

지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구

Application of Topographic Index Calculation Algorithm considering Topographical Properties

이 지영*, ○김상현**, 김건목***, 정선희***, 김경현***

1. 서론

수문학적 특성치 중 흐름경로(flow path)와 비기여면적(Specific contributing area; SCA)은 강우유출 시 수문학적 거동에 있어서 중요한 분포형 변수이다. SCA는 임의의 등고선 요소로 유입되는 유출량에 기여하는 지형상의 총 평면적인 TCA(Total contributing area; TCA)를 등고선 요소길이로 나눈 값으로, 이는 유출량에 대한 지표로서 사면(hillslope)에서의 수문학적 거동과 수로 위치, 토양 수분 함량, 오염에 대한 취약성 등에 관한 연구에 포괄적으로 활용된다. SCA는 지형학적 매개변수들과 결합하게 되는데, 이러한 통합된 형태의 대표적인 예가, $\ln(SCA/S)$ 지수로 사면유출모의에 널리 사용된다. 이 지수는 토양의 수분결핍정도를 예측하기 위한 인자로, 여기서 S는 지표면 경사를 나타낸다.

SCA를 계산하는 방법으로는 D8(O'Callaghan와 Mark, 1984)과 Rho8(Fairfield와 Leymarie, 1991), F8(Freeman, 1991; Quinn 등, 1991)이 있다. 그리고 격자 기반 모형들의 흐름의 점원(point source)적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적 특성을 고려한 DEMON방법이 있다(Costas-Cabral 와 Burges, 1994). 이와 관련된 국내연구로는 평탄지형에서의 과도한 흐름분산 문제를 해결하기 위한 구배역급수(H)의 도입(김상현, 이지영, 1999) 등이 있다.

기존 연구들이 지형에 대한 합리적인 흐름의 분산과 수렴모의를 시도하였으나, 공간적으로 변화하는 경사도에 따른 흐름의 분산과 수렴에 대한 고려는 시도되지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 유역내 다양한 경사값의 분포에 대한 구배역급수의 분포적 적용에 관한 연구를 실시하고 산출된 지형지수 분포의 구배역급수의 분포적 적용방법과 격자크기 변화에 의한 민감도를 분석한다. 또한, 이의 유출모의에 대한 영향성을 종합적으로 평가하는데 주목적을 둔다.

2. TOPMODEL과 지형지수

TOPMODEL은 지형지수, $\ln(a/\tan B)$ 를 이용하여 유역의 수문학적 거동을 예측하는 분포형 모형이다(Kirkby, 1975). 이 모형의 주요매개변수는 투수율 감소상수(m)와 지표면에서의 투수계수 $T_0(m^2/h)$, 근저류부 최대저류량(SRmax(m)), 근저류부 초기저류량(SR0(m))으로 이 변수값들이 유역 전체에 걸쳐 동일하게 적용됨으로써 반분포형(semi-distributed) 모형의 형태를 나타낸다. 지형지수는 지하수위의 유역내 공간적 분포를 반영하는 인자로 한 지점에서 흐름 누적의 이론적인 예측값을 나타낸다. a는 임의 지점에서의 등고선 단위 길이 당 한 격자로 유입되는 상경사(upslope) 면적이고, $\tan B$ 는 임의지점에 대한 국부적인 지표면 경사를 나타낸다. $\tan B$ 는 정상상태에서 포화층에서의 국부적인 동수경사와 동일한 것으로 가정한다. 지수함수 형태는 토양 투수성이 지표면으로부터 수직 깊이에 따라 지수함수적으로 감소한다는 가정에 기초한다.

식(1)은 TOPMODEL에서 지형지수와 지하수위 분포간의 관계를 나타낸다.

$$Z_{wt}(x) = \overline{Z_{wt}} + \frac{1}{f} [\lambda - \ln(a/\tan B)]_x \quad (1)$$

* 한국전력공사

** 부산대학교 환경공학과 조교수

*** 부산대학교 환경공학과 석사과정

여기서 $Z_{wt}(x)$ 는 위치 x 에서의 지하수면의 깊이(≤ 0)이고 Z_{wt} 는 지하수위의 유역평균값이며, f 는 깊이에 따른 포화수리학적 전도도의 변화율을 나타낸다.

3. 지형지수 산정

3.1 선행연구 고찰

지형지수를 계산하기 위한 방법은 흐름 경로를 예측하는 방법에 따라 다음과 같이 크게 두 가지로 나뉘어진다. D8(O'Callaghan와 Mark,1984)에 기반한 단일방향 알고리즘(SFD)과 F8(Freeman, 1991; Quinne 등, 1991)에 기반한 다방향 알고리즘(MFD)이 그것이다. 단일방향 알고리즘은 수치고도모형의 각 격자에서의 흐름이 주위 8개 격자 중에서 가장 경사가 급한 방향의 격자로 형성된다고 가정하고, 다방향 알고리즘은 대상 격자로부터 고도가 낮은 주위 모든 격자들로 흐름이 형성된다고 가정한다. 이 알고리즘을 바탕으로 Freeman(1991)은 대상격자로부터 고도가 낮은 주위 격자로 형성되는 흐름의 분율(f_i)을 계산하기 위해 식(2)를 제안했다.

$$f_i = \frac{S^p}{\sum S^p} \quad (2)$$

여기서 S 는 중심 격자와 이웃 격자간의 경사값, p 는 비물리적 양의 정수를 나타낸다. Freeman(1991)은 인공적인 원추형의 표면에 대해 $p=1.1$ 일 때 가장 정확한 결과를 산출한다고 밝혔고, Quinn(1995)등은 p 값을 높게 설정해주는 것은 D8의 결과와 유사한 경향을 나타내며, 최적의 p 값은 이용하는 격자의 크기와 지형적 특성에 따라 다르다고 보고했다.

Holmgren(1994)는 위의 Freeman의 개념에 기초하여 F8 알고리즘의 급경사 지역에 대한 흐름의 분산을 보완하기 위해 상부사면 누적 면적의 분할에 관련된 식(3)을 제안하였다.

$$f_i = \frac{(\tan B_i)^H}{\sum_{j=1}^8 (\tan B_j)^H} \quad (3)$$

여기서 f_i 는 i 번째 하상 방향 격자로의 흐름 분율로서, 0에서 1값을 가지고, i, j 는 흐름 방향, $\tan B_i (>0)$ 는 i 방향의 격자와 중심격자간의 경사구배, H 는 구배역급수를 나타낸다. 식(3)의 특징은 H 값이 높을수록 흐름이 수렴하는 경향을 나타낸다.

3.2 구배역급수의 분포적 적용

본 연구에서는 다방향 흐름 알고리즘에 기초하여 Holmgren(1994)가 제안한 식(5)에 근거하여 구배역급수(H)의 분포적 적용에 관한 연구를 수행하였다. 구배역급수의 분포적 적용에 관한 연구는 공간적으로 다르게 분포하는 경사값에 단일의 구배역급수를 적용함으로써 나타날 수 있는 한계점을 보완하기 위해 시도되었다. 이 모형은 경사가 완만한 지형에 대해서는 구배역급수값을 작게 설정하여 흐름분산에 가중치를 부여하고, 상대적으로 경사가 급한 지형에 대해서는 구배역급수값을 크게 적용함으로써 흐름의 수렴성을 높인다.

경사값에 대한 구배역급수의 분포적 적용함수를 지수형(exponential), 선형(linear), 멱수형(power)의 형태로 설정하였다. 대상 유역의 경사도 분포에 따라 각 모형별 식이 성립되고 각 격자에 대해서 그 격자의 경사값을 기준으로 구배역급수가 결정된다. 표 1은 각 모형의 함수형태를 나타내는데, y 는 격자 하나 하나가 가지는 경사값(x)에 따라 계산되는 구배역급수(H)이고, a, b, c 는 전체 경사도 분포에서 최대 경사값과 최소 경사값에 의해 결정되는 식의 계수들이다. 멱수형의 b 는 세가지 모형의 형태를 가장 잘 구별짓는 형태를 참고로 결정된 값이다. 동일한 경사값에 대해 지수형, 선형, 멱수형으로 갈수록 구배역급수 값이 크게 산정된다.

4. 수문학적 수치지형분석의 적용

4.1 연구대상지역

연구대상유역은 1983년부터 건설교통부에서 설치·운영하고 있는 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 소유역이다. 위천 대표 시험유역의 면적은 427.525km², 유로연장은 42.83km이고 동곡 소유역의 면적은 33.6km², 유로연장은 8.0km이고, 고도분포는 212m-769m이고, 경사도는 0-15%가 10%, 15-30%가 22.3%, 30% 이상이 67.8%로 경사가 가파른 지형적 특성을 지닌다. 연평균 강우량은 약 1070mm이고, 연평균 증발량은 약 650mm이다. 유역의 대부분이 산림지역이고 하천을 따라 논과 밭이 분포한다. 그림 1은 대상유역의 유역도와 DEM을 나타낸다.

표 1. 분포형 모형의 함수형태

	함수형태	변수
지수형	$y = e^{ax} + b$	y = H x = 경사도 a, b, c=계수
선형	$y = ax + b$	
역수형	$y = ax^b + c$	b=0.2

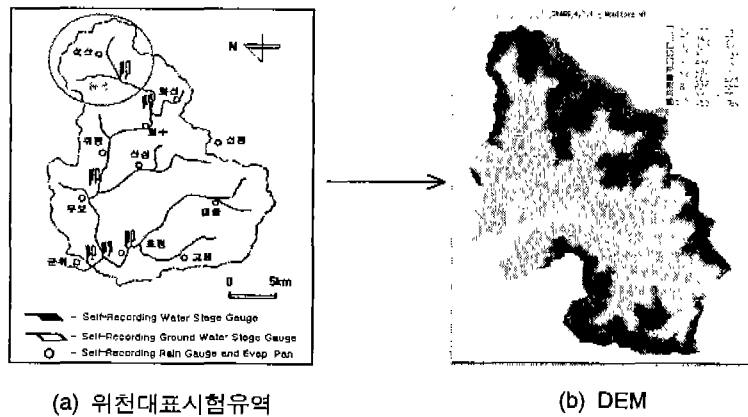


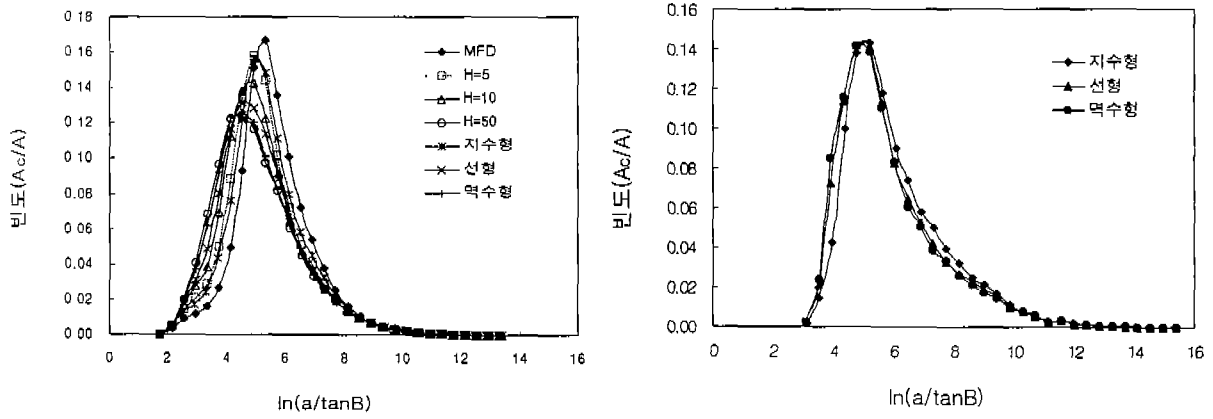
그림 1. 대상유역의 유역도와 고도분포

대상 유역에 대한 수치고도자료(DEM)는 국립지리원의 1:25,000의 지형도를 이용하여 벡터화(vector)한 자료를 GIS 소프트웨어인 GRASS(USCERL, 1991) 기반하에 래스터(raster) 자료 형태로의 변환과 평균 내삽법을 이용하여 격자구조를 지닌 20m, 30m, 40m, 50m DEM으로 완성하였다. 격자크기의 선정은 일반적인 수문 해석에 있어서 DEM의 격자크기는 50m이하가 적합하다는 연구결과를 참작하였다(Beven, 1995).

4.2 수치지형분석

그림 2와 3은 MFD와 구배역급수를 동일한 값으로 적용한 경우와 분포적 적용에 대한 지형지수 산정 결과를 각각 확률빈도 분포와 공간적 분포도로 도식화한 것이다. 그림 2의 (a)는 격자크기 20m에 대한 각 알고리즘의 적용결과 지형지수의 확률빈도분포를 나타낸다. 기존의 MFD 알고리즘과 비교하여 구배역급수의 단일 값 적용과 분포적 적용의 확률빈도분포가 낮은 값 쪽으로의 치우침은 흐름수렴 효과에 의한 작은 지형지수 값의 증가에 기인한다. 그림 2의 (b)는 격자크기 50m에 대한 결과로 적용방법에 따른 지형지수 분포상의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그림 2에서와 같이, 구배역급수(H)의 분포적 적용에 따른 지형지수의 확률빈도 분포는 유사한 형태를 나타내지만, 그림 3에서 적용방법에 따른 지형지수 값은 유역 전체에 걸쳐 상이하게 분포한다. 사각형으로 표시된 부분은 분포형상의 차이를 비교적 잘 나타내는 부분이며, 그림 3의 (a), (b), (c)는 H가 증가할수록 흐름 분산이 감소하고 수렴효과가 두드러지게 나타남을 보여준다. 그림 3(d)는 H값을 지수형의 형태로 적용한 결과로서, 그림 3(a)의 분산효과와 동시에 그림 3의 (b)와 (c)의 수렴효과도 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 3의 (e), (f)는 H값의 선형, 역수형의 분포적 적용결과로서, 그림 3(d)와 동일하게 흐름 수렴과 분산의 효과를 모두 나타내고 있다. 그림 3의 (d), (e), (f)간의 분포 특성의 차이는 지수형, 선형,

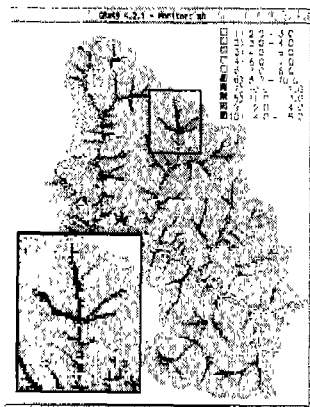
먹수형의 순으로 흐름 수렴효과가 증가한다는 것이고, 이와 같은 결과는 동일한 경사값에 대해 지수형, 선형 먹수형의 차례로 구배역급수의 값이 크게 적용되기 때문으로 판단된다.



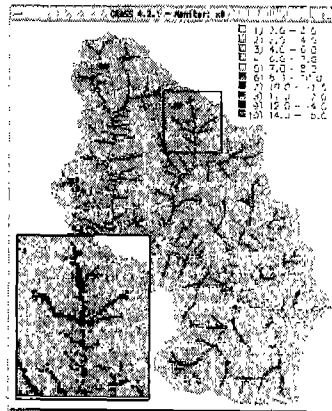
(a) 20m

(b) 50m

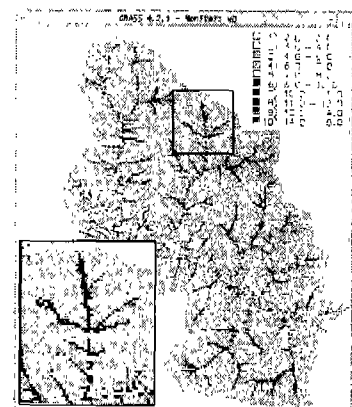
그림 2. 지형지수 확률 분포도



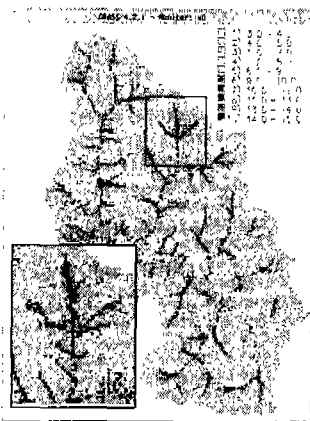
(d) 지수형



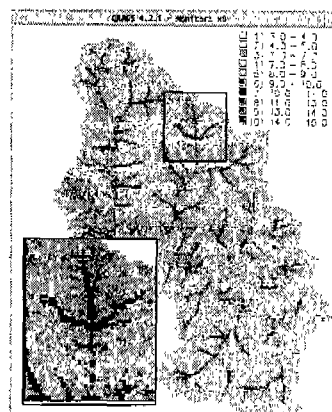
(e) 선형



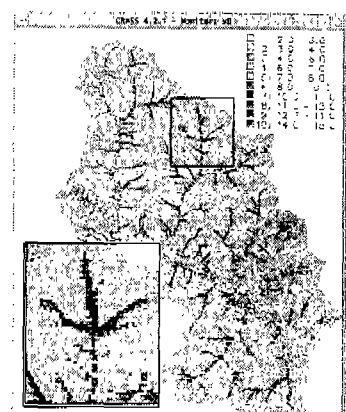
(f) 먹수형



(a) H=1



(b) H=10



(c) H=50

그림 3. 지형지수의 공간적 분포도

4.4 TOPMODEL 유출모의

강우-유출모의에 대한 지형지수 산정방법의 영향을 살펴보기 위해 TOPMODEL 유출모의를 수행하였다. 유출모의를 위해 사용된 관측자료는 건설교통부(1992~1998)의 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서에 수록된 시우량별 강우, 유출량 자료 및 증발산량 자료로, 그 중에서 신뢰성이 있다고 판단되어지는 6개의 강우사상에 대해서 TOPMODEL 유출모의를 수행하였다.

유출모의 시, 모의결과의 최적화를 위한 매개변수 보정과정에서 신뢰성 향상을 위해 기존의 TOPMODEL에 정규분포(normal) 형태의 몬테카를로(Monte Carlo)기법을 사용하여 천 회의 반복시행을 통해 난수를 발생시키고, TOPMODEL의 유출 모의에 있어 가장 중요하다고 판단되는 4가지 변수에 대해 넓은 범위의 매개변수 집합을 얻었다. 표 2는 이 4가지 변수의 초기값의 범위를 나타낸다. 획득된 매개변수 집합에 대해 유출량을 모의하고, 그 모의효율(E_m)을 Nash와 Sutcliffe의 효율계수 함수인 식(4)을 이용해서 계산했다(Nash와 Sutcliffe, 1970). Servet와 Dezetter(1991)는 이 효율식이 수문곡선의 전체적인 적합성을 반영하는데 있어 가장 우수한 목적함수(Object function)임을 밝혔다.

$$E_m(\%) = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \times 100 \quad (4)$$

여기서 O_i 는 i 번째 관측치, P_i 는 i 번째 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치의 평균이다.

MFD 알고리즘의 통계적 적용에 대한 최적유출모의 결과는 표 3에서 보는 바와 같이, 모든 강우사상에 대해 유사한 모의 효율을 나타냈으며, 구배역급수의 값이 증가할수록 다소 최대효율이 낮아지는 경향을 나타내었다. 분포적 적용결과 또한 동일한 모의 효율을 나타내었고 지수형, 선형, 역수형의 순으로 효율이 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과가 지형지수 산출방법에 의한 지형지수 분포의 차이에만 기인한다고 판단하기는 어렵다. 이는 매개변수 보정에서 토양의 피복조건, 초기수분함량 상태를 나타내는 매개변수, 감소곡선(recession

표 3. 강우 사상별 최적 유출모의 효율

강우 사상 지형지수 산정방법	92. 7. 15	92. 8. 11	93. 6. 27	97. 5. 12	97. 6. 24	98. 8. 15
MFD	71.37%	74.87%	93.97%	70.34%	86.51%	79.15%
H=5	66.70%	71.77%	91.41%	65.4%	86.45%	80.82%
H=10	65.07%	70.6%	90.51%	63.7%	86.45%	81.03%
H=50	63.1%	68.99%	89.26%	61.7%	86.51%	80.84%
지수형	68.90%	73.3%	92.52%	67.7%	86.56%	80.1%
선형	64.88%	70.4%	90.31%	63.5%	86.52%	80.90%
역수형	63.48%	69.4%	89.49%	62.2%	86.49%	80.90%

표 2. TOPMODEL 4개 매개변수에 대한 초기값의 범위

매개변수(Parameter)	범위(Range)
m (recession factor, m)	0.005 ~ 0.05
SRmax (maximum root zone storage, m)	0.01 ~ 0.04
SR ₀ (initia root zone storage, m)	0.0005 ~ 0.005
ln(T ₀) (transmissivity)	1.00 ~ 5.00

curve)의 변화율을 나타내는 매개변수(m)들이 지형지수와 비교하여 유출량 계산에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 이와 관련하여, Franchaini(1996) 등은 유역의 지형지수 분포형태의 변화는 TOPMODEL에 의해 예측된 유출량에 크게 영향을 미치지 않고 지형지수 분포형태에서의 차이는 매개변수 값들의 보정에 의해 상쇄될 수 있다고 밝힌바 있다. 지형적 특성 즉, 고도는 포화면적을 결정하는데 있어서 주요한 인자이지만, 토양 특성과 지질적 요소들의 영향을 상쇄할 만큼 그 영향력이 크지 않다는 연구 결과(Iorgulescu와 Jordan, 1994)도 본 연구의 모의 결과를 뒷받침한다.

5. 결 론

공간적으로 변화하는 경사값에 대해 구배역급수의 단일값 적용의 한계점을 해결하기 위해 구배역급수(H)의 분포적 적용에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과, 구배역급수의 분포적 적용은 단일값 적용에 비해 흐름의 수렴과 발산 효과를 보다 잘 나타내는 것으로 추정되었다. 이를 통해, 산출된 지형지수를 기반으로 국제수문개발계획(IHP) 대상 지역의 수문자료를 활용하여 유출모의를 수행하였다. 유출모의에 대한 비교 분석결과는 모든 경우에 있어서 유출모의가 관측값을 유사하게 설명하는 것으로 나타났다. 본 연구의 개선된 지형지수 산정 알고리즘은 강우-유출모의와 지역의 공간적 분포 특성치의 거동예측에 도움이 될 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- 김상현, 한건연(1996). "지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정." 한국수자원학회논문집, 29권 제4호, pp. 199-208.
- 김상현, 이지영(1999). "개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 32권 제4호, pp. 489-499.
- 김상현, 김경현(1999). "공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용." 한국수자원학회논문집, 32권 제 5호, pp. 515-524.
- Beven, K. J., (1995). "A users guide to the distribution versions(95.01) of DTM9501." Centre for Research on Environmental Systems and Statistics Institute of Environmental and Biological Sciences Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK.
- Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). "Drainage networks from grid digital elevation models." *Water Resour. Res.*, Vol. 27, No. 5, pp. 709-717.
- Freeman, T. G. (1991). "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid." *Comput. Geosci.*, Vol. 17, No. 3, pp. 413-422.
- Costa - Cabral, M. and Burges S. T.(1994). "Digital elevation model networks(DEMON) : A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas." *Water Resour. Res.*, Vol.30, No. 6, pp. 1681-1692.
- Holmgren, P. B. (1994). "Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid-based elevation models : An empirical evaluation." *Hydrol. Process*, VOL. 8, pp. 327-334.
- Iorgulescu, I. and Jordan, J. (1994). "Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment." *J. Hydrol.*, Vol. 159, pp. 255-273.
- Kirkby, M. J. (1975). "Hydrograph modeling strategies." *Process in Physical and human Geography*. Heinemann, pp. 69-90.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). "River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion fo principles." , *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Mark, D. M. and O'Callaghan, J. F. (1984), "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol. 28, pp. 323--344.
- Quinn, P. F., Beven, K. J., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models." *Hydrol. Process.*, Vol. 5. pp. 59-80.
- Servet, E. and Dezetter, A., (1991). "Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a Sudanese savannah area." *Hydrol. Science Journal.*, Vol. 36, pp. 307-330.
- Wolock D. M. and McCabe, G. J. (1995). "Comparison of single and multiple flow-direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1315-1324.