

주제범위 문헌고찰을 통한 자연기반해법의 증거 활용 방안 탐색: 옥상녹화 도시 열 완화 효과 연구를 중심으로

김선혁* · 최재연** · 박찬***†

*서울시립대학교 조경학과 석사과정, **서울시립대학교 도시과학연구원 연구원,

***서울시립대학교 조경학과 교수/서울시립대학교 도시공학과 겸임교수

Strategies for evidence use in nature-based solutions: A scoping review on the urban heat mitigation effects of green roofs

Kim, Seon Hyuk* · Choi, Jae Yeon** and Park, Chan***†

*Student, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

**Researcher, Institute of Urban Sciences, University of Seoul, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea /
Adjunct Professor, Dept. Urban Planning and Design, University of Seoul, Seoul, Korea

ABSTRACT

Green roofs have been extensively studied for their potential to mitigate urban heat, establishing them as a widely recognized nature-based solution (NbS) for addressing climate and environmental challenges in cities. However, despite these research efforts, limited attention has been given to how these findings should inform decision-making processes. The disconnect between policy-making and technology development often creates barriers that hinder cities from effectively implementing sustainable urban solutions. This study aims to bridge this gap by examining how existing knowledge on green roofs can be leveraged for decision-making. We conducted a scoping review following the PRISMA-ScR checklist, focusing on the heat mitigation effects of green roofs as a leading NbS technology. Using the 5W1H framework, we identified key decision-making questions and synthesized research evidence by categorizing research questions. To support decision-making, we explored how research evidence aligned with these questions. Through this process, we identified and proposed 10 key decision-making questions along with relevant supporting evidence. Our findings indicate that green roof research has primarily focused on analyzing the effects of different types and conditions of green roofs and quantifying their effectiveness in combination with other heat mitigation technologies. As a result, existing studies have addressed only a few policy decision-making questions. These findings highlight the need for more research that directly informs practical decision-making, emphasizing an integrated approach that combines technology development with policy research. Such an approach is essential for building generalized knowledge and actionable recommendations, such as guidelines and standards, to support decision-makers and practitioners in planning and implementing successful green roof projects.

Key words : Green Roof, NbS, Heat Mitigation, Scoping Review, Decision Making Support

†Corresponding author : chanepark@gmail.com (No.204 Baebong-hall, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-6490-2489)

ORCID 김선혁 0009-0009-5595-1464
최재연 0000-0001-5837-6279

박 찬 0000-0002-4994-6855

1. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

도시에 영향을 미치는 각종 환경문제 및 기후변화 리스크는 안전하고 쾌적한 시민들의 삶 보장에 큰 위협이 되고 있다. 이를 해결하기 위해 많은 국가 및 도시들은 자연을 이용하여 사회문제와 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 강력한 접근방식인 자연기반해법(Nature based Solution, 이하 NbS)을 도입·확대하고 있다(IUCN, 2020). 그러나 NbS는 다양한 이해관계자의 참여, 다양한 형태와 접근방식, 수많은 적용 분야, 복합적인 이익과 목표 등으로 인해 의사결정을 더욱 복잡하게 만든다. 이는 여러 NbS의 여러 장점에도 불구하고 효과적인 실행 및 관리에서 중요한 과제로 작용한다(Geukes et al., 2024). 또한, Melanidis and Hagerman (2022)의 연구에서는 NbS의 모호성으로 인해 의사결정이 때로는 불공정하고 바람직하지 않은 결과를 초래할 수도 있음을 경고한다. 이러한 다양한 정보를 요구하는 NbS의 특성은 과학적인 연구정보와 의사결정 지식의 통합을 더욱 요구한다(Nesshöver et al., 2017). 즉, 성공적인 NbS의 확대를 통해 지속 가능한 환경을 조성하기 위해서는 의사결정에 대한 다양한 정보 요구사항을 파악할 필요성이 있다.

정책 의사결정과 과학적 연구정보의 결합을 방해하는 지식의 격차는 연구가 적시에 정책과 실무로 전환되지 못하게 만들어 부적절한 관리 및 정책 실행으로 이어지며 자원의 낭비를 발생시킨다(Dwivedi et al., 2024; Grimshaw et al., 2012). 더 나은 정책 의사결정을 위해 과학자들이 축적한 증거를 정책 입안자들이 잘 활용하게 하는 것이 필요하지만 정책 입안자들이 의사결정의 지원 없이 정보에 입각한 결정을 내리는 것을 어려워하고 이는 지식 격차가 되어 왔다(Khomsi et al., 2024; van Stigt et al., 2015). 이런 관점에서 볼 때, NbS 분야에서의 증거 활용은 특히 중요하다. 이는 NbS의 비용 효과성을 입증하며, 정책과의 정합성을 확인하고, 실질적인 실행 가이드를 제공함으로써 의사결정을 더욱 효과적으로 지원하기 때문이다(Rudd et al., 2024). 또한, 정책과 기술이 분리되어 개별적으로 적용되는 상황은 도시의 여러 문제를 통합적으로 고찰하고 지속 가능한 해결방안을 모색하는 데 한계를 가져올 수 있으므로, 도시 내에 점진적으로 증가하는 환경부담을 효과적으로 완화하기 위해서는 정책과 기술의 상호작용이 필수적이라고 보고된다(Degirmenci et al.,

2021). 따라서, 과학적 결과물을 종합하고 의사결정 시 증거의 활용방안을 탐구하는 것은 정책과 과학 간의 장벽 해소에 기여하고 새로운 과학적 통찰력을 제공할 수 있다(Guerin et al., 2022).

특히 옥상녹화 정책은 세계적으로 오랜 시간에 걸쳐 도입된 대표적인 NbS 중 하나로 특히 도시의 부족한 토지 문제를 극복할 수 있는 장점과 함께 탄소 저장, 폭우 관리, 대기질 개선, 생물다양성 증진, 열 스트레스 완화 등 기후변화 적응에 도움이 되는 NbS로 각광을 받아왔다(Saqib et al., 2024). 옥상녹화의 실제 가치를 이해하기 위한 많은 연구논문(Fang et al., 2023; Herath et al., 2023; Kim et al., 2024)뿐 아니라, 옥상녹화 효과평가 및 결과를 종합하는 리뷰논문(Jamei et al., 2021; Santamouris, 2014; Taleghani, 2018; Teotónio et al., 2021)들이 활발히 연구되었다. 다만 이 같은 리뷰논문의 목적은 주로 옥상녹화의 효과가 글로벌 차원에서 논의할 수 있도록 지역별, 기후대별 효과 차이의 정량화 및 종합에 집중했다. 이 같은 연구결과는 옥상녹화가 효과가 있으며 지속 가능한 환경을 위해 옥상녹화를 확대해야 한다는 담론에는 큰 기여를 했지만, 여전히 실무자들이 활용 가능한 지식은 부족하다고 지적되고 있다. 이 같은 문제는 효과적인 옥상녹화 확대에 큰 걸림돌이 되고 있기 때문에 이해관계자가 의사결정 시 생기는 의문을 충분히 해소해 줄 수 있는 기술적 표준, 방법론, 정책 등이 필요하다고 보고되고 있다(de Oliveira Santos et al., 2024).

이에 따라, 정책 결정을 고민하는 실무자와 과학 기술의 발전을 추구하는 연구자가 함께 활용하고 해석할 수 있는 접근법이 필요하다(Degirmenci et al., 2021). 이러한 관점에서, 연구결과와 과학적 발견에서 광범위한 사회적 채택까지의 연구 변화를 설명하기 위해 공중보건 분야에서는 T모델(Translational stage models)을 제시하였다. Guerin et al. (2022)의 연구에 따르면 Fig. 1과 같이 연구는 T1 단계부터 T4 단계까지 발전한다고 이 모델에서는 설명하며 T1에서는 내적 타당성 및 효능을 평가하여 최적의 조건에서 중재의 효과를 규명한다면 T2의 전환은 실제 상황에서의 효과성 연구가 포함된다. T3 연구는 계속해서 효과를 평가하지만, 실용적, 현실주의적 질문과 함께 평가가 지속되며 실행을 위한 실무적 권고 사항들이 촉진된다. 마지막으로 T4 단계의 연구에서는 긍정적이고 지속적인 건강 및 안전 결과에 대한 가장 일반화 가능한 지식을 개발하는 데 초점을 맞춘다. 이처럼 연구결과물들이 실용적, 현실주의적 질문의 관점에서 어

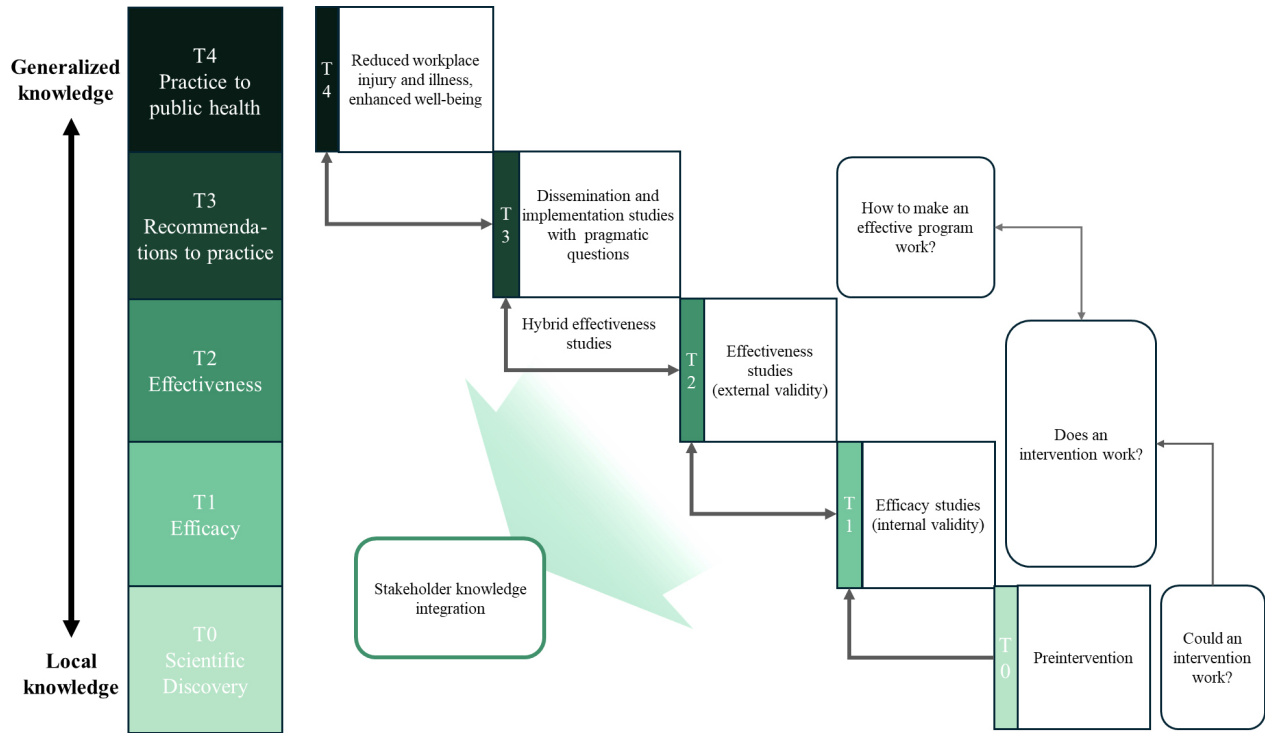


Fig. 1. The translational research cycle (adapted from Guerin et al., 2022)

떻게 활용될 수 있을지 고찰하는 것은 중요하며 이러한 전환 과학(translational science)의 개념은 공중보건뿐 아니라 산업안전, 생태학, 기후변화 적응 등 여러 분야에 걸쳐 확산하고 있다. 특히 회복력 있는 사회를 구축하는데 이러한 전환과학의 접근방식을 활용하는 것이 필요하고 입증된 구체적 조치를 권고하는 것이 기후변화 적응 관점에서도 중요하다고 보고되고 있다(Rubert-Nason et al., 2021).

따라서 이 연구에서는 육하원칙의 기반한 질문들을 활용해 의사결정자들이 옥상녹화와 관련된 의사결정 단계에서 필요한 정보를 추정하고, 이 과정에서 유형화된 증거가 활용될 수 있도록 연결하는 프레임워크를 활용한다. 육하원칙을 이용하는 방식은 체계적이고 일반적이며 보완적인 정보를 도출해 내며, 문제의 본질적인 요소를 빠르게 식별하고 명확히 이해하는 데 도움이 되는 도구로 다양한 분야에서 포괄적이고 체계적인 분석에 사용되는 방법이다(Su and Zhu, 2023). 또한, 실행계획(action plan)에는 무엇(What)을, 언제(When), 왜(Why), 누가(Who), 어디서(Where), 어떻게(How) 등의 질문에 답하는 5W1H의 내용을 포함하여야 하고, 이는 의사결정 프로세스를 지원

하는 공식으로서 연구의 결과를 실천으로 발전시키는 데 필요한 시간을 단축할 수 있다(Guerin et al., 2022; Salvador et al., 2021). 이 같은 프레임워크를 활용하여 의사결정자들이 얻고자 하는 정보 요구사항을 만족시켜 줄 연구결과들이 실제 존재하는지 연구 동향을 파악하는 것은 현존하는 연구 공백을 확인하고, 활용할 수 있는 증거를 식별할 수 있다는 점에서 중요하다.

따라서, 옥상녹화의 의사결정 시 활용할 수 있는 최신의 증거에는 무엇이 있는지 연구 동향을 구체적으로 조사한 주제범위 문헌고찰 연구(Scoping review) 역시 진행되어야 한다. 무엇보다도 옥상녹화를 더욱 통합적으로 이해하고, 도시에 적용, 관리하여 환경문제를 해결하고 사회적 비용을 낮추기 위해서는 보다 활용할 수 있는 증거와 증거기반 의사결정이 필요하다. 이에 본 논문에서는 옥상녹화의 열 완화 효과평가와 관련된 논문들을 대상으로 주제범위 문헌고찰을 통하여 자연기반해법 중 하나로 논의되고 있는 옥상녹화 관련된 의사결정 과정에서 활용할 수 있는 증거 유형을 파악하고자 한다. 이때, 투명성을 강화하고 방법론적 엄격성을 보장하기 위해 Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for

Scoping Reviews, PRISMA-ScR 지침(Tricco et al., 2018) 및 PICOS 연구 설계를 적용하여 주제범위 문헌고찰을 진행하였다.

이를 통해 밝혀내고자 하는 본 논문의 목적은 옥상녹화 열 완화 연구결과들을 의사결정 관점에서 활용할 수 있는 최신의 증거 유형에는 무엇이 있는지 탐색하는 것이다. 이는 지속 가능한 도시환경에 조성하는 데 있어 추후 필요한 후속 연구의 방향을 제시하고, 현재 존재하는 연구 공백을 파악할 수 있으며, 옥상녹화 연구결과들의 정책 의사결정 활용방안 및 연구 방향성을 확립에 기여할 수 있다.

2. 연구 방법 및 자료

2.1. 연구설계 및 연구 핵심질문의 설정

본 연구에서는 주제범위 문헌고찰을 통해 옥상녹화의 열 완화 효과에 대한 해외 논문의 결과를 종합하여 연구 결과들이 의사결정 과정에서 기여할 수 있는 최신의 근거 유형을 파악하고자 한다. 이때, 주제범위 문헌고찰(Scoping review)은 주제에 대한 증거를 매핑하고 주요 개념과 이론, 출처, 지식 격차를 식별하여 종합하는 체계적인 접근방식을 말한다. 특히 증거의 규모, 범위와 다양성, 성격 및 특성을 조사하여 지식의 결과를 요약하거나, 향후 연구에 도움이 되도록 문헌의 격차를 파악하여 연구주제의 폭넓은 이해를 도출해 내는 장점이 있는 방법이다(Tricco et al., 2018). 이 때문에 주제문헌 고찰 방법은 옥상녹화 의사결정 시 필요한 연구결과물의 증거 유형을 파악하고 연구가 더 필요한 분야를 도출해 내는 데에 적합한 방법이다.

연구의 재현성과 투명성을 확보하기 위해 주제범위 문헌고찰을 PRISMA-ScR의 지침을 준수하며 PICOS(Population, Intervention, Comparison, Outcome, Study design) 체계를 통해 문헌을 선별하였다. PICOS는 의료·보건 분야뿐만 아니라 환경 및 기후 적응 연구에서도 활용되며, 특히 녹지공간 확대나 기후 적응 기술과 같은 환경 개입의 효과를 평가하는 데 적용된다. 최근 NbS를 대상으로 한 리뷰 논문(Ferrario et al., 2024; van den Bosch and Ode Sang, 2017)에서도 PICOS 연구설계를 기반으로 한 연구 사례가 보고되고 있으므로 적절한 방법으로 사료된다.

PICOS 기준은 다음과 같다. P (Population) 연구대상은 도시 공간 내 옥상녹화를 대상으로 하는 논문들을 기준으

로 하였다. I (Intervention)에 연구개입의 경우 옥상녹화 적용을 평가하는 논문들을 선정하였다. C (Comparison) 비교집단의 경우 전후 비교 및 대조군 실험의 연구, 모델링 연구 등 반사실적 상태(counterfactual)를 고려한 연구들을 포함하였다. O (Outcomes) 개입결과의 경우 정량적으로 온도, 에너지, 열의 증감에 대해 제시한 연구들만 포함시켰다. S (Study design) 연구 설계에 있어서 정량적인 분석 방법을 사용한 연구로 한정하였으며, 시뮬레이션 방법, 유사준실험방법을 활용한 논문들을 선택했고 추가적으로 정량적인 결과를 도출해낸 논문들을 포함했다.

연구의 흐름은 다음과 같다. 주제범위 문헌고찰을 통한 선정 내용 추출, 연구질문 유형화를 통한 증거식별, 문헌고찰을 통해 반복적으로 도출된 키워드를 식별하고 이를 기반으로 5W1H 프레임워크를 적용하여 의사결정 질문을 체계적으로 선정, 연구질문과 의사결정 질문의 연계를 통한 증거 활용 방향성 탐색이다(Fig. 2).

주제범위 고찰을 위해 선별된 논문들을 대상으로 다음과 같은 내용을 추출하였다. 1. 논문의 학회지, 2. 논문의 연구 대상지역, 3. 효과평가에 쓰인 논문의 방법, 4. 논문에서 측정한 공간적 규모, 5. 옥상녹화 효과의 보고, 6. 논문의 연구목적 등이다. 각 분석 항목에 있어 다수의 항목이 존재하는 논문의 경우 중복으로 기재하였다. 논문의 학회지, 출판연도, 연구 대상지역의 경우 논문에 기재된 정보를 토대로 추출하였다. 효과평가에 쓰인 논문의 방법은 크게 사전평가(시뮬레이션 방법), 사후평가(관측 방법)로 나누고 그 안에서 사용한 세부방법을 정리하였다. 이 평가 방법의 기준은 World Bank의 영향평가 지침서(Gertler et al., 2016)를 근거로 하였다. 이 문헌은 영향평가 분야에서 신뢰할 수 있는 참고 자료로 자주 인용되며 최신 평가 기법을 정리한 중요한 자료로 활용되고 있다. 논문별 측정의 공간적 규모는 축소모형, 건물, 근린단위, 도시 규모 4가지로 구분하였으며 옥상녹화의 효과의 보고에 경우 논문에 서술된 효과의 유무를 바탕으로 하여 정리하였다. 마지막으로 논문의 연구목적의 경우는 내용 전문검토를 통해 논문의 연구질문을 정의함으로써 파악하였다.

의사결정자가 연구 결과를 효과적으로 활용할 수 있도록, 식별된 증거의 의사결정 지원 범위를 파악하고자 증거를 유형화하였다. 이후, 유형화된 증거를 5W1H에 기반한 의사결정 질문과 연계하여, 각 증거가 직접적으로 또는 간접적으로 관련 정보를 제공하는지를 분석하였다. 아직 옥상녹화를 포함한 NbS 실행에 있어 서로

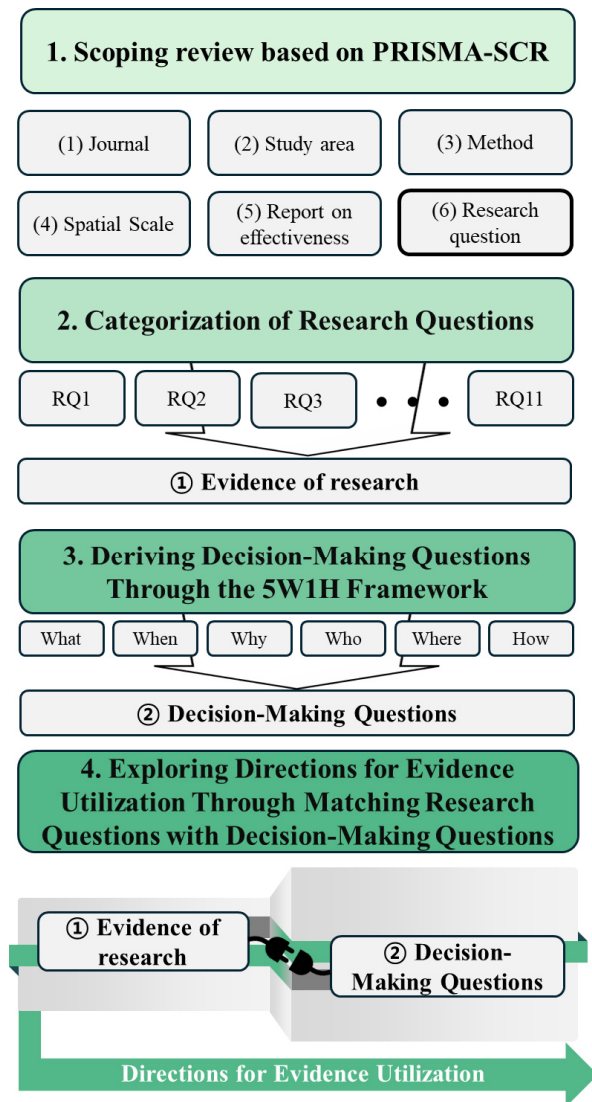


Fig. 2. Research flow

다른 의사결정 단계 및 프레임워크가 연구되고 있으므로(Cohen-Shacham et al., 2019), 유형화된 증거를 특정한 의사결정 단계에 일반화하여 적용하는 것은 어려운 과제이다. 따라서, 5W1H (육하원칙)에 기반한 질문을 활용하여 의사결정 과정에서 발생할 수 있는 대표적인 정보 요구사항을 도출하고자 하였으며 이때, 문헌 고찰을 통해 반복적으로 나타난 주요 키워드를 고려하여 질문을 설정하였다.

2.2. 문헌 검색 및 선정

문헌 선정에 있어서는 PRISMA 가이드라인에 따라

(Fig. 3) 체계적으로 진행했으며 가이드라인에서 제시한 ‘검색’, ‘선별’, ‘선정’, ‘포함’ 4단계를 수행하였다. 최종 분석 대상으로 선정된 문헌은 앞서 제시된 PICOS 기준에 따라 61편을 선정하였다. 본 연구의 검색 데이터베이스로는 ScienceDirect를 이용하였으며, Science Direct는 Elsevier가 운영하는 세계 최대의 온라인 출판 과학 연구 모음집이자 동시에 온라인 학술 인용 색인이다. 또한, 체계적 문헌 고찰을 위해 많은 연구에서 이용하고 있는 저명한 학술사이트이다. 검색은 2024년 4월 5일을 기준으로 완료했으며, 옥상녹화 연구가 집중적으로 생산된 시기의 근거를 파악하기 위해 2010년부터 출판된 약 15년의 출판물을 대상으로 했다. 이는 2000년대 초반부터 옥상녹화 관련 논문이 관심을 받기 시작했으며 2010년도 초반에 연구 관심이 본격적으로 증가하였다는 사실에 근거했다(Li et al., 2024; Shafique et al., 2018; Zhang and He, 2021). 언어의 경우 모두 영어로 작성된 논문만을 대상으로 했으며 동료 검토를 거친 검증된 출판 논문만을 기준으로 했다. 연구에서 사용한 검색어로는 “green roof”로 선정하였고 검색 키워드로는 “cooling effects”, “heat mitigation”, “temperature”로 선정하였다. 논문 검색은 “green roof”를 전체 텍스트 검색창(Find articles with these terms)에 입력하고, 논문의 제목, 초록, 키워드에서 “cooling”, “heat mitigation”, “temperature”가 모두 포함된 논문을 찾는 방식으로 수행하였다. 이를 위해, 검색문은 다음과 같이 설정하였다: “green roof” (Find articles with these terms) AND (“cooling” AND “heat mitigation” AND “temperature”) (Title, abstract, or author-specified keywords). 검색과정은 파이썬 자동화 코드를 이용하여 모든 논문을 수집하였고 이를 통해 수집한 최종 논문의 개수는 403개였다.

구체적인 문헌 검색의 단계는 다음과 같다. 첫 번째 단계로 연구의 초록 검토를 바탕으로 403개의 논문 중 328개의 논문이 제외되었다. 이 들은 옥상녹화를 대상으로 하지 않거나, 미기후 조절과 관련된 연구내용이 아니거나, 외부공간 측정이 없는 경우는 제외되었다. 그 후 75건의 논문에 대해 전문 검토를 진행했으며 옥상녹화 관련된 논문이 아닌 3건, 옥상녹화의 효과를 분리하여 평가하지 않은 5건, 실제로 연구에서 옥상녹화의 효과를 측정하지 않은 6건이 제외되었으며, 61건의 논문이 연구 설계에 따른 분석 대상으로 적합한 논문으로 최종 선정하였다.

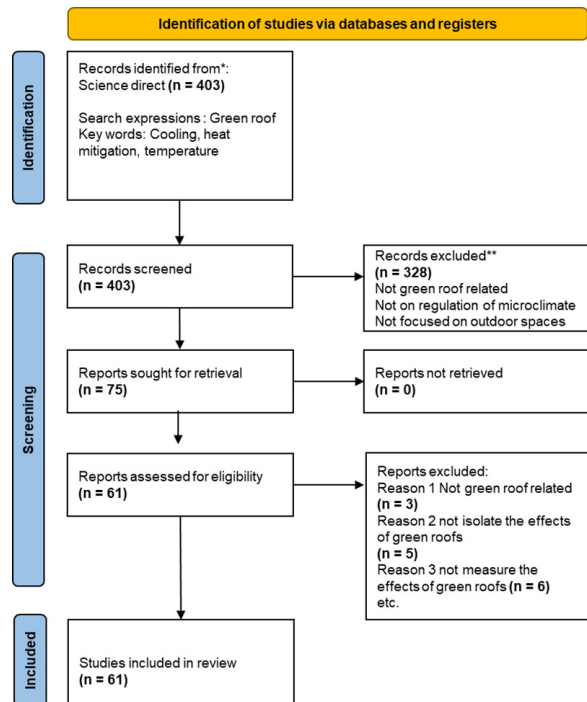


Fig. 3. Article screening and selection process based on PRISMA guidelines

2.3. 분석 대상에 포함된 문헌 학회지 및 연구대상지

문헌 검토 과정으로 선정된 논문들의 학회별 분포 개수를 분석한 결과(Fig. 4) 21개의 학회지에서 출판된 논문들이 분석대상을 확인할 수 있었다. 가장 많은 학회지는 Building and Environment 15건으로 건축 환경과 지속가능한 발전에 대한 목표 및 범위를 가지고 있는 학회지로 확인되었다. 그다음 학회지로는 Energy and Buildings 7건으로 동일하게 건축과 관련된 학회지로 에너지 분야를 초점으로 가지고 있는 학회지이다. 또한, 다른 학회지들을 보았을 때 건물환경 외에도 도시녹화 및 조경, 도시기후, 도시계획, 생태공학, 종합과학 측면을 중점으로 하는 학회지들이 속해 있었다.

주제범위 문헌검토 대상으로 전 세계의 22개 국가의 옥상녹화 연구들이 포함되었음이 확인되었다. 최다 논문의 대상 지역으로는 중국이 13건으로 가장 많은 연구 대상지임이 확인되었으며(Fig. 5) 이탈리아, 미국, 호주 등을 대상으로 하는 연구들이 존재하였다.

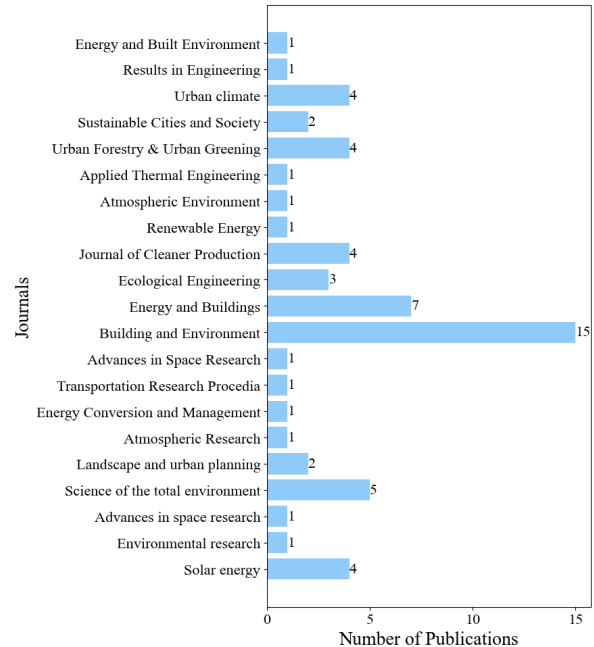


Fig. 4. Journals sourced from papers

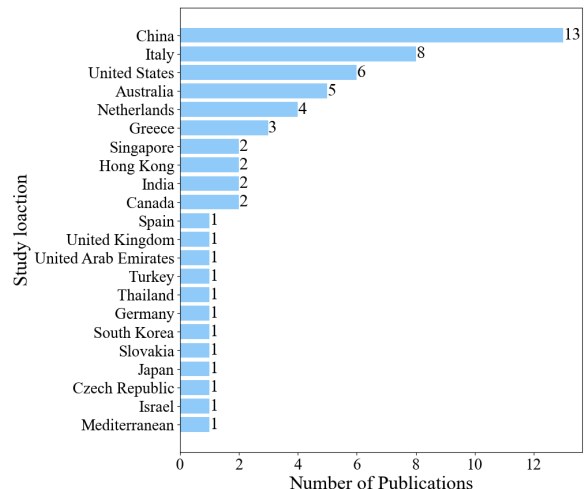


Fig. 5. Geographic distribution of papers

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 논문에서 사용한 효과평가 방법론

먼저 사전평가를 위한 시뮬레이션 방법에 경우 45건이 있으며, 미기후의 변화를 평가하는 전산유체역학 모델인 ENVI-MET이 15건으로 가장 많이 채택된 모델이었다. 대

표적 연구로 Ciacci et al. (2023), Schibuola and Tambani (2022), Zheng et al. (2023) 등이 확인되었다. 다음으로는 대규모 대기 상태 변화를 모의하는 Weather Research and Forecasting(WRF) 모델을 사용한 연구가 두 번째로 많았으며 Chen et al. (2023), Tan et al. (2023), Wang et al. (2023) 등의 연구가 해당되었다. 건축물의 에너지 사용변화를 중점적으로 평가하는 Energy plus 모델 세 번째로 많이 사용되었다(Fig. 6). 그 외에도 목적에 따라 인공지능 방법이 사용된 연구(Mazzeo et al., 2023)가 존재 하였으며, 연구자 본인들이 개발한 모델을 사용하는 경우도 있었다. 이러한 사전평가 연구 중 21건은 실제 모니터링 데이터를 통해 현실을 얼마나 정확하게 모의했는지 평가하는 과정을 거쳤으며 시뮬레이션 연구에서는 결과의 신뢰성 확보를 위해 이러한 단계가 매우 중요한 것으로 분석되었다.

그 다음으로는 사후평가의 연구에 대한 방법으로 모델 검증에 위한 모니터링 과정(21건)을 제외한다면, 17건으로 확인이 되었다. 전체 현장 측정 방법보다 연구자가 실험환경을 최대한 제어하고 다양한 환경을 적용해 볼 수 있는 축소모형 실험이 총 8건으로 사후평가 방법 중 가장 선호되었으며 대표적 논문은 Meetam et al. (2020), Sookhan et al. (2018) Tanaka et al. (2016) 등이 존재하였다. 전체 현장 측정 방법의 경우는 6건으로 대표연구(Karachaliou et al., 2016; Smalls-Mantey and Montalto, 2021; Solcerova et al., 2017) 등을 확인할 수 있었으며 측정의 한계로 인해 소수의 대형 옥상녹화를 대상으로 하는 경우가 많았으며, 위성영상 등 원격탐사를 활용한 도시의 옥상녹화를 대상으로 한 사후평가는 3건(Dong et al., 2020; McConnell et al., 2022; Zuo et al., 2022)이 확인되었다.

연구 방법을 검토한 결과, 옥상녹화의 효과를 평가하는 시기와 방법은 다양하게 나타났다. 사전평가의 경우, 시뮬레이션을 활용하여 효과를 예측하는데, 사용되는 모델은 성능, 목적, 구동 방식에서 차이를 보였다. 일부 모델의 높은 복잡성은 전문가가 아닌 의사결정자들이 결과를 이해하는 데 어려움을 초래할 수 있다. 따라서, 다양한 모델을 통합하거나 표준화된 모델을 개발하여, 의사결정자가 보다 직관적으로 이해할 수 있는 정보 제공이 필요할 것으로 보인다. 사후평가에 경우 사전평가와는 다르게 실제측정을 통해 효과를 추정하므로 의사결정자들이 결과를 이해하는 측면에서는 유리할 것으로 보이나, 실험설계의 특성상 여러 대상지를 동시에 측정하거나 큰 규모의 측정이

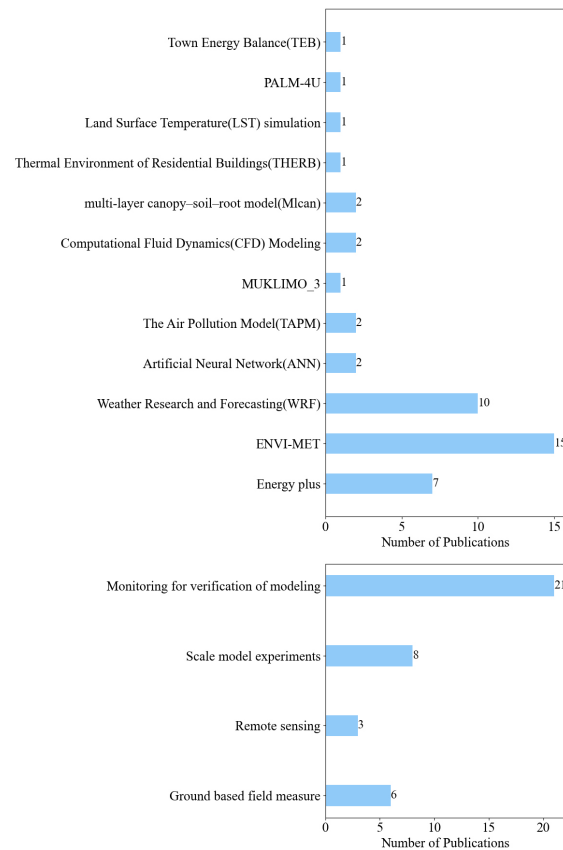


Fig. 6. Research design and methods

제한적이어서 일반화된 정보를 생산하기 어렵다. 위성영상 혹은 라이다 등을 활용한 광범위 사후평가의 경우 주로 표면 온도에 초점을 맞추므로 온도, 습도, 열스트레스 지표 등 정보를 취득한 연구들은 제한적이었다. 데이터 합성 혹은 광범위 모니터링 네트워크 구축 등을 시도해 효과에 대한 일반화된 정보 생산에 노력이 필요할 것으로 보인다. 위와 같은 평가 방법의 다양성은 결과에 대한 비교와 논의를 어렵게 하고 추가적인 의사결정 정보 생산에 있어 정보가 통합되지 못하게 하는 요인으로 작동될 수 있으므로 향후 연구는 표준화 및 일반화된 정보의 생산을 위한 접근법들이 필요하다.

3.2. 옥상녹화 열 완화 효과의 공간적 측정 규모

논문의 측정 규모로 크게 4가지의 유형으로 구분할 수 있었다. 축소모형 규모(Scale model)에 경우 11건(예: He et al., 2020; Meetam et al., 2020; Sookhan et al., 2018)의 연구가 존재하였으며 다양한 매개변수의 변화에 따른 현

실 데이터를 얻고자 하는 논문에서 설정하고 있는 측정 규모였다. 건물 단위(Building scale)의 효과가 22건(예: Costanzo et al., 2016; Jia and Wang, 2021; Kolokotsa et al., 2013)으로 가장 많은 측정 규모로 연구가 되고 있었으며, 건물 측정 규모 연구는 온도 감소 효과와 에너지 감소 효과가 같이 평가되는 논문들(Costanzo et al., 2016; Peng et al., 2019; Yang et al., 2018)이 다수 존재하였다. 여러 건물군의 공간 범위에서 측정된 근린 단위 규모(Neighborhood scale)의 효과는 15건(예: Gromke et al., 2015; Ng et al., 2012; Taleghani et al., 2019)이었으며 단순 건물 옥상녹화의 효과와는 다르게 근린 단위 공간 규모에서는 옥상녹화의 미기후 조절 효과가 주된 관심사였다. 도시 규모(City scale) 연구는 19건(예: Liu et al., 2018; Lynn and Lynn, 2020; Zuo et al., 2022)으로 더 넓은 공간 규모인 도시 내에서 옥상녹화가 확장된 상황을 시나리오로 설정하거나, 이미 확장된 데이터를 바탕으로 도시 전체 차원에서 열 완화 효과를 측정하였다. 공간적 측정 규모 분류 결과 총 67건으로 확인이 되었는데 이는 다음과 같은 연구(Chidambaram et al., 2022; Ciacci et al., 2023; Lee et al., 2024; Razzaghamanesh et al., 2016; Taleghani, Tenpierik, and van den Dobbelsteen, 2014; Taleghani, Tenpierik, van den Dobbelsteen, and Sailor, 2014)가 2가지 측정 규모로 실험을 진행한 것으로 확인되었다(Fig. 7).

3.3. 옥상녹화 열 완화 효과의 보고

Fig. 8은 각 논문의 옥상녹화 열 완화 효과의 보고에 대해 정리한 결과이다. 열 완화에 효과가 있다고 보고한 논문은 51건으로 약 84% 비율의 논문에서 효과성에 대해 보고하고 있었다. 그 외에 10건인 논문에서는 효과 없음을 보고한 논문 3건(Gromke et al., 2015; Solcerova et al., 2017; Taleghani et al., 2019)과 효과가 미미하거나 특정 조건에서만 효과가 있다고 보고한 7건 연구(Coutts et al., 2013; Geletić et al., 2022; McConnell et al., 2022; Pigliautile et al., 2020; Santamouris et al., 2018; Wang et al., 2023; Zuo et al., 2022)가 존재하였다. 건물 높이가 높아지면서 보행자를 대상으로 온도 완화 효과가 없다고 보고하거나, 특정 식물, 공간적 특성, 기후대 특성, 시간대에 따라 효과가 미미 혹은 온난화가 발생했다고 언급했다. 효과의 대상, 옥상녹화 기술의 유형, 기후적 특성, 설치된 공간의 특성, 효과평가 방법 등의 차이로 인해 효과들이

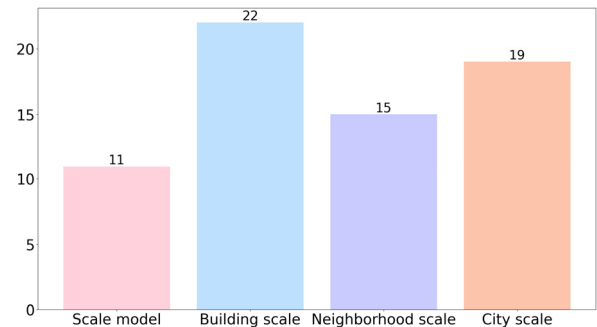


Fig. 7. The spatial scale targeted by studies

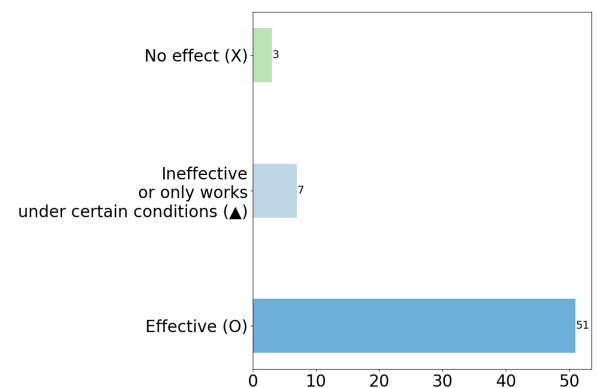


Fig. 8. Number of reports on the effectiveness of green roofs

다르게 보고되고 있으므로 해석에 유의할 필요가 있다. 지역 정책개발 및 의사결정을 위해서는 지역 환경에 맞는 사례들을 효과평가하고 모니터링이 더욱 필요할 것으로 사료된다.

3.4. 연구질문 유형화를 통한 의사결정 활용 가능한 증거 탐색

3.4.1. 연구질문 유형화

옥상녹화 열 완화 효과평가와 관련된 61개 논문의 연구 질문은 총 85개가 추출되었으며 이를 유형화해 보았을 때, 11개의 연구질문 유형으로 나눌 수 있었다(Table 1). 먼저, 전체 연구 중 약 21%에 해당하는 18건은 옥상녹화의 설계, 유형, 조건 변화가 효과에 미치는 영향을 평가하는 연구로, 옥상녹화의 실행 및 적용 조건 변화에 대하여 초점이 맞춰져 있었다. 가장 많은 연구가 포함된 RQ2 유

Table 1. Categorizing research questions

Type of Research Question (RQ)	Contents of research question	Number of publications	publications to categorizing research questions
RQ1. Green Roof Type and Condition Assessment	How does the cooling effect or energy saving effect of green roof can be changed depending on the conditions?	18	Chabada and Durica (2023), Coutts et al. (2013), Tan et al. (2015), Tanaka et al. (2016), Smalls-Mantey and Montalto (2021), Ciacci et al. (2023), D'Orazio et al. (2012), Karachaliou et al. (2016), Peng et al. (2019), William et al. (2016), Sookhan et al. (2018), Razzaghmanesh et al. (2016), Meetam et al. (2020), Zheng et al. (2023), McConnell et al. (2022), Suter et al. (2017), Iaria and Susca (2022), Chidambaram et al. (2022)
RQ2. Green Roof and Technology Comparative & Synergistic Assessment	How do the effects of green roof differ from the effects of other techniques, including how it differs when they are combined?	35	Kolokotsa et al. (2013), Pisello et al. (2015), Yang et al. (2018), Taleghani et al. (2019), Ziaul and Pal (2020), Berardi (2016), Liu et al. (2018, 2022), Lynn and Lynn (2020), Tan et al. (2023), Herath et al. (2021, 2023), Dandou et al. (2021), Diren-Üstün et al. (2024), Ng et al. (2012), Gromke et al. (2015), Taleghani, Tenpierik, and van den Dobbelsteen (2014), Taleghani, Tenpierik, van den Dobbelsteen, and Sailor (2014), Jia and Wang (2021), Wang et al. (2022, 2023), Geletić et al. (2022), D'Orazio et al. (2012), Costanzo et al. (2016), Santamouris et al. (2018), Schibuola and Tambani (2022), William et al. (2016), He et al. (2020), Zhu et al. (2021), Pigliautile et al. (2020), Zhong et al. (2021), Perini and Magliocco (2014), Iaria and Susca (2022), Chen et al. (2023), Elnabawi et al. (2023)
RQ3. Plant Species Selection Impact Assessment	What plant species should be selected for green roof based on cooling effect, survival rate, etc.	6	Solcerova et al. (2017), Klein and Coffman (2015), Coutts et al. (2013), Tan et al. (2015), Sookhan et al. (2018), Meetam et al. (2020)
RQ4. Advanced Measurement Tool Assessment	What tool developments can improve the assessment of green roofs	3	Diren-Üstün et al. (2024), Heidarinejad and Esmaili (2015), Mazzeo et al. (2023)
RQ5. Quantity Requirement Assessment	How many green roof should be installed to mitigate urban heat island effect?	2	Yang and Bou-Zeid (2019), Ziaul and Pal (2020)
RQ6. Spatial Effectiveness Assessment	Where should green roof be installed to achieve the greatest effects?	7	Fang et al. (2023), Ziaul and Pal (2020), Zuo et al. (2022), Asadi et al. (2020), Schibuola and Tambani (2022), Zhu et al. (2021), Iaria and Susca (2022)
RQ7. Cooling Extent Assessment	How far can the cooling effect of a green roof be extended?	3	Dandou et al. (2021), Dong et al. (2020), Lin et al. (2021)
RQ8. Future Impact Assessment	How will the cooling/energy-saving effects of green roof be differentiated under future climate change conditions?	3	Liu et al. (2018, 2022), Lee et al. (2024)

Table 1. Categorizing research questions (Continued)

Type of Research Question (RQ)	Contents of research question	Number of publications	publications to categorizing research questions
RQ9. Seasonal Impact Assessment	How does the effectiveness of green roof change with the seasons?	3	Taleghani, Tenpierik, van den Dobbelsteen, and Sailor (2014), Sookhan et al. (2018), He et al. (2020)
RQ10. Beneficiary Assessment	Who benefits from green roof?	7	Ng et al. (2012), Gromke et al. (2015), Jia and Wang (2021), Wang et al. (2023), Pigliautile et al. (2020), Zheng et al. (2023), Iaria and Susca (2022)
RQ11. Economic Impact Assessment	How much economic benefit does green roof provide?	1	Lee et al. (2024)

형은 전체 연구의 41%를 차지하는 35건으로, 옥상녹화 기술과 다른 기술의 효과를 비교하거나 조합의 시너지 효과를 평가하는 내용을 다루었다. 다음으로, 약 7%를 차지하는 RQ3 유형에서는 6건의 연구가 옥상녹화에서 사용되는 식물의 수종 선택이 효과에 미치는 영향을 평가하였다. RQ4 유형은 전체 연구 중 3건으로 전체의 3%를 차지하며, 옥상녹화 효과평가를 위한 새로운 도구를 개발하거나 기존 도구를 평가하는 데 초점을 두었다. 또한, 열섬 완화 효과를 위해 얼마나 많은 옥상녹화를 설치해야 하는지 설치 규모를 평가하는 RQ5 연구는 2건으로, 전체의 약 2%를 차지하였다. RQ6 유형에서는 전체 연구의 8%에 해당하는 7건이 옥상녹화를 설치할 최적의 위치를 평가하며, 공간 유형과 기술 간의 관계를 분석하였다. 이와 유사하게 RQ7 유형의 연구는 3건으로, 옥상녹화의 공간적 효과 범위를 평가하였다. 미래 기후변화 상황에서 옥상녹화 효과가 유지될 가능성을 평가한 RQ8 연구와 시간적, 계절적 변화에 따른 효과 변화를 다룬 RQ9 연구는 각각 3건으로, 옥상녹화 효과의 지속 가능성과 계절적 특성에 대한 이해를 높이는 데 기여하였다. 옥상녹화 효과의 수혜자를 분석한 RQ10 유형은 7건의 연구로 구성되었으며, 옥상녹화의 경제적 혜택을 정량적으로 평가한 RQ11 유형은 단 1건(1%)으로, 가장 적은 연구가 포함된 유형이었다. 이와 같이, 연구 질문별 분포를 통해 옥상녹화 연구의 다각적인 접근과 특정 주제에 대한 연구 집중도를 확인할 수 있다.

가장 집중된 증거 유형에 경우 RQ1, RQ2 2가지 유형에서 생산된 것으로 전체 연구목적에서 약 62%를 차지한다. 이는 무엇을 하면 어느 정도 효과가 있는지에 대하여 조건 및 기술조합, 평가방법, 기후대 등 서로 다른 조건에서의 옥상녹화 효과평가한 것으로 여러 조건 상황에서 다

양한 정보를 생산한다. 특히 옥상녹화 기술적용 범위가 다양하고, 연구 별 평가방법 및 실험조건이 상이하여 차이가 있는 결과들이 도출되는 경향으로 이어진다. 이러한 정보의 다양성은 일반화되고 명확한 정보를 원하는 의사결정자들이 실제 정책에 반영하기에는 해석의 어려움이 존재할 가능성이 있다. 따라서 앞으로 연구자들은 연구결과가 어떠한 의사결정에 활용될 수 있을지 해석이 가능하게 연구결과물을 제시하는 것이 필요하며, 특히 표준화된 효과 보고, 방법 등에 대한 추후 연구가 필요하다. 연구를 종합하고 옥상녹화 확대의 성공적 관행에 대한 시사점이 정리되어야 실제 의사결정 지원에 사용될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 효과 정량화와 연계된 옥상녹화의 편익 산출 연구, 옥상녹화 목표 설치량 설정 등 비교적 부족한 연구들이 보완되어 필요한 의사결정 정보 생산할 필요가 있다.

다양한 연구분야에서 채택된 이러한 T 모델에 따라 고찰해 보았을 때(Fig. 1), RQ1, RQ2에 집중된 연구 경향성(총 85건 중 53건)은 열 저감 효과평가를 집중으로 한 옥상녹화의 연구가 아직 T2 단계에 해당되고 있음을 시사한다. 이는 옥상녹화의 냉각 효과가 배경기후뿐 아니라 설계요인과 같이 수많은 요소에 의해 영향받는 특수성 때문에 이를 정량화하는 것이 여전히 어렵다는 것에 기인할 수 있다(Jamei et al., 2021). 하지만 NbS 의사결정을 위해 T2와 T3 단계가 결합한 하이브리드 효과평가 연구들이 적극 필요함에도, 주제범위 문헌고찰의 결과에 따르면 현재 실용적 질문과 연계된 연구들은 부족하며 이 때문에 발생하는 연구와 의사결정의 요구사항의 불일치가 현재의 지식격차를 발생하고 시키는 것으로 진단된다.

3.4.2. 의사결정에 활용 가능한 증거 탐색

연구질문 유형화 분석결과를 바탕으로 옥상녹화 설치 시 의사결정자들을 지원할 수 있는 정보에 대해 정리하였다(Fig. 9). 의사결정 단계에서 정보가 필요한 사항들을 육하원칙에 따라 설정한 10가지 질문은 다음과 같다. [Who] 누가 옥상녹화로부터 혜택을 받는가?, [Why] 왜 옥상녹화를 해야 하는가?, [What1] 무엇을 해야 옥상녹화의 효과가 높아지는가?, [What2] 옥상녹화와 다른 기술 중 우선으로 설치해야 하는 것은 무엇인가?, [Where] 어디에 옥상녹화를 설치해야 하는가?, [When] 옥상녹화 효과는 언제 발휘되며 시간에 따라 어떻게 달라지는가?, [How1] 옥상녹화는 열을 얼마나 저감해주는가?, [How2] 옥상녹화의 효과는 어떻게 측정될 수 있는가?, [How3] 얼마나 많이 옥상녹화를 설치해야 하는가?, [How4] 얼마나 많은 경제적 혜택을 옥상녹화가 제공해 주는가?

모든 연구가 증거를 제공할 수 있는 의사결정 질문으로는 [Why], [How1], [How2]로 판단되었다. 이는 모두 옥상녹화의 열 효과를 정량화했기 때문에, 왜 사업을 해야 하는지, 얼마큼 열을 줄여 줄 수 있는지, 효과를 어떻게 측정해야 하는 것인지에 대하여 공통으로 정보를 제공한다.

[Who]에 관련된 증거로는 누가 옥상녹화에 혜택을 받는지 분석한 RQ10 유형의 연구들이 관련된 정보를 제공할 수 있으며 공간적 범위를 평가한 RQ7 유형 또한 효과의 범위를 통해 수혜자를 간접적으로 추정할 수 있기에 약한 관련성이 있다고 판단되었다. 옥상녹화 성능 증진과 관련된 [What1] 질문에 증거를 제공할 수 있는 연구 유형으로는 RQ1, RQ2, RQ3가 각각 옥상녹화의 조건과 타입별 효과의 변화, 여러 열 완화 기술 간의 비교, 식물종 선택과 효과에 연관성을 평가했기 때문에 관련된 증거를 제공할 수 있으며, 효과가 유효할 수 있는 사업의 양을 평가한 RQ5, 공간별 효과 차이를 규명한 RQ6 유형에 경우도 간접적인 증거를 제공한다고 판단했다. 어떤 기술을 설치해야 하는지에 관한 [What2]에 의사결정 질문과 관련된 연구는 기술별 비교 연구인 RQ2 유형이 강력한 증거를 제공할 수 있으며 옥상녹화 기술에 집중하여 조건별 변화에 따른 효과 변화를 추정한 RQ1 유형은 간접적인 관련성이 있다. 어디에 기술을 설치해야 하는지에 대한 [Where]의 의사결정 질문과 관련된 연구는 옥상녹화의 공간 유형별 효과평가 RQ6 유형과 효과 범위를 평가한 RQ7 유형이 가장 관련된 증거를 제공할 수 있으며, 의사결정 시 기술의 수혜자를 고려하여 사업 위치를 결정하는

의사결정이라면 RQ10 유형 또한 간접적 증거를 제공할 수 있다고 판단된다. 언제 옥상녹화 효과가 있을지, 시간에 따른 효과 변화에 관한 [When]에 대한 의사결정 질문에는 미래 기후변화 시나리오에서 효과를 평가한 RQ8과 계절 변화에 따른 효과평가에 관련된 RQ9 유형이 연관된 증거를 제공할 수 있다. [How3]인 얼마나 많은 양을 설치해야 하는지에 대한 의사결정 질문에는 유효 사업량에 관한 RQ5 연구 유형들이 직접적인 증거들을 제공하며 서비스 소외지역 해소 등과 관련된 의사결정이라면 효과 범위에 대한 평가의 RQ7이 간접적인 증거를 제공할 수 있다고 판단된다. [How4]와 관련된 경제적 이점에 대한 의사결정 질문에는 혜택을 정량화한 RQ11 유형이 직접적인 증거를 제공할 수 있다.

종합하자면, 의사결정자들은 이러한 연구결과들로부터 육하원칙에 따른 질문에 관한 정보를 취득할 수 있을 것이다. 다른 한편으로는 의사결정 단계에서 필요한 정보 사항을 육하원칙 질문에 따라 설정한 것과 생산된 연구증거를 연결했을 때 공통으로 지원할 수 있는 정보가 있는 반면에, 특정 증거유형만이 지원할 수 있는 의사결정 질문 또한 존재했다. 이는 같은 옥상녹화에 대한 열 완화 효과평가에 관련된 논문이더라도 의사결정 관점에서는 다른 유형의 증거들이 다양하게 생산되기 때문에, 이를 의사결정에 활용하기 위해서는 정책과 기술개발이 결합된 형태로 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

3.5. 논문 검색 결과 비교 및 의사결정 질문 확장 가능성

본 연구에서는 ScienceDirect 데이터베이스를 선정하여 21개 학술지에서 발간된 61편의 논문을 선정하여 분석하였다. 단독 데이터베이스 사용이 연구의 일반화 가능성을 낮출 수 있으므로, 이러한 연구결과가 기존 옥상녹화 리뷰 논문의 검색 결과와 어느 정도 일치하는지 검토함으로써 연구의 일반화 가능성 확인하고자 하였다. 이를 위해, 최근 옥상녹화 리뷰 논문 중 Google Scholar 및 Scopus를 활용한 연구(Zhang and He, 2021)와 Scopus 및 Web of Science를 활용한 연구(Aleksejeva et al., 2024)의 검색 결과를 비교하였다. Zhang and He (2021)는 옥상녹화 연구와 관련된 주요 학술지와 논문 개수를 제시하였다. 해당 연구에서 검토한 186편의 논문 중 138편(약 74%)이 Elsevier에서 출판된 저널에 게재되었으며, 이는 Elsevier 계열 저널이 해당 연구 분야에서 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다. 또한, Zhang and He (2021)에서 선정한

5W1H	Example of questions in decision-making	RQ 1	RQ 2	RQ 3	RQ 4	RQ 5	RQ 6	RQ 7	RQ 8	RQ 9	RQ 10	RQ 11
Who	Who benefits from green roof?							△			○	
Why	Why should we implement green roof?	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
What	What[1] should be done to enhance the performance of green roof?	○	○	○		△	△					
	What[2] is the priority between green roof and other technologies or combinations?	△	○									
Where	Where should green roof be installed?						○	○			△	
When	When does green roof works, and how does it change over time?								○	○		
How	How[1] much heat does green roof reduce?	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	How[2] can the effects of green roof be measured?	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	How[3] many green roof needs to be installed?					○		△				
	How[4] much benefit does green roof provide?											○

Fig. 9. Matching the type of evidence from research questions to decision-making questions in the 5W1H framework. 'O' indicates that the research question provides direct evidence relevant to decision-making, '△' indicates that the research question provides indirect evidence related to decision-making, and a blank space indicates no relevance

주요 학술지와 본 연구에서 제시한 주요 학술지를 비교한 결과, 상위권 학술지가 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 주요 학술지 예시로 Building and Environment, Energy and Buildings, Sustainable Cities and Society, Urban Forestry & Urban Greening, Landscape and Urban Planning 등이 있다. 추가적으로, Aleksejeva et al. (2024)의 연구에서는 옥상녹화의 기후적 혜택을 분석하기 위해 '도시 열섬 효과 저감', '미기후 조절' 등 본 연구와 유사

한 키워드를 활용하여 논문 검색을 수행하였으며, 중복을 제외한 최종 선정 논문 수를 56편으로 보고하였다. 이는 본 연구에서 최종 선정한 61편의 논문과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않으며, ScienceDirect 단독 활용이 옥상녹화 리뷰 논문의 일반화 가능성을 크게 저해하지 않을 수 있음을 시사한다.

본 연구에서 제시한 10가지 의사결정 질문 외에도 추가적인 질문이 도출될 가능성이 높다. 다만, 본 연구는 최신

연구를 검토하여 의사결정 및 연구 증거 활용의 방향성을 평가할 때, 5W1H 기반 질문 또는 연구자가 생성한 질문이 정책적 의사결정을 지원하는 데 유용한 접근 방식이 될 수 있음을 참고하였다. 실제로, 기존 연구(Degirmenci et al., 2021)에서도 문헌 검토를 통해 연구진이 특정 연구 질문을 도출하고, 이를 바탕으로 향후 연구 필요성을 제안하는 방법이 활용된 바 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 10가지 질문은 문헌검토 과정에서 반복적으로 도출된 주요 키워드를 기반으로 5W1H 프레임워크를 적용하여 구성된 대표적인 예시이다. 이는 의사결정자들이 직면할 수 있는 핵심적인 질문을 구조화하는 동시에, 의사결정 과정을 일반화하기 어려운 상황에서 연구 방향성을 체계적으로 정리하는 도구로 활용될 수 있음을 강조하고자 한다. 향후 연구에서는 더욱 실질적인 의사결정 프로세스를 이해하기 위해, 실제 이해관계자를 대상으로 한 접근법이 필요할 수 있다.

4. 결론

연구에서는 옥상녹화 열 완화 효과평가를 중심으로 최신 15년 동안의 논문을 PRISMA-ScR 지침을 준수하여 61개에 대해 주제범위를 검토하였다. 옥상녹화와 관련된 논문들의 최신 연구 질문을 파악하고 이를 의사결정 관점에서 도움이 되는 정보가 무엇인지 분류하였다. 이를 통해 옥상녹화 열 완화 효과 정량화에 대한 연구들이 현재 옥상녹화를 확대 및 지원하는 의사결정을 뒷받침해 내는 과학적 증거를 생산하고 있음을 확인하였다. 이 연구는 옥상녹화의 열 완화 효과를 증점적으로 보고한 논문들의 결과를 정리하고 이를 의사결정 관점의 증거로 사용할 수 있는 방향성과 추후 연구방향을 제시하는 최초의 주제범위 문헌고찰 논문이라는 점에서 의의가 있다.

연구적 한계로는 자연기반해법으로서 옥상녹화의 다양한 효과 중 정량적으로 열 완화 효과 실험한 논문들을 대상으로 연구를 진행하였다. 이는 추후 옥상녹화가 제공하는 생물다양성, 우수 유출량 감소, 탄소량 저장 등과 같은 다양한 효과에 관한 연구에 대해서도 통합되어야 한다. 이는 의사결정에 있어 기술의 공동효과는 중요한 정보로써 작동하기 때문에 정책 및 기술개발 접근방식의 의사결정 지원 방향성과 공동효과에 대해서는 통합되어 제시되어야 한다. 문헌 검색 측면의 한계로는 최근 방법에 초점을 맞추기 위해 최근 15년 출판물만 포함하였다. 또한, 영어로 된 출판물만 분석대상으로 해 추후 국내의 연구들을

문헌검토에서 다뤄야 할 필요가 있다. 연구에서는 실제 열 완화 효과를 정량화한 논문들만 분석대상으로 선정하고, 원문분석 및 논문품질 사전확보를 위해 ScienceDirect의 단일 데이터베이스만을 활용하였다. 이는 연구에서 목표로 하는 논문들을 선정하는 데에는 효과적이었으나 다양한 논문을 채택하지 못했다는 한계가 남아있다. 따라서, 추후에는 옥상녹화의 여러 생태계 서비스의 초점을 맞춰 증거식별이 부문별로 분석되는 것 또한 중요하며, 여러 데이터베이스를 활용해 다양한 논문들을 검토할 필요성이 있다.

이와 더불어 다음과 같은 추후 연구가 필요하다는 것을 확인하였다. 첫째로 효과평가와 효과보고에 대한 표준화된 접근방식의 연구가 필요하다. 다양하고 파편화되어 생산된 정보들은 의사결정자들이 종합하고, 활용하기에는 어려움이 존재할 수 있다. 특히 집중되어 연구되어 생산되고 있는 결과들이 여러 지역의 기후대, 옥상녹화 유형 및 조건, 연구마다 다른 측정지표 및 측정방법 등이 연구마다 차이가 존재한다. 이는 지역별, 유형별, 연구 유형별 설명되는 정보는 생산되나 의사결정자들이 이를 종합하여 일반화된 정보로 해석하기에는 장벽이 있으므로 의사결정 시 활용도를 높이기 위해서는 표준화된 방법 및 보고 개발을 통한 NbS 증거의 통합에 기여해야 한다.

둘째로, 추후 연구로는 열 완화 효과평가 정량화와 연계되어 연구되고 있는 분야 중 아직 관심이 적은 분야의 연구들이 활성화 되어야 한다. 기존까지 연구자들이 관심을 두고 있었던 RQ1, RQ2 유형 외에 필요 사업량에 관한 연구, 열 완화 효과와 경제적 편익을 정량화하는 연구, 공간적 효과범위에 대한 연구 등이 앞으로 더욱 연구되어야 할 연구 분야로 보인다.

마지막으로, 자연기반해법으로서 옥상녹화는 기술 개발연구와 정책연구가 결합한 접근방식으로 연구되어야 한다. 이번 연구에서는 육하원칙에 따른 연구질문을 통해 의사결정에 대하여 필요 정보를 추정한 결과와 연구동향을 파악함으로써 유형화된 증거유형을 연계하여 의사결정 활용방안을 제안했지만, 연구는 의사결정 관점과는 다른 유형의 증거들이 다양하게 생산되어 맞춤형 의사결정 정보가 부재할 수도 있다. 따라서, 정책과 기술 개발을 결합한 접근 방식에 관한 연구가 의사결정 질문과 함께 이루어진다면, 의사결정 과정에서의 정보 격차를 보다 효과적으로 해소하는 데 기여할 수 있을 것이다(Degirmenci et al., 2021). 또한, 본 연구에서 수행한 주제범위 고찰을 통해 도출된 의사결정 질문과 연구 질문이 생성하는 증거의

연결은 이러한 과정을 더욱 촉진할 것으로 기대된다. 이 같은 연구들이 확대된다면, 궁극적으로 성공적인 사업의 계획 및 가이드라인 기준 개발 등 의사결정자들이 실제 결정 단계에서 필요로 하는 정보를 더욱 맞춤형으로 생산할 수 있을 것이며, 이는 도시의 다양한 문제 해결을 위해 환경·사회·경제적으로 지속가능한 수단으로 논의되고 있는 자연기반해법을 적극적으로 도입하는데 기여할 것으로 판단된다. 이 연구를 통해 확인한 것처럼 NbS로서 옥상녹화의 열 저감 효과에 대하여 주제범위 고찰의 방법으로 연구동향 및 증거활용 방향성을 파악할 수 있었다. 향후에도 축적된 연구들의 주제분석을 통해 자연기반 해법의 모호성과 복잡성을 해결해 줄 수 있기를 바라며 이것이 의사결정에 영향을 주어 NbS가 더 많이 효과적으로 실현될 수 있기를 기대한다.

사사

본 논문은 환경부 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성·관리 기술개발사업(RS-2023-00218245)의 지원을 받아 작성되었습니다.

Reference

- Aleksejeva J, Voulgaris G, Gasparatos A. 2024. Systematic review of the climatic and non-climatic benefits of green roofs in urban areas. *Urban Clim* 58: 102133. doi: 10.1016/j.uclim.2024.102133
- Asadi A, Arefi H, Fathipoor H. 2020. Simulation of green roofs and their potential mitigating effects on the urban heat island using an artificial neural network: A case study in Austin, Texas. *Adv Space Res* 66(8): 1846-1862. doi: 10.1016/j.asr.2020.06.039
- Berardi U. 2016. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy Build* 121: 217-229. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.021
- Chabada M, Durica P. 2023. Effect of water content in the composition of an extensive green roof on the temperature regime. *Transp Res Procedia* 74: 991-998. doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.235
- Chen B, Wang W, You Y, Zhu W, Dong Y, Xu Y, Chang M, Wang X. 2023. Influence of rooftop mitigation strategies on the thermal environment in a subtropical city. *Urban Clim* 49: 101450. doi: 10.1016/j.uclim.2023.101450
- Chidambaram C, Nath SS, Varshney P, Kumar S. 2022. Assessment of terrace gardens as modifiers of building microclimate. *Energy Built Environ* 3(1): 105-112. doi: 10.1016/j.enbenv.2020.11.003
- Ciacchi C, Banti N, Di Naso V, Bazzocchi F. 2023. Green strategies for improving urban microclimate and air quality: A case study of an Italian industrial district and facility. *Build Environ* 244: 110762. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110762
- Cohen-Shacham E, Andrade A, Dalton J, Dudley N, Jones M, Kumar C, Maginnis S, Maynard S, Nelson CR, Renaud FG, et al. 2019. Core principles for successfully implementing and upscaling nature-based Solutions. *Environ Sci Policy* 98: 20-29. doi: 10.1016/j.envsci.2019.04.014
- Costanzo V, Evola G, Marletta L. 2016. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy Build* 114: 247-255. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.053
- Coutts AM, Daly E, Beringer J, Tapper NJ. 2013. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Build Environ* 70: 266-276. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.021
- D'Orazio M, Di Perna C, Di Giuseppe E. 2012. Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy Build* 55: 439-451. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.009
- Dandou A, Papangelis G, Kontos T, Santamouris M, Tombrou M. 2021. On the cooling potential of urban heating mitigation technologies in a coastal temperate city. *Landsc Urban Plan* 212: 104106. doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104106
- de Oliveira Santos TD, Pacheco FAL, Fernandes LFS. 2024. A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs. *Sci Total Environ* 932: 173107. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.

- 173107
- Degirmenci K, Desouza KC, Fieuw W, Watson RT, Yigitcanlar T. 2021. Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustain Cities Soc* 70: 102873. doi: 10.1016/j.scs.2021.102873
- Diren-Üstün DH, Ünal YS, Bilgen Sİ, Sonuç CY, Sodoudi S, Güney C, Doğru AÖ, İncecik S. 2024. Effects of land-use mitigation scenarios on urban heat island intensity in Istanbul. *Atmos Res* 297: 107083. doi: 10.1016/j.atmosres.2023.107083
- Dong J, Lin M, Zuo J, Lin T, Liu J, Sun C, Luo J. 2020. Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area - A case study of Xiamen, China. *J Clean Prod* 255: 120152. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120152
- Dwivedi YK, Jeyaraj A, Hughes L, Davies GH, Ahuja M, Albashrawi MA, Al-Busaidi AS, Al-Sharhan S, Al-Sulaiti KI, Altinay L, et al. 2024. "Real impact": Challenges and opportunities in bridging the gap between research and practice - Making a difference in industry, policy, and society. *Int J Inf Manag* 78: 102750. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2023.102750
- Elnabawi MH, Hamza N, Raveendran R. 2023. 'Super cool roofs': Mitigating the UHI effect and enhancing urban thermal comfort with high albedo-coated roofs. *Results Eng* 19: 101269. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101269
- Fang Y, Du X, Zhao H, Hu M, Xu X. 2023. Assessment of green roofs' potential to improve the urban thermal environment: The case of Beijing. *Environ Res* 237: 116857. doi: 10.1016/j.envres.2023.116857
- Ferrario F, Mourato JM, Rodrigues MS, Dias LF. 2024. Evaluating nature-based Solutions as urban resilience and climate adaptation tools: A meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods. *Sci Total Environ* 950: 175179. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175179
- Geletić J, Lehnert M, Resler J, Krč P, Middel A, Krayenhoff ES, Krüger E. 2022. High-fidelity simulation of the effects of street trees, green roofs and green walls on the distribution of thermal exposure in Prague-Dejvice. *Build Environ* 223: 109484. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109484
- Gertler PJ, Martinez S, Premand P, Rawlings LB, Vermeersch CM. 2016. *Impact evaluation in practice*, 2nd edn. Washington, DC: World Bank Publications.
- Geukes HH, van Bodegom PM, van Oudenhoven APE. 2024. Setting the stage for decision-making on nature-based solutions for coastal climate adaptation. *Ocean Coast Manag* 247: 106916. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106916
- Grimshaw JM, Eccles MP, Lavis JN, Hill SJ, Squires JE. 2012. Knowledge translation of research findings. *Implement Sci* 7(1): 50. doi: 10.1186/1748-5908-7-50
- Gromke C, Blocken B, Janssen W, Merema B, van Hooff T, Timmermans H. 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Build Environ* 83: 11-26. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.04.022
- Guerin RJ, Glasgow RE, Tyler A, Rabin BA, Huebschmann AG. 2022. Methods to improve the translation of evidence-based interventions: A primer on dissemination and implementation science for occupational safety and health researchers and practitioners. *Saf Sci* 152: 105763. doi: 10.1016/j.ssci.2022.105763
- He Y, Yu H, Ozaki A, Dong N. 2020. Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area. *J Clean Prod* 267: 122205. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122205
- Heidarinejad, G, Esmaili A. 2015. Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance. *Energy Convers Manag* 106: 1418-1425. doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.020
- Herath P, Thatcher M, Jin H, Bai X. 2021. Effectiveness of urban surface characteristics as mitigation strategies for the excessive summer heat in cities. *Sustain Cities Soc* 72: 103072. doi: 10.1016/j.scs.2021.103072

- Herath P, Thatcher M, Jin H, Bai X. 2023. Comparing the cooling effectiveness of operationalisable urban surface combination scenarios for summer heat mitigation. *Sci Total Environ* 874: 162476. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162476
- Iaria J, Susca T. 2022. Analytic Hierarchy Processes (AHP) evaluation of green roof-and green wall-based UHI mitigation strategies via ENVI-met simulations. *Urban Clim* 46, 101293. doi: 10.1016/j.uclim.2022.101293
- IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources). 2020. IUCN Global standard for nature-based solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. Gland, Switzerland: IUCN. doi: 10.2305/IUCN.CH.2020.08.en
- Jamei E, Chau HW, Seyedmahmoudian M, Stojcevski A. 2021. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Sci Total Environ* 791: 148407. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148407
- Jia S, Wang Y. 2021. Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong. *Build Environ* 201: 107988. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107988
- Karachaliou P, Santamouris M, Pangalou H. 2016. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy Build* 114: 256-264. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.055
- Khomsy K, Bouzghiba H, Mendyl A, Al-Delaimy AK, Dahri A, Saad-Hussein A, Balaw G, El Marouani I, Sekmoudi I, Adarbaz M, et al. 2024. Bridging research-policy gaps: An integrated approach. *Environ Epidemiol* 8(1): e281. doi: 10.1097/EE9.0000000000000281
- Kim SH, Park CY, Choi JY, Park C. 2024. Exploring maladaptive patterns of small-scale green roofs through evaluation in a capacity of heat mitigation: A case study in seoul. *Build Environ* 266: 112052. doi: 10.1016/j.buildenv.2024.112052
- Klein PM, Coffman R. 2015. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. *Sci Total Environ* 512-513: 82-93. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.020
- Kolokotsa D, Santamouris M, Zerefos SC. 2013. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Sol Energy* 95: 118-130. doi: 10.1016/j.solener.2013.06.001
- Lee E, Seo Y, Woo DK. 2024. Enhanced environmental and economic benefits of green roofs in a humid subtropical region under future climate. *Ecol Eng* 201: 107221. doi: 10.1016/j.ecoleng.2024.107221
- Li H, Xiang Y, Yang W, Lin T, Xiao Q, Zhang G. 2024. Green roof development knowledge map: A review of visual analysis using CiteSpace and VOSviewer. *Heliyon* 10(3): e24958. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24958
- Lin M, Dong J, Jones L, Liu J, Lin T, Zuo J, Ye H, Zhang G, Zhou T. 2021. Modeling green roofs' cooling effect in high-density urban areas based on law of diminishing marginal utility of the cooling efficiency: A case study of Xiamen Island, China. *J Clean Prod* 316: 128277. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128277
- Liu X, Tian G, Feng J, Hou H, Ma B. 2022. Adaptation strategies for urban warming: Assessing the impacts of heat waves on cooling capabilities in Chongqing, China. *Urban Clim* 45: 101269. doi: 10.1016/j.uclim.2022.101269
- Liu X, Tian G, Feng J, Wang J, Kong L. 2018. Assessing summertime urban warming and the cooling efficacy of adaptation strategy in the Chengdu-Chongqing metropolitan region of China. *Sci Total Environ* 610-611: 1092-1102. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.082
- Lynn BH, Lynn IM. 2020. The impact of cool and green roofs on summertime temperatures in the cities of Jerusalem and Tel Aviv. *Sci Total Environ* 743: 140568. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140568
- Mazzeo D, Matera N, Peri G, Scaccianoce G. 2023. Forecasting green roofs' potential in improving building thermal performance and mitigating urban

- heat island in the Mediterranean area: An artificial intelligence-based approach. *Appl Therm Eng* 222: 119879. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119879
- McConnell K, Braneon CV, Glenn E, Stamler N, Mallen E, Johnson DP, Pandya R, Abramowitz J, Fernandez G, Rosenzweig C. 2022. A quasi-experimental approach for evaluating the heat mitigation effects of green roofs in Chicago, Illinois. *Sustain Cities Soc* 76: 103376. doi: 10.1016/j.scs.2021.103376
- Meetam M, Sripintusorn N, Songnuan W, Siri Wattanakul U, Pichakum A. 2020. Assessment of physiological parameters to determine drought tolerance of plants for extensive green roof architecture in tropical areas. *Urban For Urban Green* 56: 126874. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126874
- Melanidis MS, Hagerman S. 2022. Competing narratives of nature-based solutions: Leveraging the power of nature or dangerous distraction? *Environ Sci Policy* 132: 273-281. doi: 10.1016/j.envsci.2022.02.028
- Nesshöver C, Assmuth T, Irvine KN, Rusch GM, Waylen KA, Delbaere B, Haase D, Jones-Walters L, Keune H, Kovacs E, et al. 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Sci Total Environ* 579: 1215-1227. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.106
- Ng E, Chen L, Wang Y, Yuan C. 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Build Environ* 47: 256-271. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.014
- Peng LLH, Yang X, He Y, Hu Z, Xu T, Jiang Z, Yao L. 2019. Thermal and energy performance of two distinct green roofs: Temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate. *Energy Build* 185: 247-258. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.040
- Perini K, Magliocco A. 2014. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban For Urban Green* 13(3): 495-506. doi: 10.1016/j.ufug.2014.03.003
- Pigliautile I, Chàfer M, Pisello AL, Pérez G, Cabeza LF. 2020. Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. *Renew Energy* 147: 1663-1675. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.082
- Pisello AL, Piselli C, Cotana F. 2015. Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof. *Sol Energy* 116: 337-356. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.049
- Razzaghamanesh M, Beecham S, Salemi T. 2016. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban For Urban Green* 15: 89-102. doi: 10.1016/j.ufug.2015.11.013
- Rubert-Nason K, Casper AA, Jurjonas M, Mandeville C, Potter R, Schwarz K. 2021. Ecologist engagement in translational science is imperative for building resilience to global change threats. *Rethink Ecol* 6: 65-92. doi: 10.3897/rethinkingecology.6.64103
- Rudd K, Rizzi D, Saez LR, Racé S (eds). 2024. NetworkNature - NbS policy screening and analysis of needs and gaps for 2024-2030. <https://networknature.eu/sites/default/files/uploads/iclei-networknature-ieep-report-v06-final-web.pdf>
- Salvador R, Barros MV, dos Santos GET, van Mierlo KG, Piekarski CM, de Francisco AC. 2021. Towards a green and fast production system: Integrating life cycle assessment and value stream mapping for decision making. *Environ Impact Assess Rev* 87: 106519. doi: 10.1016/j.eiar.2020.106519
- Santamouris M. 2014. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol Energy* 103: 682-703. doi: 10.1016/j.solener.2012.07.003
- Santamouris M, Haddad S, Saliari M, Vasilakopoulou K, Synnefa A, Paolini R, Ulpiani G, Garshasbi S, Fiorito F. 2018. On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies. *Energy Build* 166: 154-164. doi:

- 10.1016/j.enbuild.2018.02.007
- Saqib A, Khan MSU, Rana IA. 2024. Bridging nature and urbanity through Green Roof Resilience framework (GRF): A thematic review. *NbS* 6: 100182. doi: 10.1016/j.nbsj.2024.100182
- Schibuola L, Tambani C. 2022. A monthly performance comparison of green infrastructures enhancing urban outdoor thermal comfort. *Energy Build* 273: 112368. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112368
- Shafique M, Kim R, Rafiq M. 2018. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review. *Renew Sustain Energy Rev* 90: 757-773. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.006
- Smalls-Mantey L, Montalto F. 2021. The seasonal microclimate trends of a large scale extensive green roof. *Build Environ* 197: 107792. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107792
- Solcerova A, van de Ven F, Wang M, Rijdsdijk M, van de Giesen N. 2017. Do green roofs cool the air? *Build Environ* 111: 249-255. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.10.021
- Sookhan N, Margolis L, MacIvor JS. 2018. Inter-annual thermoregulation of extensive green roofs in warm and cool seasons: Plant selection matters. *Ecol Eng* 123: 10-18. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.08.016
- Su L, Zhu DH. 2023. A picture is worth a thousand words: Understanding the predictors of picture sharing in online consumer reviews. *Heliyon* 9(12): e22789. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22789
- Suter I, Maksimović Č, van Reeuwijk M. 2017. A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs. *Urban Clim* 20: 33-45. doi: 10.1016/j.uclim.2017.02.007
- Taleghani M. 2018. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies - A review. *Renew Sustain Energy Rev* 81: 2011-2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.010
- Taleghani M, Crank PJ, Mohegh A, Sailor DJ, Ban-Weiss GA. 2019. The impact of heat mitigation strategies on the energy balance of a neighborhood in Los Angeles. *Sol Energy* 177: 604-611. doi: 10.1016/j.solener.2018.11.041
- Taleghani M, Tenpierik M, van den Dobbela A, Sailor DJ. 2014. Heat mitigation strategies in winter and summer: Field measurements in temperate climates. *Build Environ* 81: 309-319. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.07.010
- Taleghani M, Tenpierik M, van den Dobbela A. 2014. Indoor thermal comfort in urban courtyard block dwellings in the Netherlands. *Build Environ* 82: 566-579. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.09.028
- Tan CL, Wong NH, Tan PY, Jusuf SK, Chiam ZQ. 2015. Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Build Environ* 94: 206-217. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.08.001
- Tan H, Kotamarthi R, Wang J, Qian Y, Chakraborty TC. 2023. Impact of different roofing mitigation strategies on near-surface temperature and energy consumption over the Chicago metropolitan area during a heatwave event. *Sci Total Environ* 860: 160508. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160508
- Tanaka Y, Kawashima S, Hama T, Sánchez Sastre LF, Nakamura K, Okumoto Y. 2016. Mitigation of heating of an urban building rooftop during hot summer by a hydroponic rice system. *Build Environ* 96: 217-227. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.11.025
- Teotónio I, Silva CM, Cruz CO. 2021. Economics of green roofs and green walls: A literature review. *Sustain Cities Soc* 69: 102781. doi: 10.1016/j.scs.2021.102781
- Tricco AC, Lillie E, Zarin W, O'Brien KK, Colquhoun H, Levac D, Moher D, Peters MDJ, Horsley T, Weeks L, et al. 2018. PRISMA extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Ann Intern Med* 169(7): 467-473. doi: 10.7326/M18-0850
- van den Bosch M, Ode Sang Å. 2017. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health - A systematic review of reviews. *Environ Res* 158: 373-384. doi: 10.1016/j.envres.2017.

- 05.040
- van Stigt R, Driessen PPJ, Spit TJM. 2015. A user perspective on the gap between science and decision-making. Local administrators' views on expert knowledge in urban planning. *Environ Sci Policy* 47: 167-176. doi: 10.1016/j.envsci.2014.12.002
- Wang X, Li H, Sodoudi S. 2022. The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Build Environ* 217: 109082. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109082
- Wang X, Liu G, Zhang N, Liu H, Tang X, Lyu M, Meng H. 2023. Effects of cooling roofs on mitigating the urban heat island and human thermal stress in the Pearl River Delta, China. *Build Environ* 245: 110880. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110880
- William R, Goodwell A, Richardson M, Le PVV, Kumar P, Stillwell AS. 2016. An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecol Eng* 95: 1-9. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.091
- Yang J, Bou-Zeid E. 2019. Scale dependence of the benefits and efficiency of green and cool roofs. *Landsc Urban Plan* 185: 127-140. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.02.004
- Yang J, Mohan Kumar DL, Pyrgou A, Chong A, Santamouris M, Kolokotsa D, Lee SE. 2018. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Sol Energy* 173: 597-609. doi: 10.1016/j.solener.2018.08.006
- Zhang G, He BJ. 2021. Towards green roof implementation: Drivers, motivations, barriers and recommendations. *Urban For Urban Green* 58: 126992. doi: 10.1016/j.ufug.2021.126992
- Zheng X, Kong F, Yin H, Middel A, Yang S, Liu H, Huang J. 2023. Green roof cooling and carbon mitigation benefits in a subtropical city. *Urban For Urban Green* 86: 128018. doi: 10.1016/j.ufug.2023.128018
- Zhong T, Zhang N, Lv M. 2021. A numerical study of the urban green roof and cool roof strategies' effects on boundary layer meteorology and ozone air quality in a megacity. *Atmos Environ* 264: 118702. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118702
- Zhu Z, Zhou D, Wang Y, Ma D, Meng X. 2021. Assessment of urban surface and canopy cooling strategies in high-rise residential communities. *J Clean Prod* 288: 125599. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125599
- Ziaul S, Pal S. 2020. Modeling the effects of green alternative on heat island mitigation of a meso level town, West Bengal, India. *Adv Space Res* 65(7): 1789-1802. doi: 10.1016/j.asr.2019.12.031
- Zuo J, Ma J, Lin T, Dong J, Lin M, Luo J. 2022. Quantitative valuation of green roofs' cooling effects under different urban spatial forms in high-density urban areas. *Build Environ* 222: 109367. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109367