). "Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4818-4848.
- Porse, E., Mika, K.B., Escrivá-Bou, A., Fournier, E.D., Sanders, K. T., Spang, E., Stokes-Draut, J., Federico, F., Gold, M. and Pincetl, S. (2020). "Energy use for urban water management by utilities and households in Los Angeles." *Environmental Research Communications*, Vol. 2, No. 1, 015003.
- Poussade, Y., Vince, F., and Robillot, C. (2011). "Energy consumption and greenhouse gases emissions from the use of alternative water sources in South East Queensland." *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 11, No. 3, pp. 281-287.
- Qi, C., and Chang, N.B. (2011). "System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts." *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, No. 6, pp. 1628-1641.
- Racoviceanu, A.I., Karney, B.W., Kennedy, C.A., and Colombo, A.F. (2007). "Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems." *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 13, No. 4, pp. 261-270.
- Raluy, R.G., Serra, L., and Uche, J. (2005). "Life cycle assessment of water production technologies-part 1: Life cycle assessment of different commercial desalination technologies (MSF, MED, RO) (9 pp)." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 10 No. 4, pp. 285-293.
- Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H., and Jafari, S. (2020). "System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran." *Ecological Indicators*, Vol. 108, 105682.
- Rising, J. (2020). "Decision-making and integrated assessment models of the water-energy-food nexus." *Water Security*, Vol. 9, 100056.
- Rocheta, E., and Peirson, W. (2011). *Urban water supply in a carbon constrained Australia*. UNSW Water Research Centre, Sydney, New South Wales, Australia.
- Rothausen, S.G., and Conway, D. (2011). "Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector." *Nature Climate Change*, Vol. 1, No. 4, pp. 210-219.
- Sala, L., and Serra, M. (2004). "Towards sustainability in water recycling." *Water Science and Technology*, Vol. 50, No. 2, pp. 1-7.
- Sanders, K.T., and Webber, M.E. (2012). "Evaluating the energy consumed for water use in the United States." *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 3, 034034.
- Sanjuan-Delmás, D., Petit-Boix, A., Gasol, C.M., Farreny, R., Vilalba, G., Suárez-Ojeda, M.E., Gabarrell, X., Josa, A. and Rieradevall, J. (2015). "Environmental assessment of drinking water transport and distribution network use phase for small to medium-sized municipalities in Spain." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 87, pp. 573-582.
- Schroeder, J. (2012). "S-127: ISEE symposia: Improving the Linkages between air pollution epidemiology, qualitative science assessment, and quantitative risk assessment." *Epidemiology*, Vol. 23, No. 5S, S-380.
- Scott, C., Pasqualetti, M., Hoover, J., Garfin, G., Varady, R., and Guhathakurta, S. (2009). *Water and energy sustainability with rapid growth and climate change in the Arizona-Sonora border region*. Arizona Water Institute, Tempe, AZ, U.S.
- Shrestha, S. (2015). *Water-energy-carbon nexus in cities: Cases from Bangkok, New Delhi, Tokyo*. Water Energy Food Nexus: International Cooperation and Technology Transfer; Asian Institute of Technology, Paris, France.
- Siddiqi, A., and Anadon, L.D. (2011). "The water-energy nexus in Middle East and North Africa." *Energy Policy*, Vol. 39, No. 8, pp. 4529-4540.
- Smith, K., Liu, S., and Chang, T. (2016). "Contribution of urban water supply to greenhouse gas emissions in China." *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 20, No. 4, pp. 792-802.
- Stillwell, A.S., King, C.W., Webber, M.E., Duncan, I.J., and Hardberger, A. (2011). "The energy-water nexus in Texas." *Ecology and Society*, Vol. 16, No. 1, 2.
- Stokes, J.R., and Horvath, A. (2009). "Energy and air emission effects of water supply." *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, No. 8, pp. 2680-2687
- Sydney Metropolitan Catchment Management Authority (SMCMA) (2006). *Annual report*. Sydney, Australia.
- Sydney Metropolitan Catchment Management Authority (SMCMA). (2010). *Annual report*. Australia.
- Sydney Water Corporation (SWC) (2012). *Sydney water operating license environment report: Environment plan 2011-16 annual report environmental indicators report 2011-12*. Sydney Water, Sydney, Australia.
- Tajziehchi, S., Karbassi, A., Nabi, G., Yoo, C., and Ifaei, P. (2022). "A cost-benefit analysis of Bakhtiari Hydropower Dam considering the nexus between energy and water." *Energies*, Vol. 15, No. 3, 871.
- Tan, D., Hu, F., Thieriot, H., and McGregor, D. (2015). *Towards a water & energy secure China*. China Water Risk, Hong Kong.
- The City of San Diego (SD) (2015). *Climate action plan*. San Diego, CA, U.S.
- Twomey, KM, and Webber, ME. (2011). "Evaluating the energy intensity of the US public water system." *Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustaina-*

- bility. *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, Parts A, B, and C*. ASME, Washington, DC, U.S., pp. 1735-1748. doi: 10.1115/ES2011-54165.
- Van Dijk, A.I., Beck, H.E., Crosbie, R.S., de Jeu, R.A., Liu, Y.Y., Podger, G.M., Timbal, B., and Viney, N.R. (2013). "The millennium drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 2, pp. 1040-1057.
- Venkatesh, G., and Brattebø, H. (2011). "Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway)." *Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 792-800.
- Venkatesh, G., Chan, and., and Brattebø, H. (2014). "Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: Comparison of four city case studies and the relevant influencing factors." *Energy*, Vol. 75, pp. 153-166.
- Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., and Ahmad, B. (2016). "Energy consumption for water use cycles in different countries: A review." *Applied Energy*, Vol. 178, pp. 868-885.
- Wang, H., Yang, Y., Keller, A.A., Li, X., Feng, S., Dong, Y.N., and Li, F. (2016). "Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa." *Applied Energy*, Vol. 184, pp. 873-881.
- Wang, L., Chen, D., Liu, W., Ma, Y., Wu, Y., and Deng, Z. (2012). "DDDAS-based parallel simulation of threat management for urban water distribution systems." *Computing in Science & Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 8-17.
- Wang, S., Cao, T., and Chen, B. (2017). "Urban energy-water nexus based on modified input-output analysis." *Applied Energy*, Vol. 196, pp. 208-217.
- Wei, T., Lou, I., Yang, Z., and Li, Y. (2016). "A system dynamics urban water management model for Macau, China." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 50, pp. 117-126.
- Wen, C., Dong, W., Zhang, Q., He, N., and Li, T. (2022). "A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: A case study in Daqing City, China." *Science of The Total Environment*, Vol. 806, 150497.
- Western Resource Advocates (WRA) (2009). *Water conservation = Energy conservation: A report for the CWCB, Western Resource Advocates*. Boulder, CO, U.S.
- White, D.J., Hubacek, K., Feng, K., Sun, L., and Meng, B. (2018). "The Water-Energy-Food Nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis." *Applied Energy*, Vol. 210, pp. 550-567.
- Wilkinson, R. (2000). *Methodology for analysis of the energy intensity of California's water systems, and an assessment of multiple potential benefits through integrated water-energy efficiency measures*. University of California, Santa Barbara, CA, U.S.
- World Resources Institute (WRI) (2014). Water-energy nexus of urban water systems for Chengdu's low-carbon blueprint, Accessed 6 August 2021, <<http://www.wri.org.cn/Chengduwater>>.
- Xiao, Z., Yao, M., Tang, X., and Sun, L. (2019). "Identifying critical supply chains: An input-output analysis for food-energy-water nexus in China." *Ecological Modelling*, Vol. 392, pp. 31-37.
- Xie, J. (2009). *Addressing China's water scarcity: Recommendations for selected water resource management issues*. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington D.C., U.S.
- Xu, Z., Yao, L., and Chen, X. (2020). "Urban water supply system optimization and planning: Bi-objective optimization and system dynamics methods." *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 142, 106373.
- Yang, H., Yang, D., Lei, Z., and Sun, F. (2008). "New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 3, W03410.
- Younos, T., and Tulou, K.E. (2005). "Overview of desalination techniques." *Journal of Contemporary Water Research & Education*, Vol. 132, No. 1, pp. 3-10.
- Zappone, M., Fiore, S., Genon, G., Venkatesh, G., Brattebø, H., and Meucci, L. (2014). "Life cycle energy and GHG emission within the turin metropolitan area urban water cycle." *Procedia Engineering*, Vol. 89, pp. 1382-1389.
- Zarghami, M., and Akbariyeh, S. (2012). "System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 99-106.
- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., and Fu, G. (2018). "Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 195, pp. 625-639.

부 록

Table A1. Energy intensity matrix of urban water system

Statistics	Total			Abs.	Con.	Abs. Con	WT				Dis.	EU	WWC	WWT	WR	D
	Total	TDWS	TWWS	Abs_g	Con_s	Abs. Con	WT_all	WT_s	WT_g	WT_d	Dis	EU	WWC	WWT	WR	D
Mean	2.334	1.029	1.024	0.822	0.910	0.820	0.294	0.382	-	11.963	0.439	54.491	0.181	0.494	1.072	0.053
Average Error	0.728	0.212	0.277	0.178	0.211	0.185	0.099	-	-	4.691	0.110	51.297	0.080	0.044	0.238	0.014
Median	1.210	0.519	0.580	0.505	0.370	0.396	0.090	0.382	-	3.170	0.255	3.211	0.061	0.440	0.820	0.054
Mode	1.155	0.850	0.840	0.415	0.832	0.040	0.029	-	-	3.170	0.100	-	0.710	0.410	0.820	0.055
1st Quartile	0.865	0.357	0.470	0.372	0.150	0.048	0.029	-	-	1.197	0.136	3.161	0.037	0.300	0.588	0.038
3rd Quartile	1.690	0.903	0.840	0.874	1.813	1.636	0.298	-	-	5.450	0.385	157.100	0.140	0.711	1.445	0.068
Standard Deviation	3.492	1.646	1.327	0.794	1.099	0.927	0.560	-	-	30.761	0.762	102.593	0.264	0.246	0.860	0.034
Variation	12.191	2.708	1.760	0.630	1.208	0.860	0.314	-	-	946.217	0.580	10525.32	0.070	0.060	0.739	0.001
Kurtosis	13.661	26.006	8.237	4.636	1.513	-0.647	9.415	-	-	12.528	25.992	4.000	1.853	0.495	1.969	2.448
Skewness	3.584	4.594	3.008	2.197	1.448	0.968	3.098	-	-	3.595	4.764	2.000	1.846	1.037	1.608	-0.022
Range	15.900	11.210	5.190	3.110	4.070	2.624	2.385	0.000	0.000	142.486	4.890	205.220	0.689	0.942	2.947	0.106
Minimum	0.700	0.090	0.310	0.190	0.000	0.000	0.005	0.382	0.000	0.015	0.010	3.160	0.022	0.198	0.215	0.000
Maximum	16.600	11.300	5.500	3.300	4.070	2.624	2.390	0.382	0.000	142.500	4.900	208.380	0.710	1.140	3.162	0.106
Observations	23	60	23	20	27	25	32	1	0	43	48	4	11	31	13	6
Reference	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)	j)	k)	l)	m)	n)	o)	p)

- a) Mo *et al.* (2014), Hardy *et al.* (2012), Kenway *et al.* (2008), Amores *et al.* (2013), Lemos *et al.* (2013), Zappone *et al.* (2014), Miller *et al.* (2013), Venkatesh and Brattebø (2011), Racoviceanu *et al.* (2007), Maas (2009), Hardy *et al.* (2012), Kenway *et al.* (2008), Amores *et al.* (2013), Lemos *et al.* (2013), Zappone *et al.* (2014), Miller *et al.* (2013), Venkatesh and Brattebø (2011), Wang *et al.* (2016), Li *et al.* (2016), Maddocks *et al.* (2015), Cheng (2002), Lundie *et al.* (2004), Friedrich *et al.* (2009), Stillwell *et al.* (2011), Lassaux *et al.* (2007)
- b) Lam *et al.* (2017), Poussade *et al.* (2011), Hardy *et al.* (2012), Mo *et al.* (2014), CEC (2006), Cohen *et al.* (2004), Kenway *et al.* (2008), Majid *et al.* (2020), Tan *et al.* (2015), Maas (2009), Amores *et al.* (2013), Zappone *et al.* (2014), Lemos *et al.* (2013), Majid *et al.* (2020), Racoviceanu *et al.* (2007), Wang *et al.* (2016), Li *et al.* (2016), Maddocks *et al.* (2015), Olsson (2012), Miller *et al.* (2013), Stillwell *et al.* (2011), Venkatesh and Brattebø (2011), Lassaux *et al.* (2007), Navigant (2014), Cheng (2002), Venkatesh *et al.* (2014), Lundie *et al.* (2004), Loubet *et al.* (2014), DANVA (2014), Shrestha (2015), Friedrich *et al.* (2009), WRA (2009)
- c) Mo *et al.* (2014), Kenway *et al.* (2008), Amores *et al.* (2013), Kenway *et al.* (2008), Lemos *et al.* (2013), Venkatesh and Brattebø (2011), Miller *et al.* (2013), Friedrich *et al.* (2009), Hardy *et al.* (2012), Maas (2009), Lundie *et al.* (2004), Zappone *et al.* (2014), Racoviceanu *et al.* (2007), Cheng (2002), Stillwell *et al.* (2011), Wang *et al.* (2016), Li *et al.* (2016), Lassaux *et al.* (2007)
- d) McMahon and Price (2011), Anderson (2006), Maas (2009, 2010), Wang *et al.* (2012), Plappally (2012), Sala and Serra (2004), Tan *et al.* (2015), GEI and Navigant (2010), Liu *et al.* (2013), Gude *et al.* (2010), WRI (2014), Porse *et al.* (2020), Goldstein and Smith (2002), EPRI (2002)
- e) Raluy *et al.* (2005), Muñoz *et al.* (2010), Stokes and Horvath (2009), Dale (2004), Anderson (2006), Navigant (2006), SMCMA (2006, 2010), SWC (2012), NSW (2012), Klein *et al.* (2005), Cohen *et al.* (2004), Kneppers *et al.* (2009), Maas (2009), Kenway *et al.* (2008), Plappally (2012), Tan *et al.* (2015), Scott *et al.* (2009), AGDSEWPC (2010), GEI and Navigant (2010), Liu *et al.* (2013), EPRI (2002)
- f) LADWP (2011), CEC (2006), Klein *et al.* (2005), Olsson (2012), Plappally (2012), Eltawil *et al.* (2008), Sala and Serra (2004), Hardy *et al.* (2012), Shrestha (2015)
- g) Olsson (2012), Gleick (2009), Plappally (2012), Kenway *et al.* (2008), Porse *et al.* (2020), Buckley *et al.* (2011), Klein *et al.* (2005), Cohen *et al.* (2004), Kneppers *et al.* (2009), Maas (2009), Navigant (2006), Shrestha (2015), CEC (2006), LADWP (2011), SD (2015), CEC (2006)
- h) Goldstein and Smith (2002)
- i) Goldstein and Smith (2002), IDA (2012), NRC (2008), Younos and Tulou (2005), Plappally (2012), Liu *et al.* (2013), Sala and Serra (2004), Siddiqi and Anadon (2011), Tan *et al.* (2015), Rocheta and Peirson (2011), Xie (2009), SMCMA (2006, 2010), SWC (2012), NSW (2012), EPRI and WRF (2013), Stokes and Horvath (2009), Porse *et al.* (2020), Cooley *et al.* (2006), GEI and Navigant (2010)
- j) Stokes and Horvath (2009), Lam *et al.* (2017), Kenway *et al.* (2008), Friedrich (2002), Klein *et al.* (2005), Cohen *et al.* (2004), Kneppers *et al.* (2009), Maas (2009), Kenway *et al.* (2008), Navigant (2006), Rothausen and Conway (2011), Olsson (2015), Venkatesh and Brattebø (2011), LADWP (2011), SD (2015), CEC (2006), Liu *et al.* (2013), Miller *et al.* (2013), Smith *et al.* (2016), Cohen *et al.* (2004), Plappally (2012), Navigant (2014), Loubet *et al.* (2014), Hardy *et al.* (2012), Buckley *et al.* (2011), Cheng (2002), Eltawil *et al.* (2008), Shrestha (2015), Venkatesh *et al.* (2014), WRA (2009), CWW (2014), DANVA (2014)
- k) Cohen *et al.* (2004)
- l) Klein *et al.* (2005), Buckley *et al.* (2011), Kneppers *et al.* (2009), GEI and Navigant (2010), Maas (2009), CEC (2006), Navigant (2006)
- m) Kenway *et al.* (2008), GEI and Navigant (2010), Marsh (2008), Plappally (2012), Sala and Serra (2004), Klein *et al.* (2005), EPRI and WRF (2013), Hardy *et al.* (2012), Eltawil *et al.* (2008), Goldstein and Smith (2002), Cohen *et al.* (2004), Buckley *et al.* (2011), Cheng (2002), EPRI (2002), Yang *et al.* (2008), Liu *et al.* (2013), Gude *et al.* (2010), WRI (2014), Li *et al.* (2016), EPRI and WRF (2013)
- n) Cohen *et al.* (2004), Dimitriadis (2005), Plappally (2012), Sala and Serra (2004), Schroeder (2012), Lam *et al.* (2017), Poussade *et al.* (2011), Tan *et al.* (2015), Liu *et al.* (2013), GEI and Navigant (2010), Hardy *et al.* (2012), Eltawil *et al.* (2008), Klein *et al.* (2005)
- o) Klein *et al.* (2005), Eltawil *et al.* (2008), Cohen *et al.* (2004), Kneppers *et al.* (2009), Maas (2009), Kenway *et al.* (2008), Navigant (2006), Hardy *et al.* (2012)