Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 633~638
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.633
JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

우수관로 통수능력 증대형 임베디드 배수펌프시스템의 개발과 에너지 효용성에 관한 연구

손성완† · 한상종 · 이상문

한국건설기술연구원

A Study on the Development and Energy Efficiency of an Embedded Pump System for Stormwater Conduit Capacity Enhancement

SUNGWAN SON†, SANGJONG HAN, SANG-MOON LEE

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 289 Goyangdea-Ro, Ilsandeo-Gu, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

†Corresponding author :
sswan@kict.re.kr

Received 13 October, 2025
Revised 28 October, 2025
Accepted 3 November, 2025

Abstract >> Recent climate change has intensified localized heavy rainfall, resulting in severe urban flooding. Conventional drainage systems often struggle to accommodate sudden runoff surges in low-lying areas. This study proposes an embedded rapid drainage pumping system to enhance the hydraulic performance of urban stormwater conduits. Hydraulic analysis using the Gradually Varied Flow and Manning's equations, along with computational fluid dynamics (CFD) simulations, was conducted to evaluate the system's efficiency. In addition, this study investigated methods to optimize energy consumption relative to drainage effectiveness. The results demonstrate that the embedded pump significantly lowered maximum and average water levels during heavy rainfall events, thereby improving urban stormwater management and flood resilience.

Key words : Urban Flooding(도시 침수), Drainage(배수), Pump System(펌프 시스템), Pumping Energy(펌핑 에너지), Stormwater(우수)

1. 서 론

기후변화의 심화로 인한 극한 강우의 빈도와 강도가 해마다 증가하면서 도시 지역의 홍수 피해가 확대되고 있다[1]. 특히 불투수 면적이 높은 도시 환경에서는 짧은 시간에 집중되는 강우가 우·하수관의 배수 능력을 초과하여 도로와 지하공간의 침수로 이어지고, 이에 따른 인명 및 재산 피해는 사회적·경제적 손실로 직결된다[2,3].

우수관은 도시 지역에서 발생하는 빗물을 신속하게 배제하여 도로와 시설물을 보호하고, 침수 피해를 예방하는 중요한 역할을 수행한다. 이러한 우수관의 성능은 통수능력에 의해 결정되며, 이는 관의 단면 형상과 크기, 경사, 조도계수, 접속 구조물의 형태,

그리고 유지관리 상태 등 다양한 요인에 영향을 받는다. 실제로 통수능력이 부족할 경우 단시간의 집중 호우에도 도로 침수, 하수 역류, 교통 마비와 같은 심각한 사회·경제적 피해가 발생한 사례가 빈번히 보고되고 있다[4]. 이에 따라 기존 우수관의 통수능력 증대 방안에 대한 연구의 필요성이 집중 받고 있으며, 이는 기후변화로 인한 강우 패턴 변화와 도시 집중화로 증가하는 배수 수요를 충족하기 위한 필수적인 과제로 인식되고 있다[5].

본 연구에서는 우수관의 통수능력을 향상시키기 위한 방안으로, 침수 취약 지점에 배수펌프를 설치하는 대안을 제시하고 그 효과를 검증하고자 한다. 우선 수면곡선 방정식을 적용하여 침수 발생 가능성이 높은 구간을 도출하였으며, 국소 위치에서 펌프 가동으로 배수량이 증가할 때 나타나는 수리적 효과를 검토하였다. 이를 위해 국내 공업단지의 실제 우수관 단면 형상, 관 크기, 경사도, 연결 형태 및 관로 길이 등을 반영하였다. 최근 기후변화로 인한 강우 패턴의 변화와 에너지 효율성의 중요성이 부각되고 있으며[6,7], 지속 가능한 도시 인프라 구축을 위해 신재생에너지의 연계 운용에 대한 관심도 증가하고 있다. 따라서 단순한 배수능력 향상뿐만 아니라 에너지 사용의 효율성까지 고려한 대책 마련이 필요하다. 이에 본 연구에서는 펌프 설치 전후의 수위 변화와 유속 분포를 전산유체역학(CFD) 해석을 통해 정밀하게 예측하고, 펌프 운전에 따른 에너지 사용량 대비 수위 저감 효과를 함께 분석하였다.

2. 신속배수용 배수펌프 시스템

2.1 임베디드 배수펌프 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 신속배수용 임베디드 배수펌프 시스템을 보여주고 있다. 임베디드 배수펌프 시스템은 우수관의 배수능력을 향상시키기 위한 대안으로, 관로 내 꺾임, 경사 감소, 역구배 발생 등으로 인해 통수능력이 저하되어 수위가 급격히 상승할 수 있는 취약 구간에 설치된다. 일반

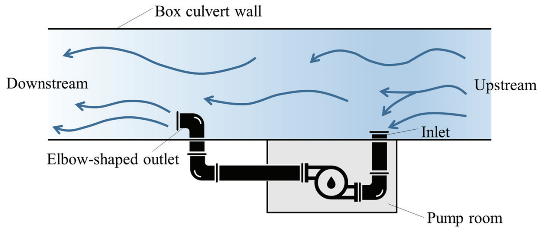

Fig. 1. Concept of the proposed embedded drainage pump system for rapid stormwater removal

적으로 도로 하부에 매설된 박스형 우수관(암거)의 외부에 펌프를 설치하고, 암거 벽면에 흡입구와 토출구를 천공하여 파이프로 펌프와 연결한다. 흡입구를 통해 펌프로 유입된 유량은 통수 취약구간을 우회하여 토출구에 연결된 엘보형 배관을 통해 하류 방향으로 재토출된다. 이를 통해 흡입구가 위치한 침수 취약 구간의 유량 부담을 경감시키고, 동시에 토출구 구간에서는 유속을 증대시키는 부스팅 효과를 기대할 수 있다.

2.2 수면곡선 방정식

우수관 내 수위 변화를 예측하기 위해 본 연구에서는 수면곡선 방정식(Gradually Varied Flow Equation, GVF)을 적용하였다[8]. 일반적으로 개수로 유동 해석에는 Manning 공식이 널리 사용되지만, 이는 정상상태의 일정한 구배 조건을 가정하고 있기 때문에 관로 내 역구배 구간과 같이 흐름 방향과 경사가 불일치하는 상황에서는 직접적으로 수위를 산정할 수 없다. 이러한 경우에는 마찰경사와 하상경사의 차이에 의해 수위가 점진적으로 변동하는 과정을 고려할 수 있는 수면곡선 방정식을 활용하는 것이 타당하다.

수면곡선 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 \times S_f}{1-(Q^2 T)(gA^3)} \qquad (1)$$

여기에서 dy/dx는 수위 변화율, S_0는 하상경사, S_f는 마찰경사, Q는 유량, A는 단면적, T는 수면폭, g는 중력가속도를 의미한다. 먼저 주어진 유량과 단

면 조건을 통해 유속과 수심을 산정하고, Manning 공식을 이용해 마찰경사를 계산한다. 이후 하상경사와의 차이를 통해 수위의 증가 또는 감소 경향을 도출하며, 이를 단계적으로 적분함으로써 각 지점의 수위를 추정한다.

이러한 해석 과정을 통해 수면곡선은 관로 전 구간의 수위 분포를 제시할 수 있으며, 특히 역구배 및 경사 저하 구간에서 형성되는 수위 상승 현상을 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수면곡선 방정식을 기반으로 침수취약 지점을 식별하고, 해당 구간에 배수펌프를 설치하는 경우의 수위 저감 및 통수능력 향상 효과를 검토하였다.

2.3 임베디드 배수펌프 설치 위치

펌프의 설치 위치를 검토하고 그 효과를 예측하기 위하여, 국내 한 공업단지에 매설된 박스형 우수관로의 제원 정보를 활용하여 수위를 예측하였다. Fig. 2는 총 연장 755.7 m 구간에 대한 각 세부 구간의 길이와 경사도를 나타낸 것이다. 특히 경사도가 음(-)의 값으로 나타나는 구간은 역구배가 발생하는 구간으로 취약구간으로 나타날 가능성이 높다[9].

관로 길이는 구간별로 큰 차이를 보이며, 대부분의 구간에서 약 100 m 내외의 길이를 유지하고 있다. 그러나 일부 구간에서는 맨홀 간 위치 조정, 기존 시설물과의 간섭 회피, 또는 관로의 단차 및 경사 조정을 위한 설계상의 이유로 인해 약 10 m 내외의 짧은 관로가 나타나는 경우도 확인된다. 경사도는 전반적으로 ±0.4° 이내의 완만한 경사를 유지하고 있다. 1~9번 구간은 0° 부근의 경사를 유지하는 반면 10번 구간에서 약 -0.6°로 음의 경사가 발생하며, 11번 구간에서는 약 0.7°로 급격한 양의 경사 변화가 나타난다. 이러한 관로 길이와 경사도의 불균일한 분포는 공업단지 내 지형적 요인과 배수계획, 도로 및 부지 배치 등에 따라 구간별로 상이한 설계가 적용되었음을 시사한다.

Fig. 3은 수면곡선 방정식을 적용하여 Fig. 2에서 제시한 우수관의 구간별 길이 및 경사 조건을 이용하고, 우수유량 3 m³/s를 가정하여 관로 내 수위를 예측한 결과를 나타낸 것이다. 유출수위 조건은 각각 1.1 m, 1.3 m, 1.5 m로 설정하였으며, 이에 따른 수위 분포 변화를 검토하였다. 전체 관로 길이 약 800 m 구간에서 수위는 전반적으로 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이지만, 10번과 11번 구간 사이에서는 수위가 급격히 상승하는 현상이 관찰된다. 이는 해당 구간에서 음(–)의 경사에서 양(+)의 경사로 전환되는 역구배 구간이 존재하기 때문으로, 흐름이 정체되면서 수위가 상승하는 결과를 초래한다. 특히 유출수위가 1.5 m인 조건에서는 일부 구간에서 수위가 박스암거 높이인 2 m에 근접하거나 초과하여 침수 가능성이 존재함을 확인할 수 있다. 배수펌핑 시스템의 흡입구를 수위가 급격히 증가하는 역구배 구간에 설치하고, 상대적으로 통수 성능이 우수하여 수위 여유가 확보된 하류 구간으로 우수를 이송·토출한다면, 관로 내 국부적인 수위 상승을 완화할 수 있다. 이러한 방식은 취약 구간의 배수 부담을 줄이고, 전체 우

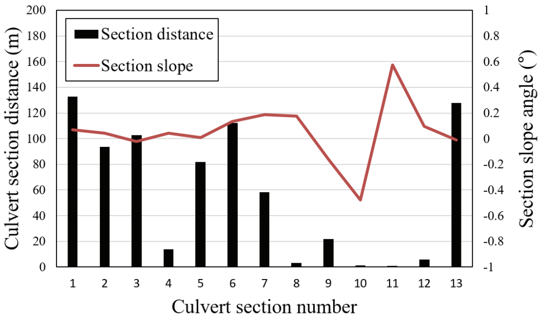

Fig. 2. Length and slope of each stormwater conduit section in an industrial complex in Korea

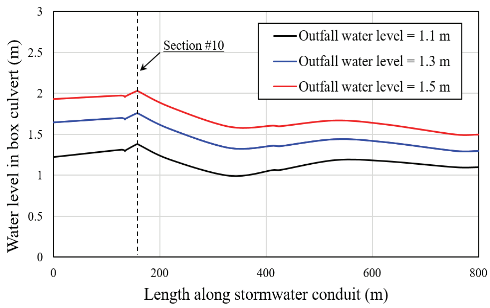

Fig. 3. Water level variation along the stormwater conduit under different outfall water levels

수관망의 통수 능력을 향상시키는 효과적인 대책이 될 수 있다.

3. 임베디드 배수펌프의 효과

3.1 CFD 해석수행

우수관 내 흐름 해석을 위해 Fig. 4와 같이 격자를 구성하고, ANSYS의 CFX 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 우수관의 총 길이는 100 m이며, 상류로부터 약 40 m 지점에서 25°의 꺾임부가 존재한다. 본 연구에서는 이 꺾임부에 임베디드 배수펌프 시스템의 흡입구와 토출구를 설치하여 해석을 수행하였다. 계산 효율성과 수렴 안정성을 고려하여 정상상태(steady-state) 해석으로 진행하였다. 해석에서는 물과 공기의 다상유동(multiphase flow)을 고려하여 자유수면의 거동을 모사하였으며, VOF (Volume of Fluid) 기법을 적용하여 상간 경계를 추적하였다. 각 상은 비압축성 유체로 가정하였고, 중력 효과를 포함하여 수위 변화와 흐름 분포를 예측하였다.

격자 구성은 주로 sweep mesh 기법을 적용하여 관벽면과 수면의 변화가 크게 발생할 것으로 예상되는 구간에 격자를 집중시켰다. 특히 펌프의 흡입구와 토출구는 유속 변화가 클 것으로 예상되는 영역이므로, prism mesh 기법을 추가로 적용하여 경계층 및 국소유동 특성을 정밀하게 해석할 수 있도록 하였다.

우수관 내 흐름 조건을 모사하기 위하여 적절한 경계조건을 설정하였다. 관로의 입구(Inlet)에는 실제 유입 유량 조건을 반영하기 위해 체적유량(Volume Flow Rate) 조건을 부여하였다. 출구(Outlet)에는 관로의 말단 수위를 고려하여 수위 조건과 압력 출구(Pressure Outlet) 조건을 함께 적용함으로써, 실제 하류단의 배수상태를 재현하였다.

펌프의 경우, 실제 형상을 모델링하지 않고 수치적 경계조건 형태로 모사하였다. 즉, 펌프 설치 구간에서의 유량 증가 효과를 재현하기 펌프 흡입구 및 토출구 면에 Volume flow inlet 조건을 부여하고 흡입구에는 음의 값, 토출구에는 양의 값을 설정하였다. 이를 통해 펌프 작동 시 발생하는 배수 가속 효과를 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다.

3.2 CFD 해석결과

Fig. 5는 임베디드 배수 펌프 설치 전후의 우수관 내 수위 분포를 CFD 해석을 통해 비교한 결과이다. Fig. 5(a)는 펌프가 설치되지 않은 기존 상태에서의 해석 결과로, 전체 유입유량은 6 CMS이며, 토구(Outlet) 측 경계조건으로 수위 1.0 m가 적용되었다. Fig. 5(b)는 동일 유입유량 조건에서 펌핑유량 1 CMS의 펌프를 설치하여 가동한 경우의 결과이다. 펌프가 가동되면 펌프 설치 지점 상류부(꺾임 구간)에서 수위가 현저히 감소하며, 전체적으로 펌프 가동 이전보다 낮은 수위 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 우수유량 6 CMS, 펌핑유량 1 CMS 조건에서 우수관 내 위치에 따른 평균 수위 변화를 임베디드 배수 펌프 설치 전후로 비교한 결과이다. 검정

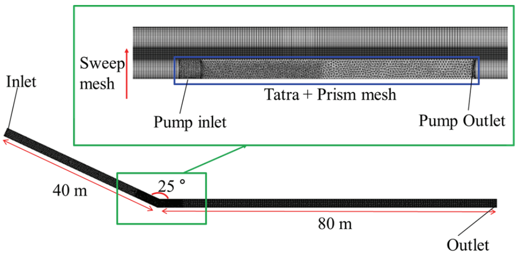

Fig. 4. Computational mesh for the stormwater conduit with the embedded rapid drainage pumping system

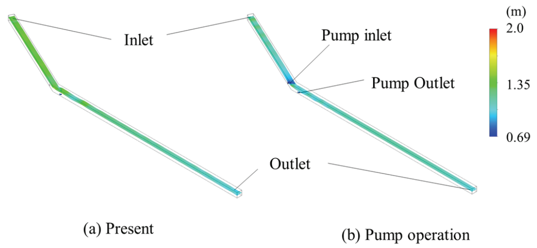

Fig. 5. Comparison of water level distribution before (a) and after (b) pump installation (Inflow = 6 CMS, Pump = 1 CMS, Outlet WL = 1.0 m)

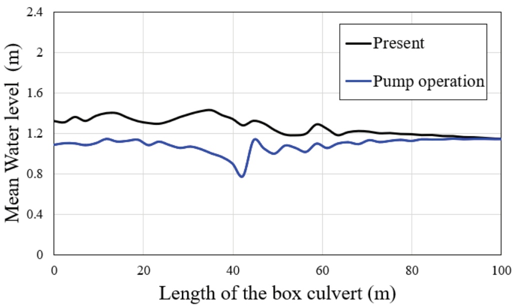

Fig. 6. Mean water level distribution along the box culvert before and after pump installation (Inflow = 3 CMS, Pumping flow = 1 CMS)

색 곡선은 펌프 설치 이전의 수위 분포를 나타내며, 전체적으로 약 1.2 m 내외의 수위가 유지되고 있다. 관거 길이 약 40 m 지점에서는 수위가 약 1.4 m까지 상승하는 구간이 나타나는데, 이는 꺾임부에서의 흐름 정체와 에너지 손실에 의해 수위가 국부적으로 증가한 결과이다. 반면, 파란색 곡선은 펌프 설치 이후의 결과로, 전 구간에서 수위가 전반적으로 낮아졌으며 평균 약 1.0 m 수준을 유지하고 있다. 특히 40 m 부근에서는 펌핑 효과로 인해 수위가 약 0.9 m까지 감소하여, 펌프 설치 이전에 비해 약 0.5 m의 수위 저감 효과가 발생하였다. 이는 신속배수 펌프 설치로 인해 관내 흐름이 원활해지고, 관거 전반의 수위가 효과적으로 저감된 것을 보여준다.

Table 1은 펌핑유량 변화에 따른 관내 수위의 변화를 정리한 것이다. 펌핑유량이 0 CMS인 경우(펌프 미가동 시) 최소 수위(MIN WL)는 1.14 m, 최대 수위(MAX WL)는 1.43 m, 평균 수위(Average WL)는 1.26 m로 나타났다. 펌핑유량을 1 CMS로 증가시키면 최소 수위는 0.78 m, 최대 수위는 1.15 m, 평균 수위는 1.09 m로 전반적인 수위 저감이 발생하였다.

Table 1. Variation of Water Level with Pumping Flow Rate

	Pumping flow rate (CMS)			
	0	1	1.5	2
MIN WL	1.14	0.78	0.7	0.57
MAX WL	1.43	1.15	1.12	1.11
Average WL	1.26	1.09	0.88	0.82

펌핑유량이 1.5 CMS일 때는 최소 수위 0.70 m, 최대 수위 1.12 m, 평균 수위 0.88 m로 감소하였으며, 2 CMS에서는 최소 수위 0.57 m, 최대 수위 1.11 m, 평균 수위 0.82 m로 가장 낮은 수위를 보였다. 이와 같이 펌핑유량이 증가할수록 관내 전반적인 수위가 점진적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 특히 최소 수위는 펌핑유량 0 CMS 대비 2 CMS에서 약 0.57 m로 크게 저감되는 효과를 나타냈다.

펌핑유량 변화에 따른 수위 저감 효과를 에너지 관점에서 분석한 결과, 평균 수위는 펌핑유량 0 CMS에서 1.26 m였으나 1.0 CMS로 증가할 때 1.09 m로 약 0.17 m 감소하였고, 1.5 CMS에서는 0.88 m로 추가로 0.21 m 감소하여 총 0.38 m의 저감 효과를 보였다. 반면 1.5 CMS에서 2.0 CMS로 증가할 경우 평균 수위는 0.82 m로 약 0.06 m만 감소하여 저감 효과가 현저히 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 펌핑유량이 증가함에 따라 관내 수면수두가 감소하여 에너지 손실이 완화되지만, 일정 유량 이상에서는 토구 수위 및 국부 손실 등의 제약으로 수위 저감 폭이 제한되기 때문이다. 따라서 펌핑유량 약 1.5 CMS 부근에서 수위 저감 효율이 가장 높게 나타나며, 그 이상의 유량 증가는 효용이 작아지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시지역 우수관거의 배수능력 향상을 위해 신속배수용 매립형 펌프 시스템을 제안하고, 수리해석 및 CFD 해석을 통해 펌핑유량 변화에 따른 수위 저감 효과를 정량적으로 분석하였다. 해석 결과, 펌프 미설치 상태에서는 관거 내부에서 국부적인 수위 상승이 발생하여 배수능력이 저하되는 구간이 확인되었으나, 펌프를 설치·가동할 경우 전체 관거 구간에서 수위가 전반적으로 낮아지며, 특히 통수 취약 구간에서 뚜렷한 수위 저감이 나타났다. 이는 펌핑에 의해 관내 수면수두가 감소하고 흐름 에너지가 개선되어 배수 효율이 향상된 결과로, 신속배수 펌프 시스템이 우수관거의 치수 안전성 확보에 효과적임을 보여준다.

펌핑유량 변화에 따른 수위 저감 효과를 에너지 관점에서 분석한 결과, 펌핑유량 약 1.5 CMS 부근에서 수위 저감 효율이 가장 우수하며, 과도한 펌핑유량 증가는 에너지 소비 대비 추가적인 수위 저감 효과가 제한적인 것으로 나타났다. 향후 우수관의 효율적인 배수 운영을 위해서는 관거 구조 및 유입량 조건을 고려한 적정 펌핑유량 설정이 필요하며, 본 연구에서 제시한 해석 방법과 결과는 우수관 설계 및 치수 전략 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20250284-001, 홍수 안심도시 실현을 위한 디지털 도시홍수 제어 기술 개발).

References

1. S. Hettiarachchi, C. Wask, and A. Sharma, "Increase in flood risk resulting from climate change in a developed urban watershed – the role of storm temporal patterns", Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 22, No. 3, 2018, pp. 2041-2056, doi: https://doi.org/10.5194/hess-22-2041-2018.
2. G. Y. Seo, S. K. Min, D. Lee, S. W. Son, C. Park, and D. H. Cha, "Hourly extreme rainfall projections over South Korea using convection permitting climate simulations", npj Climate and Atmospheric Science, Vol. 8, 2025, pp. 209, doi: https://doi.org/10.1038/s41612-025-01067-z.
3. A. B. Ashu and J. Kang, "Assessing climate change impacts on flood risk in the Yeongsan River Basin, South Korea", Scientific Reports, Vol. 15, 2025, pp. 26113, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-025-11921-y.
4. K. Wartalska, S. Szymczewski, W. Domalewska, M. Wdowikowski, K. Przestrzelska, A. Kotowski, and B. Kaźmierczak, "The impact of climate change on the functioning of drainage systems in industrial areas—a case study", Atmosphere, Vol. 16, No. 3, 2025, pp. 347, doi: https://doi.org/10.3390/atmos16030347.
5. S. P. Tuler, T. Webler, and J. L. Rhoades, "Stormwater management in a time of climate change: insights from a series of scenario-building dialogues", Weather, Climate, and Society, Vol. 8, No. 2, 2016, pp. 163-175, doi: https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0048.1.
6. S. J. Hong, B. H. Choi, D. K. Lee, S. U. Park, and J. R. Won, "A study on establishing infrastructure plans to introduce an energy efficiency resource standards - based on the energy demand side management and energy efficiency potential-", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 241-247, doi: https://koreascience.kr/article/JAKO201030853092584.pdf.
7. S. Kang, J. Kim, J. Park, and D. Cho, "Predicting initial construction costs of electrolysis hydrogen production plants for building sustainable energy systems", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 257-268, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.257.
8. V. T. Chow, "Open-Channel Hydraulics", 1st ed., McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A., 1959, pp. 250-310.
9. M. Bartos and B. Kerkez, "Hydrograph peak-shaving using a graph-theoretic algorithm for placement of hydraulic control structures", Advances in Water Resources, Vol. 127, 2019, pp. 167-179, doi: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.016.