

## 지하수 함양량 평가를 위한 NRCS-CN 법의 적용 한계

최인혁 · 우남철\*

연세대학교 지구시스템학과

### Limits of the NRCS-CN Method to Assess Groundwater Recharge

In-hyuk Choi and Nam C. Woo\*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

#### 1. 서 론

물 부족 현상이 전 지구적인 문제가 되고 있으며, 가까운 장래에는 우리나라 역시 이러한 물 부족으로부터 예외가 아님을 여러 연구와 언론매체에서 다루어 왔다. 이에 따라 다양한 연구와 기술개발을 통해 체계적인 수자원관리와 신규 수자원 확보에 많은 노력이 가해지고 있음은 주지의 사실이다. 이러한 과정에서, 지하수자원의 개발가능성에 대한 평가는 장기적이며 지속가능한 수자원의 확보라는 측면에서 중요하게 다루어져야 한다. 지하수자원의 개발가능성을 정량적으로 평가하는 단계에서, 지하수의 자연적인 함양과 배출 및 물 순환 과정에 대한 연구는 중요한 의미를 갖게 된다.

지하수 함양이란 지하수면에 도달하여 대수층의 저류량을 증가시키는 수직적인 물의 흐름으로서 침투, 배수, 재분포 과정을 통해 지표면에 가해진 수리적인 스트레스를 해소하고 평형상태로 돌아가려고 하는 자연현상으로 이해될 수 있다(구민호와 이대하, 2002). 함양의 종류에는 첫재, 강수나 관개수가 비교적 균일하게 넓은 면적의 지표를 침투하여 증발산으로 소실되지 않고 토양수분의 부족분을 초과하여 지하수면에 도달하는 직접적인 함양과, 둘째, 강이나 호수의 하상을 통해 지하수면에 도달하는 간접적 함양, 그리고 셋째, 지표 함몰지에 고인 물이 적절한 수로가 없어 지하수면으로 들어가는 국지적 함양을 들 수 있다(De Vries and Simmers, 2002). 지하수의 플럭스는 자체적으로 측정이 어렵고, 이를 평가하는 방법마다 한계

성이 내재되어있으므로 가능한 모든 방법으로 측정하여 비교 분석해야 대표성을 가지는 정량적 결과를 도출할 수 있다. 그 예로, Flint et al.(2002)은 미국의 Yucca Mountain에서 방사성 폐기물 처분장 적지 선정을 위한 목적으로 함양률 연구를 수행하였는데 14여 개의 방법을 동원하여 함양률을 평가하고 그 결과들을 비교한 바 있다.

이 원고에서는 다양한 지하수 함양량 평가방법 중, 최근 국내에서 종종 적용되고 있는 NRCS-CN(Natural Resources Conservation Service-Curve Number) 법에 대하여 논의하고자 한다. 이 방법은 국내에서 지하수 함양량을 산정하기 위해 다수 적용되어 왔다(최병수와 안중기, 1998; 박재성 외, 1999; 배상근과 이승현, 2004; 배상근, 2005). 그러나 이 방법에서 산정하는 결과는 함양량이 아니라, 강수의 지표 침투량 및 지표 유출량이기 때문에, 이를 함양량 연구에 적용한 결과는 실질적으로 지하수 함양량과 다른 결과를 초래하게 된다. 따라서 이 원고에서 NRCS-CN법의 원리와 제한점을 고찰함으로써, 국내 수문환경과 관련된 연구에서 이 방법의 바른 적용을 제안하고자 한다.

#### 2. NRCS-CN 법의 고찰

1950년부터 미국 농림부(U.S. Department of Agriculture)의 토양보존국(Soil Conservation Service; SCS)은 강수 현상으로부터 지표 유출되는 양을 평가하는 시스템을 개발하여 왔다(Johnson, 1998). 이를 위해 미국 전역

\*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2007. 4. 23 게재승인일 : 2007. 8. 9

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

의 모든 토양에서 현장 실험을 수행하였으며, 이 방법은 Curve Number라는 매개변수를 이용하였기 때문에 일반적으로 SCS-CN법이라고 불리다가, 1994년에 SCS가 자연자원보존국(Natural Resources Conservation Service; NRCS)으로 바뀌면서 NRCS-CN법으로 불리고 있다. NRCS-CN법은 개발 이후 전 세계에서 널리 사용되어 왔다(Wood et al., 1997; Stone et al., 2001; Shrestha, 2003; Mishra and Singh, 2004, 2005; Mustafa et al., 2005).

NRCS-CN법의 장점은 바로 하천 유출량을 직접 측정하지 않는 무계측 유역에서도 적용 가능하다는 것이다. 기본적으로 수문학 연구는 장기간의 하천 유출 자료를 필요로 하지만 상대적으로 작은 유역에선 그런 자료를 얻기가 쉽지 않다. 이에 NRCS에서는 무계측 소유역에서 하천 유출량 외의 다른 유역 특성값들을 기반으로 강수와 유출의 관계를 밝히고자 했다. 이와 유사한 연구로 영국의 Institute of Hydrology(1995)는 무계측 지역에서 토양 속성에 따른 하천 유출량 산정을 연구한 바 있다. 현재 NRCS-CN법은 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모델 내에서 지표유출을 계산하기 위한 접근법으로 채택되어 많은 연구에 적용되고 있다(Arnold and Allen, 1996; Arnold et al., 2000; Kim et al., 2003; Chaplot, 2005).

그러나 이러한 적용의 편이성으로 인해, 그 방법의 적용 목적과 방법의 개발과정에서 자체적으로 내재된 전체 조건에 어긋나는 경우에까지 오용되어 온 것도 사실이다. 예를 들면, 원래 이 방법을 적용할 수 있는 유역의 최대 규모는 250 km<sup>2</sup>까지이고(Johnson, 1998), 적용 가능한 장소는 산림 및 농촌 지역의 소유역, 특히 열려 있는 비피압 흐름(open and unconfined flow)에 국한된다(NRCS, 1986). 그러나 국내에서는 지표 유출량 산정을 위해 적용한 연구에서 이와 같은 적용 가능한 유역면적의 최대 8.4 배나 되는, 2,100km<sup>2</sup>가 넘는 대규모 유역에 적용한 경우가 있다(장은미와 정인균, 2004).

이 NRCS-CN법의 기본적인 수학적 관계식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{Q}{P-I_a} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 지표 유출량,  $P$ 는 강수량,  $I_a$ 는 초기 손실량(initial abstraction, 지표유출이 발생하기 전까지 손실되는 양으로서 함몰지 저수량, 식생에 의한 차단량, 증발량, 침투량 등의 합),  $F$ 는 실제 저류량(actual retention) 혹은 누적 침투량(cumulative infiltration),  $S$ 는 최대 잠재 저류량(maximum potential retention)이다.

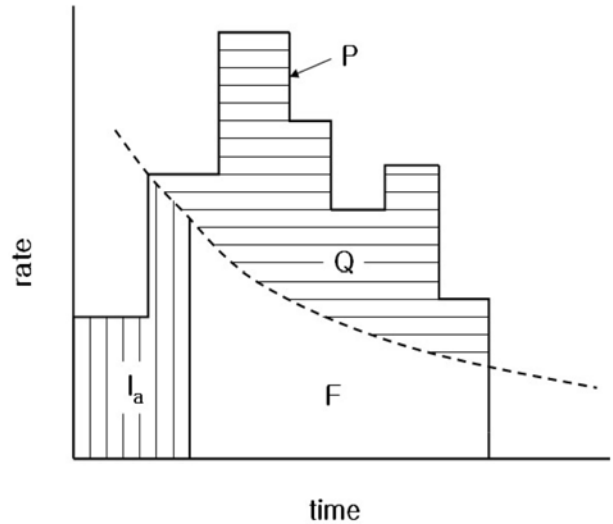


Fig. 1. Diagram of distribution of precipitation to initial abstraction ( $I_a$ ), surface runoff flow ( $Q$ ) and actual retention ( $F$ ) (from Viessman and Lewis, 1995).

이 방법은 강수량에서 초기 손실량을 뺀 양과 지표 유출되는 양의 비는 최대 잠재 저류량과 실제 저류량의 비와 같다는 개념에서 시작한다 (Fig. 1).

이 그림에서 강수량에 대한 물수지는,

$$P = I_a + Q + F \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여  $Q$ 에 대해 정리하면

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (3)$$

이 때,  $I_a$ 는 아래 식의 관계를 갖는다.

$$I_a = \alpha S \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 초기 손실량을 결정하는 계수인데 지역마다 다양한 값일 수 있으나, SCS는 미국 내 많은 농지 및 산림유역에서 실험한 결과 아래의 경험식을 얻었다.

$$I_a = 0.2S \quad (5)$$

한편, Aron et al.(1977)은 식 (3)이 큰 호우에서는 잘 맞지만 작거나 중간 정도 규모의 호우에서는 지표 유출량이 과소평가되는 경향이 있기 때문에,  $\alpha$ 를 0.1 내지 더 작은 값을 적용하는 것이 타당하다고 제안하기도 하였다.

한편, SCS는 많은 유역에서의 분석을 통해 강수량과 지표 유출량의 관계 사이에 존재하는 CN(curve number)을 확립하였는데(Fig. 2), 그 값은 토양 특성에 따라 다양하며 그 범위는 0~100으로서 CN이 클수록 동일 강수에

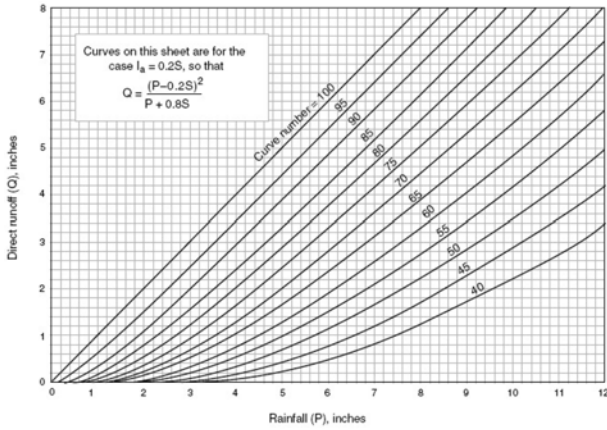


Fig. 2. Illustration of curve number (from NRCS, 1986).

대해 지표 유출량이 커지는 관계를 갖는다 (NRCS, 1986). 예를 들어, CN이 100이면 강수의 전량이 지표 유출됨을 의미하며, 이는 토양이 완전 포장된 면이거나 수체(water body)임을 의미한다.

위 식의 S는 바로 이 CN으로부터 계산되는데, 그 경험 식은 식 (6)와 같다:

$$CN = \frac{1000}{10+S} \text{ or } S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ (imperial units)}$$

$$CN = \frac{25400}{254+S} \text{ or } S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (metric units)} \quad (6)$$

여기서 이 두 변수는 반비례의 관계를 보이는데, 이는 CN이 클수록 토양의 배수조건이 나빠진다는 의미이므로 S가 작아지기 때문이다.

CN의 산정은 수문학적 토양그룹(Hydrologic Soil Group; HSG), 피복 종류, 수문학적 조건, 그리고 선행유출조건(Antecedent Runoff Condition; ARC) 혹은 선행함수조건(Antecedent soil Moisture Condition; AMC)에 따라 결정된다. 여기서 HSG는 각 토양의 구성 입자들과 최저 침투율 및 이동속도에 따라 A, B, C, D로 구분이 되며(Table 1), 토양이 심하게 교란된 경우는 토성에 따라

Table 2. Hydrologic soil groups for disturbed soil profiles (from NRCS, 1986)

| HSG     | Soil textures   |
|---------|---|
| Group A | Sand, loamy sand, or sandy loam                             |
| Group B | Silt loam or loam   |
| Group C | Sandy clay loam   |
| Group D | Clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, or clay |

Table 1. Hydrologic soil groups (from NRCS, 1986)

| HSG     | Soil character and component   | Water transmission rate (cm/s) |
|---------|--|--------------------------------|
| Group A | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Low runoff potential</li> <li>• High infiltration rate when thoroughly wetted and</li> <li>• Deep, well to excessively drained sand or gravel</li> </ul>  | greater than 2.12e-4           |
| Group B | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderate infiltration rate when thoroughly wetted and</li> <li>• Moderately well drained soils with moderately coarse textures</li> </ul>   | 1.06e-4 ~ 2.12e-4              |
| Group C | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Low infiltration rate when thoroughly wetted and</li> <li>• Soils with a layer that impedes downward movement and moderate fine to fine texture</li> </ul>  | 3.53e-5 ~ 1.06e-4              |
| Group D | <ul style="list-style-type: none"> <li>• High runoff potential</li> <li>• Very low infiltration rate when thoroughly wetted and</li> <li>• Clay soils with a high swelling potential, soils with a permanent high water table, soils with a claypan or clay layer at or near the surface, shallow soils over nearly impervious material</li> </ul> | 0 ~ 3.53e-5                    |

Table 3. Classification of AMC (from NRCS, 1986)

| AMC | Soil state  | 5-day antecedent precipitation, P <sub>5</sub> (mm) |                                |
|-----|---|---|--------------------------------|
|     |   | Growing season                                      | Dormant season                 |
| I   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dry but not to wilting point</li> <li>• Lower limit of moisture or upper limit of S</li> </ul> | P <sub>5</sub> < 35.56                              | P <sub>5</sub> < 12.70         |
| II  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Average moisture</li> </ul>  | 36.56 ≤ P <sub>5</sub> < 53.34                      | 12.70 ≤ P <sub>5</sub> < 27.94 |
| III | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wet, nearly saturated</li> <li>• Upper limit of moisture or low limit of S</li> </ul>          | 53.34 ≤ P <sub>5</sub>                              | 27.94 ≤ P <sub>5</sub>         |

**Table 4.** Surface runoff curve numbers under AMC II or average ARC and  $I_a = 0.2S$  conditions for agricultural lands (from NRCS, 1986)

| Cover type                                       | Cover description          |                      | Curve numbers for hydrologic soil group |    |    |    |
|--|----------------------------|----------------------|---|----|----|----|
|  | Treatment                  | Hydrologic condition | A                                       | B  | C  | D  |
| Fallow   | Bare soil                  | –                    | 77                                      | 86 | 91 | 94 |
|  | Crop residue cover (CR)    | Poor                 | 76                                      | 85 | 90 | 93 |
|  |                            | Good                 | 74                                      | 83 | 88 | 90 |
| Row crops  | Straight row (SR)          | Poor                 | 72                                      | 81 | 88 | 91 |
|  |                            | Good                 | 67                                      | 78 | 85 | 89 |
|  | SR + CR                    | Poor                 | 71                                      | 80 | 87 | 90 |
|  |                            | Good                 | 64                                      | 75 | 82 | 85 |
|  | Contoured (C)              | Poor                 | 70                                      | 79 | 84 | 88 |
|  |                            | Good                 | 65                                      | 75 | 82 | 86 |
|  | C + CR                     | Poor                 | 69                                      | 78 | 83 | 87 |
|  |                            | Good                 | 64                                      | 74 | 81 | 85 |
|  | Contoured & terraced (C&T) | Poor                 | 66                                      | 74 | 80 | 82 |
|  |                            | Good                 | 62                                      | 71 | 78 | 81 |
| C&T + CR   | Poor                       | 65                   | 73                                      | 79 | 81 |    |
|  | Good                       | 61                   | 70                                      | 77 | 80 |    |
| Small grain                                      | SR                         | Poor                 | 65                                      | 76 | 84 | 88 |
|  |                            | Good                 | 63                                      | 75 | 83 | 87 |
|  | SR + CR                    | Poor                 | 64                                      | 75 | 83 | 86 |
|  |                            | Good                 | 60                                      | 72 | 80 | 84 |
|  | C                          | Poor                 | 63                                      | 74 | 82 | 85 |
|  |                            | Good                 | 61                                      | 73 | 81 | 84 |
|  | C + CR                     | Poor                 | 62                                      | 73 | 81 | 84 |
|  |                            | Good                 | 60                                      | 72 | 80 | 83 |
|  | C&T                        | Poor                 | 61                                      | 72 | 79 | 82 |
|  |                            | Good                 | 59                                      | 70 | 78 | 81 |
| C&T+CR   | Poor                       | 60                   | 71                                      | 78 | 81 |    |
|  | Good                       | 58                   | 69                                      | 77 | 80 |    |
| Pasture, grassland, range (continuous forage)    |                            | Poor                 | 68                                      | 79 | 86 | 89 |
|  |                            | Fair                 | 49                                      | 69 | 79 | 84 |
|  |                            | Good                 | 39                                      | 61 | 74 | 80 |
| Meadow (continuous grass protected from grazing) |                            | –                    | 30                                      | 58 | 71 | 78 |
| Brush (mixture with weed, grass)                 |                            | Poor                 | 48                                      | 67 | 77 | 83 |
|  |                            | Fair                 | 35                                      | 56 | 70 | 77 |
|  |                            | Good                 | 30                                      | 48 | 65 | 73 |
| Woods*   |                            | Poor                 | 45                                      | 66 | 77 | 83 |
|  |                            | Fair                 | 36                                      | 60 | 73 | 79 |
|  |                            | Good                 | 25                                      | 55 | 70 | 77 |
| Farmsteads (buildings, lanes, driveways)         |                            | –                    | 59                                      | 74 | 82 | 86 |
| Roads  | Dirt                       | –                    | 72                                      | 82 | 87 | 89 |
|  | Hard surface               | –                    | 74                                      | 84 | 90 | 92 |

\*Poor : forest litter, small trees and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.

Fair : Woods are grazed but not burned and some forest litter covers the soil.

Good : Woods are protected from grazing and litter and brush adequately cover the soil.

구분한다(Table 2). 또한 보통 유역 내에 여러 종류의 토양이 복합적으로 분포하므로, 면적별로 기중 평균하여 CN

을 산정하여야 한다. 이를 위해, AMC는 5일 선행강수량으로 결정한다(Table 3). AMC II 혹은 평균 ARC 조건

하에서 CN의 값은 Table 4와 같으며, AMC I 이나 III의 경우에는 또 다른 경험식을 이용하여 CN을 환산하여야 한다.

### 3. 토의 및 제언

NRCS-CN법은 원천적으로 농촌, 산림 무계측 소유역에서 범용적으로 지표 유출량을 산정하기 위해 미국에서 현장시험을 통해 개발된 경험적 계산식이다. 이 방법을 적용할 수 있는 유역의 최대 규모는 250 km<sup>2</sup>까지이고, 적용 가능한 장소는 산림 및 농촌 지역의 소유역, 특히 열려 있는 비피압 흐름에 국한된다. 따라서 이 방법을 우리나라와 같이 도시화된 영역이 넓거나 토양 조건이 다른 환경에 적용하기 위해서는, NRCS 경험식들의 국내 환경에 대한 적용을 위해 경험식에 대한 수정보완이 필요하다.

또한, 국내에서는 “강수 사상별 침투량은 바로 지하수 함양량으로 볼 수 있다”는 전제하에, 이 방법에서 산출되는 침투식을 이용하여 장기간의 지하수 침투량을 누계하여 지하수 함양률로 산정하는 사례들이 있다. 그러나 이 경우들은 침투된 물의 지하 거동에 대한 개념적 오해에서 비롯된 것이다. 강수에 의해 지표에 도달한 물은 지표 유출과 지하 침투로 구분되며, 지하로 침투된 물(infiltrated water)은 (i) 비포화대의 공극에 체류 (retention), (ii) 비포화대에서 횡적인 이동 (중간류와 통류: interflow and through flow; Kirkby and Chorley, 1967), (iii) 포화대로의 투과 (percolation and recharge) 로 구분할 수 있다 (Fetter, 2001). 따라서 강수에 의해 침투된 물 중에서 일부만이 지하수면에 도달하여 지하수 함양으로 연결된다.

수자원 부족에 대한 인식 증대와 함께 지속적인 지하수 자원 개발에 대한 가능성을 평가하는데 지하수 함양량의 산정은 필수적이다. 하지만, 강수로부터 지하로 침투되는 침투량과, 침투된 물 중의 일부만이 지하수면에 도달하여 포화 지하수체의 함양을 일으키는 함양량과는 물리적인 현상에서부터 동일하지 않다. 결과적으로 침투량을 누계하여 지하수 함양량으로 해석하게 되면, 실제 지하수 함양량을 과다 평가하는 오류를 범하게 된다. 이와 같은 지하수 함양량 과다평가의 오류는, 지역적인 수자원의 총체적인 관리측면에서도 물 수지 계산에 심각한 오류를 초래할 수 있다. 결과적으로 체계적인 지하수자원의 개발과 관리 및 확보를 위한 정책 수립과 시행에도 심각한 문제를 유발할 수 있다.

이미 물 부족 현상이 시작된 우리나라 상황에서 다양한 기술개발을 통한 수자원의 체계적인 관리가 필요한 것은

사실이나, 물 순환과 그 변화 과정 - 강수현상과 지표 유출, 지하 침투와 비포화대에서의 수분 이동, 중간 유출, 통류, 지하수 함양 및 기저 유출, 증발산 -에 대하여 정확한 개념과 각 수문요소에 대한 실제 관측, 현장 관측 자료를 근거로 한 과학적 해석이 중요함을 갖는 이유가 여기에 있다.

## 사 사

이 내용은 최인혁의 연세대학교 석사학위 연구의 일부이며, 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비 지원(과제번호 1-8-2)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 구민호, 이대하, 2002, 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적 분석, *지질학회지*, **38**(3), 407-420.
- 박재성, 김경호, 전민우, 김지수, 1999, 소유역의 지하수함양률 추정기법, *지하수환경*, **6**(2), 76-86.
- 배상근, 2005, 지하수 함양량 산정을 위한 NRCS-CN방법의 적용성, *대한토목학회논문집*, **25**(6B), 425-430.
- 배상근, 이승현, 2004, 소유역의 강수에 의한 지하수 함양량 산정, *한국수자원학회논문집*, **37**(5), 397-406.
- 장은미, 정인균, 2004, 공간해상도에 따른 유역평균 SCS-CN값 변화에 관한 연구, *Korean J. Remote Sensing*, **20**(6), 361-368.
- 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구, *지하수환경*, **5**(2), 57-65.
- Arnold, J.G. and Allen, P.M., 1996, Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds, *J. Hydrol.*, **176**, 57-77.
- Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M., 2000, Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin, *J. Hydrol.*, **227**, 21-40.
- Aron, G., Miller, A.C., and Lakatos, A.F., 1977, Infiltration formula based on SCS curve number, *J. Irrigation & Drainage Division, ASCE*, **103**(4), 419-427.
- Chaplot, V., 2005, Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO<sub>3</sub>-N loads predictions, *J. Hydrol.*, **312**(1), 207-222.
- De Vries, J.J. and Simmers, I., 2002, Groundwater recharge : an overview of processes and challenges, *Hydrogeology J.*, **10**, 5-17.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, p. 598.

Flint, A.L., Flint, L.E., Kwicklis, E.M., Fabryka-Martin, J.T., and Bodvarsson, G.S., 2002, Estimating recharge at Yucca mountain, Nevada, USA : comparison of methods, *Hydrogeology J.*, **10**, 180-204.

Institute of Hydrology, 1995, Hydrology of soil types : a hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom, Report No.126.

Johnson, R.R., 1998, An investigation of curve number applicability to watersheds in excess of 25000 hectares (250 km<sup>2</sup>), *J. Env. Hydrol.*, **6**(7), 1-10.

Kim, C.G., Kim, H.J., Jang, C.H., and Kim, N.W., 2003, Runoff estimation from two mid-size watersheds using SWAT model, *Water Eng. Res.*, **4**(4), 193-202.

Kirkby, M.J. and Chorley, R.J., 1967, Throughflow, overland flow and erosion. *Bulletin, IASH*, **12**, 5-21.

Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2004, Validity and extention of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall excess rates, *Hydrological Proc.*, **18**, 3323-3345.

Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2005, Catchment area-based evaluation of the AMC-dependent SCS-CN-based rainfall-runoff

models, *Hydrological Proc.*, **19**, 2701-2718.

Mustafa, Y.M., Amin, M.S.M., Lee, T.S., and Shariff, A.R.M., 2005, Evaluation of land development impact on a tropical watershed hydrology using remote sensing and GIS, *J. Spatial Hydrology*, **5**(2), 16-30.

Natural Resources Conservation Service, 1986, Urban hydrology for small watersheds, TR-55, U.S. Department of Agriculture.

Shrestha, M.N., 2003, Spatially distributed hydrological modeling considering land-use changes using remote sensing and GIS, *Map Asia 2003, Water Resources*.

Stone, D.B., Moomaw, C.L., and Davis, A., 2001, Estimating recharge distribution by incorporating runoff from mountainous areas in an alluvial basin in the Great basin region of the southwestern United States, *Ground Water*, **39**(6), 807-818.

Viessman, W. and Lewis, G.L., 1995, Introduction to hydrology (4th ed.), Addison-Wesley Educational Publishers, 760.

Wood, W.W., Rainwater, K.A., and Thompson, D.B., 1997, Quantifying macropore recharge: examples from a semi-arid area, *Ground Water*, **35**(6), 1097-1106.